



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

# PŘEDEHŘEV TISKOVÉ PODLOŽKY PŘI WAAM VÝROBĚ HOŘČÍKOVÉ SLITINY AZ61

PREHEATING OF THE BASE PLATE DURING WAAM PRODUCTION OF MAGNESIUM ALLOY AZ61

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

**Bc. Stanislav Zeman**

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

**Ing. Jakub Slaviček**

**BRNO 2024**



# Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav konstruování  
Student: **Bc. Stanislav Zeman**  
Studijní program: Konstrukční inženýrství  
Studijní obor: bez specializace  
Vedoucí práce: **Ing. Jakub Slavíček**  
Akademický rok: 2023/24

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

## **Přehřev tiskové podložky při WAAM výrobě hořčikové slitiny AZ61**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Wire arc additive manufacturing (WAAM) by do budoucna mohla představovat alternativu ke konvenčním postupům výroby velkorozměrových kovových dílů. Tato technologie je založena na vrstvení svarových housenek vedle sebe a na sebe. Tímto způsobem, vrstvu po vrstvě, vzniká požadovaný 3D objekt. Zpracovatelnost hořčikových materiálů technologií WAAM je v současné době značně omezena a výrobu provází řada problémů. Mezi tyto problémy patří nestabilita zapalování svařovacího oblouku, deformace dílů při výrobě nebo vznik makroskopických trhlin vlivem prudkého ochlazování vyráběného objektu. Přehřev základního materiálu by mohl pomoci tyto problémy eliminovat.

Typ práce: výzkumná

Výstup práce: publikační výsledek (J, D)

Projekt: specifický vysokoškolský výzkum

### **Cíle diplomové práce:**

Hlavním cílem této diplomové práce je nalézt vhodné teploty přehřevu základního materiálu pro výrobu hořčikové slitiny AZ61 technologií WAAM.

Dílní cíle diplomové práce:

- vypracovat přehled současného stavu poznání WAAM výroby slitiny AZ61,
- vypracovat přehled současného stavu poznání zařízení pro vyhřívání základního materiálu,
- navrhnout, vyrobit a otestovat zařízení pro přehřev základního materiálu,
- experimentálně stanovit vhodné teploty přehřevu základního materiálu při WAAM výrobě AZ61.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, výkresy součástí.

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

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

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

**Seznam doporučené literatury:**

GNEIGER, Stefan, Johannes A. ÖSTERREICHER, Aurel R. ARNOLDT, Alois BIRGMANN a Martin FEHLBIER. Development of a high strength magnesium alloy for wire arc additive manufacturing. Metals. 2020, roč. 10, č. 6, s. 1–14. ISSN 20754701.

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

CHEN, Shujun, Min XU, Tao YUAN, Xiaoqing JIANG, Hongda ZHANG a Xing ZHENG. Thermal–microstructural analysis of the mechanism of liquation cracks in wire-arc additive manufacturing of Al–Zn–Mg–Cu alloy. Journal of Materials Research and Technology [online]. 2022, 16, 1260–1271. ISSN 22387854. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmrt.2021.12.016

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

V Brně, dne

L. S.

---

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

---

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





## ABSTRAKT

Cílem této práce bylo navrhnout a sestavit vyhřívanou podložku, která byla následně použita pro ověření vlivu předehřevu na díly vyrobené technologií WAAM z hořčikové slitiny AZ61. Postupně byl zkoumán vliv předehřevu v rozmezí 50 °C–350 °C na základní geometrii single-track návaru. Ukázalo se, že vlivem předehřevu se geometrie single-track návaru snižuje a rozšiřuje, zároveň dochází k prohloubení průvaru. Na základě těchto znalostí, byla stanovena ideální teplota předehřevu 200 °C pro výrobu tenkostěnných vzorků. Díky předehřevu došlo ke stabilizaci šířky vrstev v tenkostěnném vzorku a výrazně se jeho zvýšila kvalita. Dále byl použit předehřev pro redukci zbytkového napětí. Měřením deformace se podařilo prokázat až 50% redukci zbytkového napětí uvnitř tenkostěnného vzorku. Na závěr byl stanoven vhodný interval teplot 200 °C–250 °C pro WAAM výrobu z hořčikové slitiny AZ61.

## KLÍČOVÁ SLOVA

WAAM, wire arc additive manufacturing, předehřev, hořčikové slitiny, AZ61

## ABSTRACT

The aim of this thesis was to design and construct a heated table, which was subsequently used to verify the effect of preheating on parts made by WAAM technology using AZ61 magnesium alloy as filler wire. The effect of preheating in the range of 50°C-350°C on the basic geometry of the single-track weld was successively investigated. It has been shown that the effect of preheating reduces height and widens the geometry of the single-track weld, while deepening the penetration. Based on this knowledge, an ideal preheating temperature of 200 °C was determined for the production of thin-walled specimens. Preheating stabilized the width of the layers in the thin-walled specimen and significantly increased its quality. Furthermore, preheating was used to reduce residual stress. Strain measurements showed up to 50% residual stress reduction within the thin-walled specimen. Finally, a suitable temperature range of 200°C - 250°C was determined for WAAM fabrication of AZ61 magnesium alloy.

## KEYWORDS

WAAM, wire arc additive manufacturing, preheating, magnesium alloys, AZ61





## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ZEMAN, Stanislav. *Předehřev tiskové podložky při WAAM výrobě hořčíkové slitiny AZ61* [online]. Brno, 2024 [cit. 2024-02-15]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/154174>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce Jakub Slaviček.



## PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych v první řadě rád poděkoval panu Ing. Jakubu Slavíčkovi, množství věnovaného času, trpělivost, podporu a cenné rady při vypracovávání této diplomové práce. Dále bych rád poděkoval také panu doc. Hnízdilovi a panu Ph.D. Streckerovi za užitečné rady a pomoc při vypracovávání konstrukční části. Na závěr bych rád vyjádřil svou upřímnou vděčnost celé své rodině a partnerce za jejich neustálou podporu, trpělivost dodávání motivace během celého mého studia.

## PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

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

.....

Podpis autora



# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ</b>	<b>5</b>
2.1	Způsoby přehřevu	5
2.1.1	Topný drát	6
2.1.2	Topné patrony	6
2.1.3	Ohebná topná tělesa	6
2.1.4	Indukční ohřev	7
2.2	Řízení ohřevu	7
2.2.1	PID regulátor	7
2.2.2	Programovatelná deska Arduino	8
2.3	WAAM hořčíkových slitin	8
2.3.1	Příčiny vzniku trhlin	9
2.3.2	Vliv teploty základního materiálu na tenkostěnné díly	12
2.3.3	Zbytkové napětí	14
2.4	Důsledky použití přehřevu	16
2.5	Shrnutí současného stavu poznání	17
<b>3</b>	<b>ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE</b>	<b>18</b>
3.1	Analýza problému	18
3.2	Výzkumné otázky	19
3.3	Cíl práce	19
3.4	Hypotézy	20
<b>4</b>	<b>KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ</b>	<b>21</b>
4.1	Definice základního konceptu	21
4.1	Volba materiálu podložky	21
4.1	Volba konceptu vyhřívacího systému	22
4.2	Uložení topných patron	22
4.2.1	MKP model	23
4.2.2	Verifikace MKP modelu vyhřívané desky	24
<b>5</b>	<b>KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ</b>	<b>26</b>
5.1	Konstrukční návrh	26

5.2	Optimalizace tepelných úniků	29
5.1	Řízení a regulace	30
5.2	Funkční zkoušky	31
<b>6</b>	<b>MATERIÁL A METODY</b>	<b>35</b>
6.1	Metodika	35
6.2	Experimentální zařízení a přístrojové vybavení	36
6.2.1	Vyhřívaná podložka	36
6.2.2	Zařízení pro technologii WAAM	36
6.2.3	Zdrojový kód	37
6.2.4	3D Skener	37
6.2.5	Metalografická leštička	37
6.2.6	Mikroskop	37
6.3	Materiál a testovací podmínky	38
6.4	Metody	38
6.4.1	Druhy vzorků	38
<b>7</b>	<b>VÝSLEDKY</b>	<b>45</b>
7.1	Vliv předehřevu na geometrii návaru (VO 1)	45
7.1.1	Výška návaru	45
7.1.2	Šířka návaru	49
7.1.3	Hloubka průvaru	53
7.1.4	Kontaktní úhel	57
7.1.5	Plocha průřezu	58
7.2	Stabilizace šířky vrstev použitím předehřevu (VO 2)	60
7.2.1	Předběžné výsledky	60
7.2.2	Strategie výroby všech vrstev s předehřevem	61
7.2.3	Strategie výroby prvních vrstev s předehřevem	62
7.3	Vliv předehřevu na zbytkové napětí (VO 3)	64
<b>8</b>	<b>DISKUZE</b>	<b>66</b>
8.1	Vliv předehřevu na geometrii návaru	66
8.2	Stabilizace šířky stěny pomocí předehřevu	67
8.3	Vliv předehřevu na zbytkové napětí	68
8.4	Vliv na kvalitu a stabilitu svařovacího procesu	69
8.5	Vhodná teplota předehřevu pro slitinu AZ61	71

<b>9</b>	<b>ZÁVĚR</b>	<b>72</b>
<b>10</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ</b>	<b>74</b>
<b>11</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN</b>	<b>77</b>
<b>12</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ</b>	<b>78</b>
<b>13</b>	<b>SEZNAM TABULEK</b>	<b>81</b>
<b>14</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH</b>	<b>82</b>

# 1 ÚVOD

Slitiny hořčíku jakožto konstrukční kovy vynikají velmi nízkou hustotou  $1800 \text{ kg/m}^3$  tedy o třetinu nižší, než mají běžné slitiny hliníku. Navíc s uvážením vysoké pevnosti, která je srovnatelná s konstrukční ocelí, mohou být hořčíkové slitiny zajímavým materiálem pro aplikace, jako je například letecké nebo vesmírné inženýrství. V důsledku obtížného zpracování se ovšem jedná o velmi nákladný kov na výrobu, kdy navíc dochází ke vzniku velkého množství odpadního materiálu při následném využití konvenčních metod obrábění nebo případně lití.

Vhodnou metodou pro výrobu dílů z hořčíkových slitin by mohlo být využití aditivní technologie, jako je například WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing). Tato technologie využívá různé metody svařování pro depozici kovového materiálu ve formě návarů ve vrstvách na sebe, čímž vytváří požadovaný tvar dílu. Využití materiálu je v tomto případě výrazně efektivnější v porovnání s konvekčním obráběním a otvírá tak příležitosti pro vyšší využitelnost hořčíkových dílů v průmyslu.

V současné době se WAAM technologie využívá pro výrobu velkorozměrových dílů z oceli nebo z hliníkových slitin. Vznikají ale i pokusy o výrobu právě z hořčíkových slitin, jako je nejčastěji AZ31, AZ61, AZ81 nebo AZ91. V různých publikacích se autoři potýkají se vznikem defektů typu pórovitosti, mikro trhliny, makro trhliny nebo deformace vlivem zbytkového napětí. Výzkumníci se ve velké míře shodují na tom, že výskyt a množství defektů je důsledkem množství tepla, které vstupuje během svařovacího procesu do materiálu.

Cílem této diplomové práce je vyvinout zařízení pro předehřev základního materiálu, tedy polotovaru ve formě desky, na kterou je díl technologií WAAM vyráběný. Za pomoci tohoto zařízení pak dále bude cílem zmapovat, jak se projevuje použití předehřevu na výsledných produktech výroby a zda je možné toto zařízení využít pro zlepšení kvality konečných výrobků. Na závěr je cílem této práce určit, jaká je vhodná teplota předehřevu základního materiálu pro výrobu dílů z hořčíkové slitiny AZ61 pomocí technologie WAAM.



## 2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Výroba hořčíkových dílů pomocí technologie WAAM nabízí alternativu pro výrobu komplexních velkorozměrových dílů. Výhodou je velmi efektivní využití materiálu, což v případě hořčíkových slitin, jejichž cena je oproti oceli nebo hliníkovým slitinám násobně vyšší, může být klíčem k vyšší využitelnosti v oblastech, jako je aerospace nebo automobilový průmysl.

První část této kapitoly bude popisovat teoretický základ pro návrh vyhřívané podložky jako je volba topného elementu a dále způsob řízení jeho výkonu.

V druhé kapitole budou popsány dosavadní výsledky výzkumu zaměřeného na WAAM zpracování hořčíkových slitin a jevy, které byly rozpoznány při dosavadních pokusech o použití hořčíkových slitin při WAAM výrobě. Tyto aspekty výrazně ztěžují výrobu a mají vliv na výslednou kvalitu výrobků. Ukazuje se, že většina z nich vykazuje závislost na termomechanických vlivech, které do procesu navařování vstupují.

### 2.1 Způsoby přehřevu

Protože nebylo nalezeno vhodné komerčně vyráběné zařízení, byla v rámci této práce navržena vyhřívaná podložka, která by vyhovovala požadavkům pro aplikaci v technologii WAAM.

Hlavní částí vyhřívané desky je bezesporu topný element, který vytváří dostatečné množství tepla pro výhřev. Pro aplikaci ve WAAM je ideální, aby byla funkce topného elementu založena na přeměně elektrické energie v tepelnou energii. Důvodem je prostředí, ve kterém se zařízení pro WAAM nachází, tedy v laboratoři nebo ve výrobní hale s přístupem k napájení ze sítě s napětím 230 V, nebo 380 V. Možnosti výhřevu typu spalování hořlavin by mohly vytvářet riziko úrazu a případná porucha by mohla mít devastující následky.

Pro konkrétní případ svařování hořčíku a hořčíkových slitin se doporučuje, aby místo, ve kterém bude svarový spoj vytvářen, bylo přehřáto teplotu maximálně 400 °C [1]. Zvolený topný element by tedy měl zajistit výhřev na tuto teplotu.

### 2.1.1 Topný drát

Nejjednodušším typem elektrického ohřívání je použití topného, resp. odporového drátu. Principem jeho funkce je disipace energie vlivem odporu drátu ve chvíli, kdy jím prochází elektrický proud [2]. Typickými aplikacemi, kde je využíváno topného drátu jsou elektrické kuchyňské plotýnky, elektrické grily nebo v případě nutnosti vyhřívat dlouhá tělesa, jako jsou například okapy. Nevýhodou je ovšem vysoká citlivost na vznik koroze ve vlhkém prostředí.

V případě integrace topného drátu jakožto zdroje tepla do vyhřívané podložky, by bylo potřeba najít ideální způsob vedení drátu deskou a také navrhnout technologický postup pro přesné vytvarování drátu. Pro efektivní funkci výhřevu je potřeba zajistit maximální kontakt povrchu drážky v desce s povrchem topného drátu.

### 2.1.2 Topné patrony

Na principu odporového ohřevu je založena i funkce topných patron. V tomto případě je tenký topný drát vedený uvnitř kovového pláště topné patrony a uvnitř je chráněn vnitřním těsněním proti oxidaci a mechanickému namáhání [3]. Nejčastěji jsou topné patrony používány pro ohřev kovových částí, kde jsou uloženy v přesných tolerovaných otvorech. Příkladem, kde jsou topné patrony využívány, mohou být speciální laboratorní zařízení nebo přístroje pro zpracování plastů.

Pro použití na výhřev topné desky by se topné patrony mohly jevit jako vhodná varianta. Za nevýhodu lze považovat malá nabídka sériově vyráběných topných patron s dostatečnou délkou s ohledem na poměrně velké rozměry navrhované topné desky.

### 2.1.3 Ohebná topná tělesa

Inspirací pro výhřev desky určené pro technologii WAAM by mohla být zařízení robotického 3D tisku z polymerních materiálů. Velkorozměrové díly jsou tištěny na vyhřívané stoly o velkých rozměrech. Tyto stoly jsou ve většině případů vyhřívány pomocí ohebných topných pásů. Ohebná tělesa fungují na principu odporového ohřevu. Je možné je lepit na rovné nebo na různě tvarované plochy [4]. Díky tomu je dosaženo velmi přesného a rovnoměrného výhřevu po celé ploše stolu. Omezující je ovšem nízká maximální teplota výhřevu do 200°C.



Obr. 2-1 (a) Topné patrony [3] (b) Topný drát [1](c) Ohebná topná tělesa [5]

## 2.1.4 Indukční ohřev

Kromě již zmíněného principu odporového ohřevu je možné využít ohřev pomocí tzv. indukce. Principem indukčního ohřevu je cívka, na kterou je přiváděno střídavé napětí [6]. Cívka indukuje v blízkém feromagnetickém tělese vířivé proudy. Odpor tělesa způsobuje rychlý bezkontaktní ohřev na vysoké teploty. Typickým využitím jsou indukční kuchyňské plotýnky nebo v průmyslu je indukce využívána pro rychlý ohřev povrchu hřidelí těsně před kalením.

Využití tohoto principu pro navrhovanou desku by nabídlo rychlý a efektivní ohřev základního materiálu. Naopak nevýhodou je nerovnoměrnost ohřevu. Při použití cívek dochází k ohřevu lokálně v přímé blízkosti cívky, což se projevuje kruhovým rozložením maximálních teplot na rovném povrchu. Navíc technologie vyžaduje využití feromagnetického materiálu a není tedy možné ohřívat přímo základní materiál z hořčkové slitiny.

## 2.2 Řízení ohřevu

V rámci návrhu systému vyhřívání je jeho nedílnou součástí řídicí systém, který zajistí, že teplota vyhřívané podložky dosáhne nastavené hodnoty a na této hodnotě se ustálí. V této podkapitole jsou popsány možnosti pro řízení výkonu topných těles.

### 2.2.1 PID regulátor

Nejpoužívanějším způsobem řízení cílové teploty jsou PID regulátory pro řízení ohřevu. Regulátory tohoto typu pracují se vstupní veličinou a cílovou veličinou [7]. Na základě rozdílu mezi těmito veličinami vypočítá velikost akčního zásahu, který je součtem proporcionální, integrační a derivační části. Každá ze zmíněných částí je charakterizována svou konstantou. Velikost konstant pak definuje, jak rychlá a jak přesná je regulace na cílovou hodnotu.

PID regulátory pro ohřev jsou stavěné přímo pro řízení topných elementů založených na principu odporového ohřevu. Vstupní veličinou je teplota měřená pomocí termočlánku [8]. Výstupem je typicky řízení polovodičového nebo mechanického relé, které spínáním a rozpínáním napájení topných elementů řídí množství tepelného výkonu. Základní regulátory jsou spolehlivé a umožňují automatické nastavení regulačních konstant v průběhu regulace.

## 2.2.2 Programovatelná deska Arduino

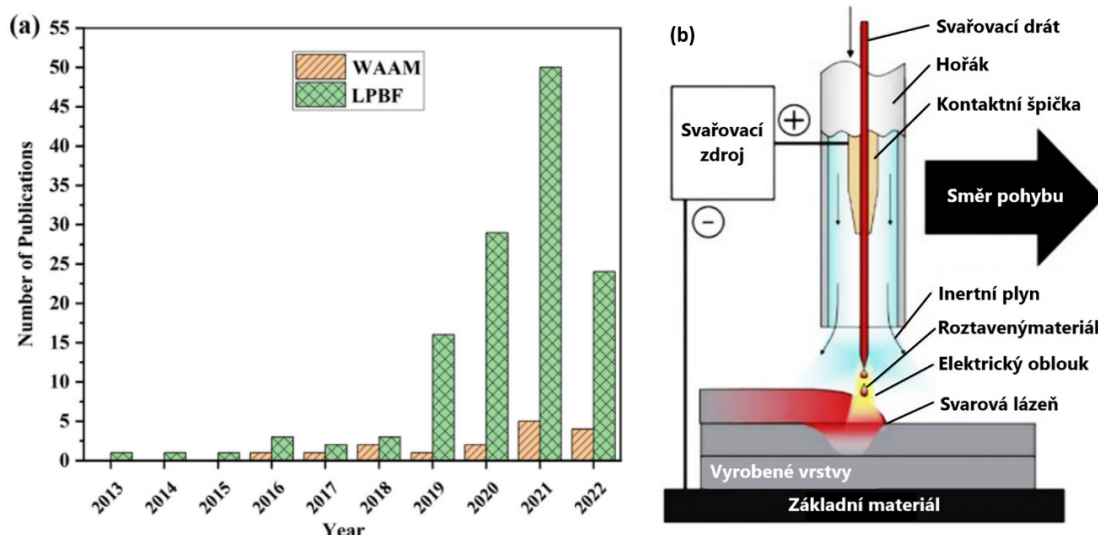
Alternativou pro teplotní PID regulátory může být použití programovatelné desky Arduino. Tato deska umožňuje připojení více senzorů pro získání vstupních veličin a dále umožní s nimi pracovat dle požadavků programátora. Díky tomu je možné využít desku Arduino pro sestavení vlastního regulačního systému. Může se jednat jak o jednoduché "I/O" regulace, PID regulace nebo i PWM regulace [9]. Funkčnost systému je omezena pouze výpočetní kapacitou desky.

Použití desky Arduino jako regulačního systému navrhované vyhřívané desky je zajímavou alternativou, která může nabízet možnost budoucích rozšíření a upgradů regulačního systému. Zásadní je ovšem spolehlivost fungování desky. Případné "zaseknutí" systému může způsobit neúměrné dávkování tepelného výkonu, které může způsobit poškození desky.

## 2.3 WAAM hořčíkových slitin

Technologie WAAM je v poslední době na vzestupu a společně s aditivní technologií LPBF umožňují výrobu dílů z hořčíkových slitin [10, 11]. Oproti LPBF však technologie WAAM nabízí mnohem efektivnější využití materiálu, nižší náklady na výrobu, a hlavně možnost vyrábět velkorozměrové díly například právě z hořčíkových slitin.

Základní princip výroby WAAM spočívá v rozdělení požadovaného tvaru dílu do vrstev, které jsou na sebe postupně navařovány. K tomu slouží svařovací zařízení, které přetavuje přídatný materiál ve formě svařovacího drátu a přenáší ho do svarové lázně roztaveného kovu. První vrstvy jsou typicky navařovány na tzv. základní materiál (Obr. 2-2 – b).

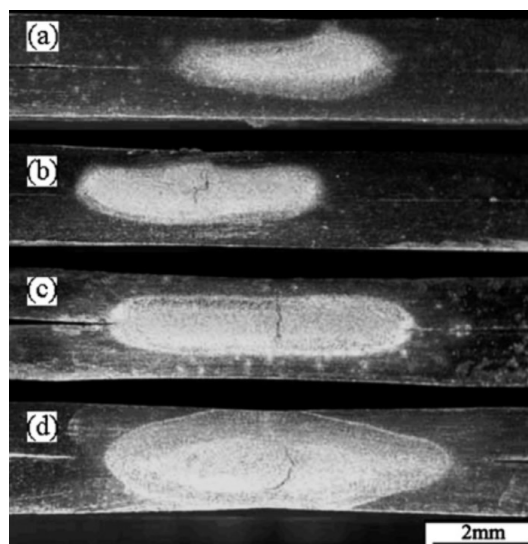


Obr. 2-2 (a) Počet publikací zabývajících se aditivní výrobou hořčíkových slitin [11], (b) Princip WAAM výroby [10]

Tématem technologie WAAM se od roku 2019 zabývá i skupina na ústavu konstruování VUT v Brně. V prvních pokusech byly vyvíjeny strategie pro výrobu tenkých stěn a převisů z ocelové slitiny G3Si1 [12]. Na to navázal Šváb ve své diplomové práci, ve které optimalizoval parametry nastavení svařecího zdroje pro výrobu z hořčíkové slitiny AZ61 a výsledky demonstroval výrobou tenkostěnného modelu [13]. Zároveň poukázal na možnou závislost teploty základního materiálu na kvalitě výrobků a vytvořil tak podmět pro tuto diplomovou práci.

### 2.3.1 Příčiny vzniku trhlin

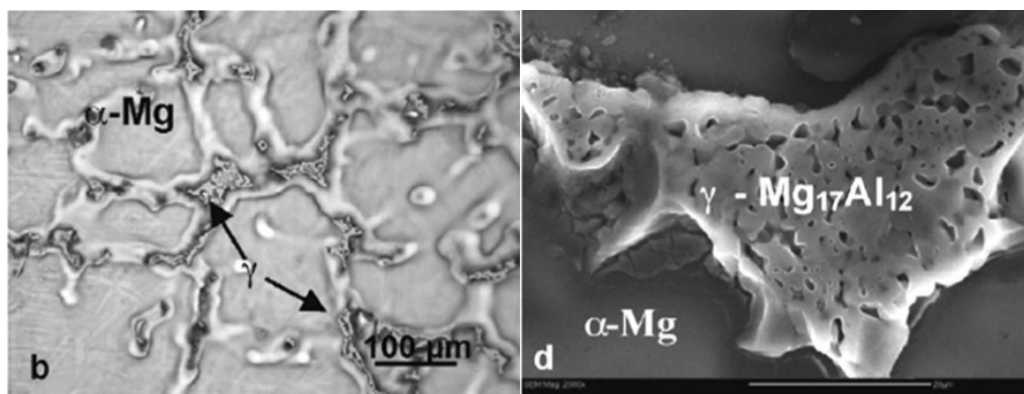
Vznik trhlin při svařování hořčíkových slitin je tématem, které bylo diskutováno nejen ve spojitosti s technologií WAAM. Příčinami vzniku mikro trhlin se zabýval například Lang (2008) ve své studii [14], kde zkoumal příčiny vzniku trhlin při bodovém svařování plechů z hořčíkových slitin. Z výsledků studie vyplývá, že velikost prasklin a náchylnost na jejich vznik roste s velikostí elektrického proudu (Obr. 2-3). Dále se ukázalo, že v mikrostruktuře tepelně ovlivněné oblasti kolem svaru dochází k hrubnutí zrn. Vznik trhlin pak Lang přisuzuje segregátům Al a Mn s nízkou teplotou tání. Ty se vylučují mezi dendrity a vlivem smršťování při tuhnutí dochází k nárůstu zbytkového napětí, jehož důsledkem pak vznikají trhliny.



Obr. 2-3 Vliv svařovacího proudu na trhlinu: (a) 15 kA; (b) 19 kA; (c) 23 kA; (d) 27kA. [14]

Závěr, že vznik trhlín je spojený se vznikem pomalu tuhnuoucích segregátů, podporují i další studie. Například ve studii Ye (2009) zaměřené na vznik defektů při svařování hořčikové slitiny ZA91D autor popsal vznik pórů a prasklin [15]. Stejně jako Lang připisuje i Ye. vznik trhlín jako důsledek vzniku eutektických fází na hranicích zrn. Konkrétně ve své studii Ye H. popisuje, že vlivem zvýšené teploty, se vylučuje eutektická fáze  $Mg_{17}Al_{12}$  na hranicích zrn. Kapalná fáze pak následně zapříčiňuje vznik a růst trhlín v mikrostruktuře. Napomáhá tomu také vysoký koeficient tepelné roztažnosti hořčikových slitin, díky kterému při prudkém ochlazování svaru dochází ke vzniku velkého vnitřního pnutí. Takto vzniklé trhliny jsou označovány jako „hot cracks“. Autor také popsal druhý mechanismus vzniku trhlín, a to „cold cracks“. Tyto trhliny vznikají z pórů, a to díky působení vnitřního pnutí. Velikost trhlín je pak úměrná i velikosti pórů. Podmětem pro vznik pórů je dle autora rozpouštění vodíku, který je přítomný ve svaru. Při vysoké teplotě je rozpustnost vodíku vysoká, ale poté naopak s klesající teplotou rozpustnost prudce klesá a vodík se poté vylučuje a vytváří tak póry.

Náchylností na vznik trhlín vlivem eutektika se dále zabýval také Huang (2011) [16]. Ve své práci zkoumal, zda má obsah hliníku v hořčikové slitině vliv na náchylnost ke vzniku trhlín. Porovnával mezi sebou svary vytvořené metodou TIG na válcovaných plechách ze slitiny AZ61 (6 hm.% Al) a slitinou AZ80 (8hm. % Al). Zároveň porovnával vliv počtu tepelných cyklů na místo svaru. Ukázalo se, že s rostoucím obsahem hliníku ve slitině dochází k tvorbě více  $Mg_{17}Al_{12}$  na hranicích zrn a tím pádem vzniká více trhlín (Obr. 2-4). Ukázalo se ale také, že při vyšším počtu tepelných cyklů se snížil obsah hliníku ve slitině. Huang zdůvodňuje tento jev tím, že během více tepelných cyklů dochází k přenosu většího množství tepla do místa svaru a díky tomu se hliník samovolně odpařuje.

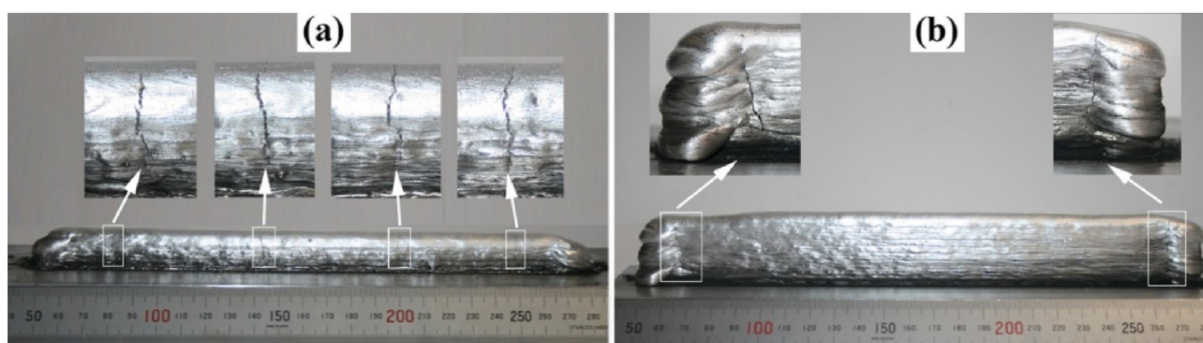


Obr. 2-4 Precipitace  $Mg_{17}Al_{12}$  v mikrostruktuře svaru [16]

Své závěry si následně Huang potvrdil ve své druhé studii (2011), v které provedl stejná měření k porovnání hořčkových slitin AZ31 a AZ61 [17].

Ke stejným výsledkům poté došel i Niknejad (2014), který porovnával mikrostrukturu a mechanické vlastnosti odporových bodových svarů na vzorcích ze slitin AZ31, AZ61 a AZ80 [18]. Navíc také pozoroval, že rozdíl mezi velikostí zrn v místě svaru a v tepelně ovlivněné oblasti se s rostoucím podílem hliníku ve slitině zvyšuje, což zvyšuje náchylnost na vznik trhlin. Dále také poznamenal, že tepelné zpracování po svařování výrazně zlepšilo mechanické vlastnosti u slitin s vysokým obsahem hliníku.

Konkrétnímu případu vzniku trhlin při WAAM výrobě se věnoval Gu (2018) [19]. Studoval různé faktory, které mají vliv vznik mikrotrhlin i makrotrhlin (Obr. 2-5). Výzkum prováděl na slitinách hliníku s hořčíkem nebo mědí. V práci poznamenal, že hlavním důvodem pro vznik trhlin při WAAM výrobě jsou deformace, které vznikají vlivem vysokých vnitřních napětí. Díky tomu dochází k tahovému oddělování zrn a vzniku trhlin. Této deformaci se dle Gua v případě WAAM nedá vyhnout. V závěru definoval zásadní vlivy na vznik trhlin. Kromě zmíněných deformací vznik trhlin ovlivňuje hlavně složení samotných slitin, poté množství vneseného tepla vlivem rychlosti posuvu drátu při stejné rychlosti pojezdu, a nakonec také mikrotvrdost. Ukazuje se, že s vyšší mikrotvrdostí se snižuje náchylnost na vznik trhlin. K vysoké mikrotvrdosti přispívá jemnozrná struktura a množství vysrážených fází na hranicích zrn.

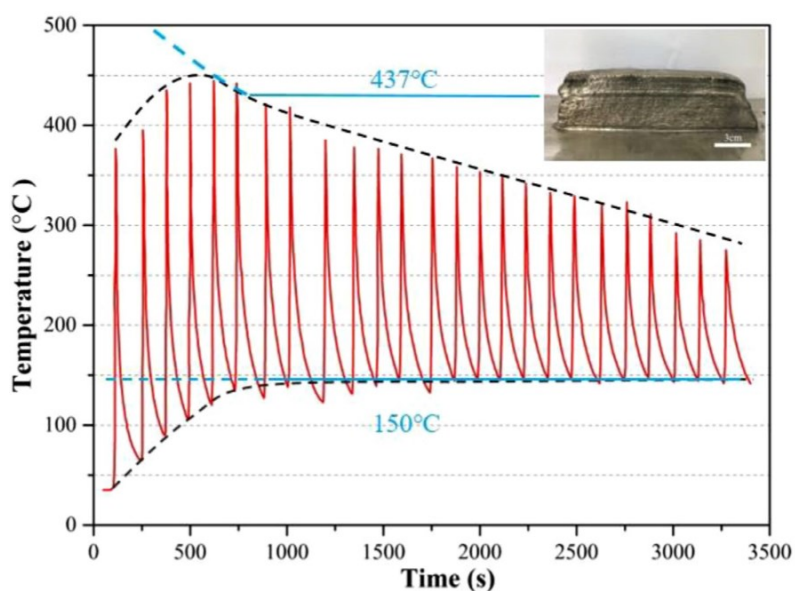


Obr. 2-5 Makrotrhliny ve vzorcích [19]

### 2.3.2 Vliv teploty základního materiálu na tenkostěnné díly

Během depozice vrstev se výrazně mění teplota jak celé stěny po výšce, tak teplota základního materiálu [20]. Vývojem teploty základního materiálu a jejím vlivem na tenkostěnné díly se zabýval Guo (2021). Přesněji studoval vývoj teploty destičky základního materiálu, šířky nanesené každé vrstvy, mikrostruktury a mechanický vlastností v různých částech stěny. K výrobě používal drát a destičku základního materiálu z hořčikové slitiny AZ80M.

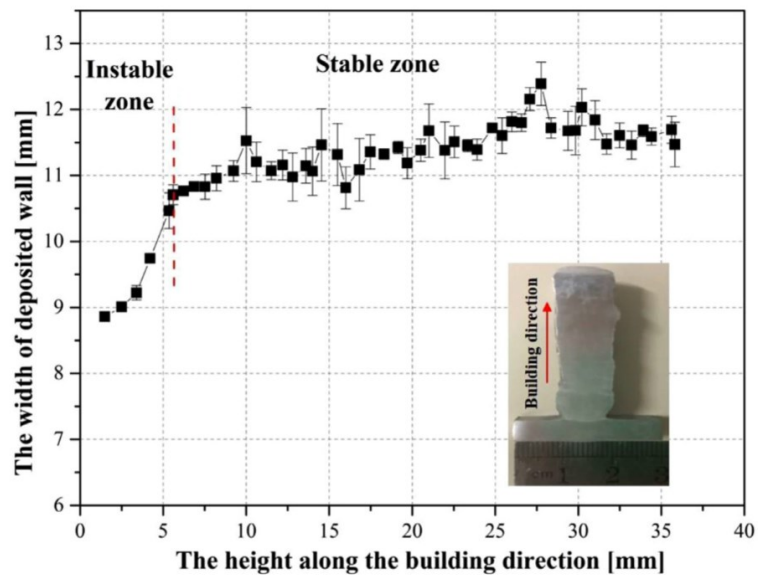
V první části publikace měřil pomocí termočlánku teplotu 2 mm pod povrchem základního materiálu, na který jsou navařovány jednotlivé vrstvy. Z výsledků je patrné, že teplota destičky se z počáteční pokojové teploty cyklicky zvyšuje vlivem teploty hořícího oblouku (Obr. 2-6). Teplota základního materiálu postupně stoupá a po vytvoření šesté vrstvy se ustálí na 150 °C. Dále je také patrné, že během několika prvních vrstev přesáhla teplota hranici 437 °C tedy eutektickou teplotu pro Mg-Al slitiny.



Obr. 2-6 Vývoj teploty základního materiálu [20]

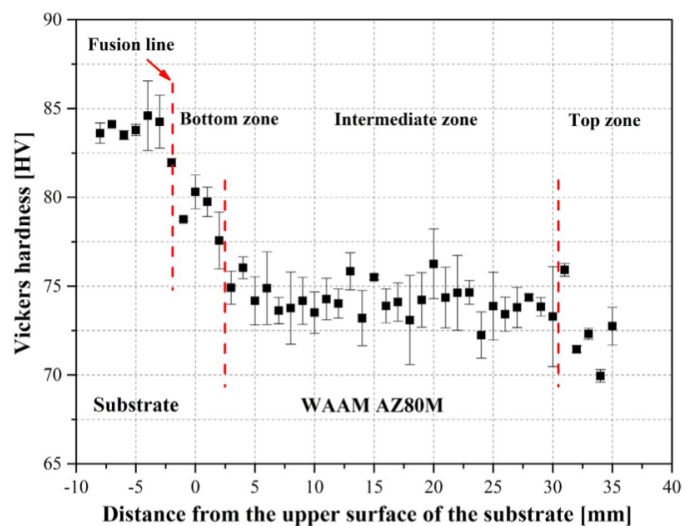
Autor také upozornil na změnu šířky vrstev. Ukázalo se, že prvních šest vrstev mělo výrazně menší šířku než zbylé vrstvy, jejichž šířka se poté ustálila na relativně konstantních hodnotách (Obr. 2-7). Důvodem změny šířky je podle Guoa právě teplota základního materiálu. Vlivem tepelné vodivosti je teplo z prvních vrstev odváděno do základního materiálu a zvyšuje se tak jeho teplota. Vrstva rychleji ztuhne a její šířka je tedy menší. Zároveň se s rostoucí teplotou snižuje tepelný odpor materiálu a s přibývajícimi vrstvami dochází k menšímu přenosu tepla.





Obr. 2-7 Šírky jednotlivých vrstev [20]

Teplota má také vliv na tvrdost materiálu. Zatímco tvrdost destičky základního materiálu byla konstantní, v prvních vrstvách se tvrdost rapidně snížila a poté se ve střední části ustálila na přibližně stejných hodnotách. Naopak na vrchních vrstvách se hodnoty tvrdosti rozptýlily (Obr. 2-8). Autor vysvětluje ustálení tvrdosti tím, že se vlivem cyklického tepla dochází k opětovnému rozpouštění a segregaci eutektické fáze na hranicích zrn.

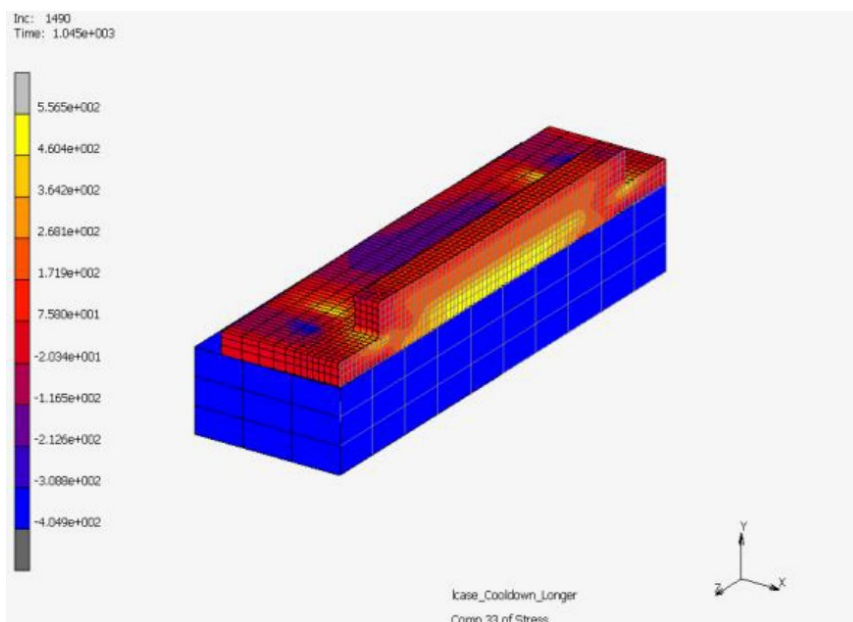


Obr. 2-8 Rozložení tvrdosti po výšce stěny [20]

### 2.3.3 Zbytkové napětí

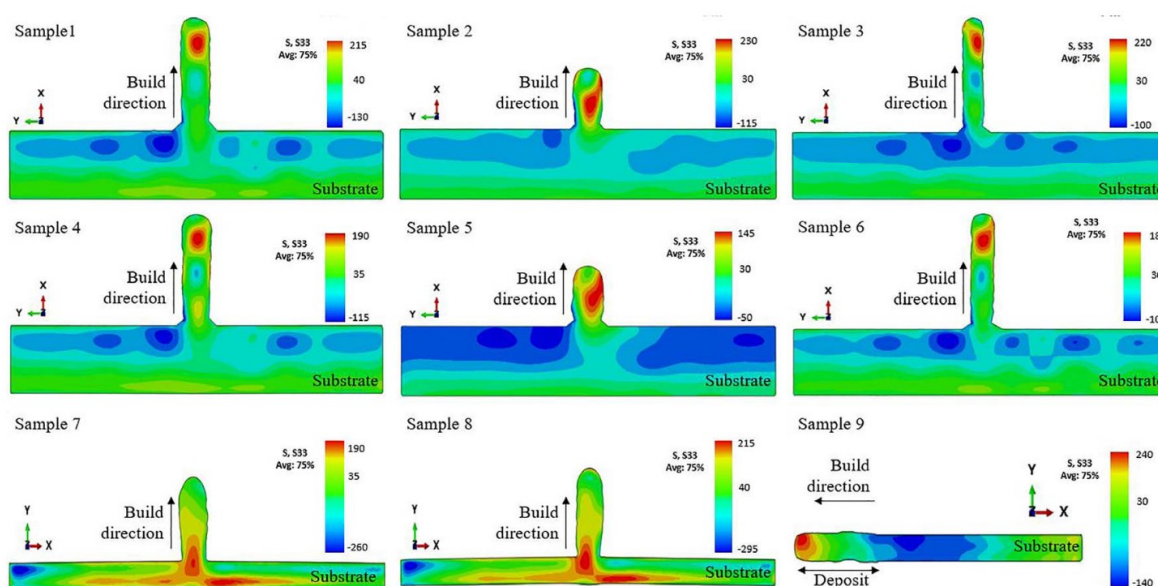
Jelikož je technologie WAAM založena na technologii svařování, přirozeně si přenáší i s tím spojené nežádoucí jevy. Jedním z nich těchto jevů je také vznik zbytkových napětí, což způsobuje deformace svarů a návarů. Obecně existují tři mechanismy, které způsobují vznik zbytkových napětí [21]. Elasticko-plastické deformace vznikají, pokud vnější silou bráníme elastické části deformace, aby se vrátila do původního stavu. Analogicky jsou tato napětí při WAAM výrobě způsobována upnutím základního materiálu pomocí upínek. Druhým mechanismem je chemické působení, kdy dochází k difuzi cizích látek do materiálu. Typickým příkladem jsou procesy jako koroze nebo galvanické pokovování. Třetím a pro technologii svařování nejtypičtějším je mechanismus působením teplotního pole. Pokud je teplotní pole nehomogenní (tzn. obsahuje teplotní gradienty) vznikají v tělese zbytková napětí. Pokud je teplotní pole homogenní, mohou i nadále vznikat zbytková napětí, a to pokud je bráněno volné teplotní dilataci.

Zbytkovým napětím v procesu WAAM se věnoval Ahmad (2020) ve své publikaci, kde studoval vhodné nastavení MKP simulace WAAM výroby [22]. Detailně popsal rozložení zbytkových napětí v tělese, které se skládalo z pěti vrstev, kdy jedna vrstva se skládala ze tří návarů vedle sebe. Podle jeho výsledků se maximum zbytkových napětí nachází na rozhraní mezi základním materiálem a první vrstvou (Obr. 2-9). Potvrdil také, že po odepnutí základního materiálu od svařovacího stolu dojde k výraznému snížení zbytkového napětí.



Obr. 2-9 Rozložení zbytkových napětí podle MKP simulace [22]

O něco lépe se povedlo popsat rozložení zbytkového napětí v tenkostěnném díle ve své publikaci Derekarovi (2022), kde experimentálně měřil zbytkové napětí konturovou metodou [23]. Tato metoda dokáže komplexně popsat rozložení zbytkového napětí v rovině průřezu kolmé na směr působení napětí. Pro experiment používal tenkostěnné vzorky, u kterých lze předpokládat jednoosé napětí po délce stěny. Celkem tímto způsobem analyzoval 9 vzorků s různými parametry, jako je tloušťka základního materiálu, výška stěny, teplota interpass (teplota, kterou má poslední vrstva ve chvíli, kdy je na ní navařována nová vrstva) nebo množství vneseného tepla při navařování. Z jeho výsledků (Obr. 2-10) je patrné, že poloha lokálního maxima tahového napětí se u základních materiálů s větší tloušťkou 20 mm (Sample 1-6) přesouvá do míst pod poslední vrstvou. Naopak u tenkého základního materiálu s tloušťkou 6 mm se tahové maximum drží na rozhraní základního materiálu první vrstvy stejně jako u výsledků, které prezentoval Ahmad (2020) ve své práci. Oproti tomu tlakové napětí bylo u širších základních materiálů naměřeno pod povrchem základního materiálu a také v nižší míře zhruba uprostřed stěny. V případě vzorků s tenkým základním materiálem bylo naměřeno sice vyšší tlakové napětí, ale ve velké vzdálenosti od stěny v základním materiálu. Lze pouze pozorovat úbytek tahového napětí ve směru stavby stěny. Rozložení tahového a tlakového napětí napovídá o charakteru namáhání, které by se u vzorků s tenkým základním materiálem dalo popsat jako ohybové.

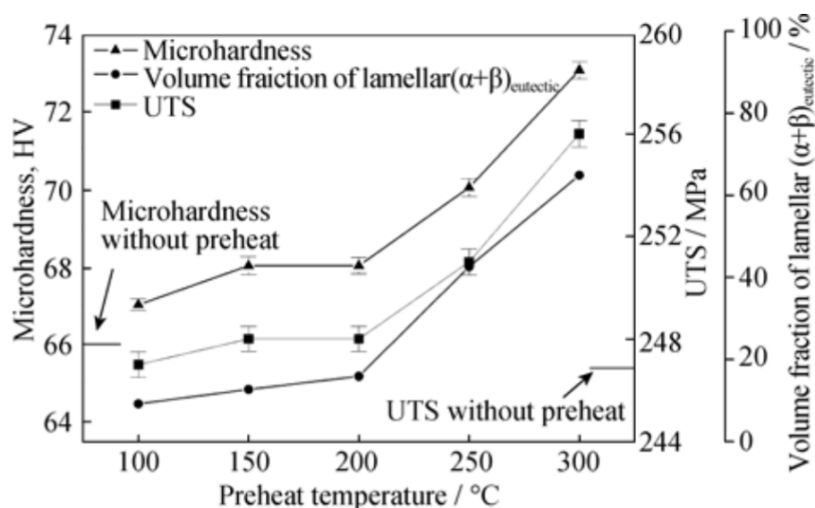


Obr. 2-10 Zbytkové napětí v tenké stěně (výsledky v MPa) [23]

Zajímavé je také srovnání různých teplot interpass, kdy vzorky č. 1, č. 2, č. 3 a č. 7 byly vyráběny s teplotou 50 °C a vzorky č. 4, č. 5, č. 6 a č. 8 s teplotou interpass 100 °C. Autor sám popisuje, že při vyšší teplotě dochází k snížení maximálního tahového napětí o zhruba 20 % oproti vzorkům s nižší interpass teplotou.

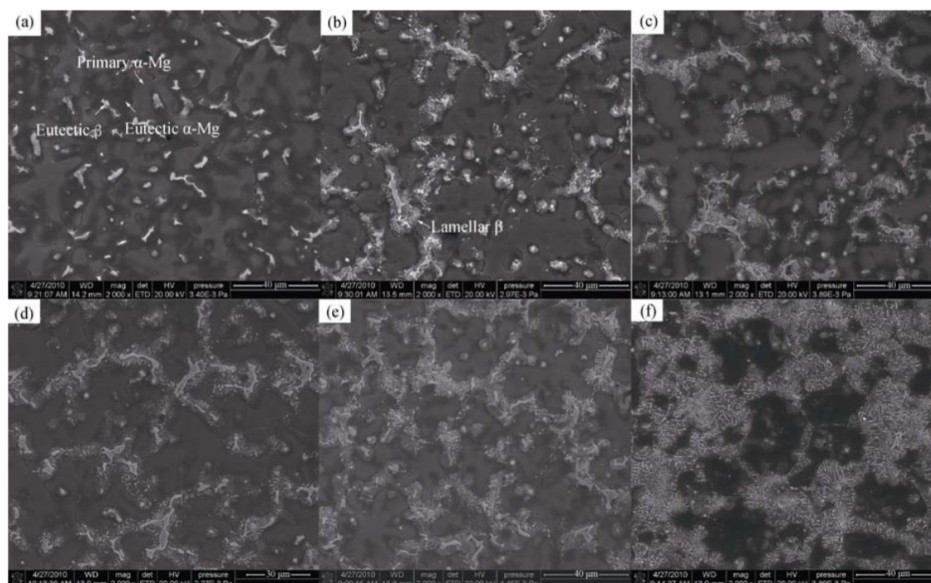
## 2.4 Důsledky použití přehřevu

Tím, jaký vliv bude mít přehřev základního materiálu na vlastnosti svaru, se zabýval Shen (2012) [24]. Ve své studii přehříval základní materiál z hořčkové slitiny AZ61 na teploty v rozmezí 100 °C až 300 °C a zkoumal vliv na mechanické vlastnosti a mikrostrukturu svaru vytvořeného metodou TIG. Zjistil, že s rostoucí teplotou přehřevu se výrazně zvyšuje mez pevnosti v tahu, mikrotvrdost v oblasti svaru a také se zvyšuje množství sloučeniny  $Mg_{17}Al_{12}$  po hranicích zrn (Obr. 2-11).



Obr. 2-11 Vliv přehřevu na mikrotvrdost, množství eutektika a mez pevnosti v tahu [24]

Shen odůvodňuje pozitivní vliv přehřevu právě nárůstem objemu lamelárního  $Mg_{17}Al_{12}$ , který se rozptýlil po hranicích zrn (Obr. 2-12), zvýšil mikrotvrdost mikrostruktury a zabraňoval pohybu dislokací.



Obr. 2-12 Mikrostruktura po přehřevu na teploty: (a) bez přehřevu (b) 100 °C (c) 150 °C (d) 200 °C (e) 250 °C (f) 300 °C [24]

## 2.5 Shrnutí současného stavu poznání

První část této kapitoly shrnula možnosti pro výběr vhodného zdroje tepla pro předehřev tiskové podložky. S výjimkou použití topných pásů, které nedovolují dostatečnou teplotu předehřevu 400 °C, jsou všechny ostatní možnosti použitelné pro tuto aplikaci. To, co zbylé možnosti odlišuje je konstrukční náročnost a spolehlivost. V případě topného drátu by bylo konstrukčně náročné zajistit efektivní přenos tepla do tělesa desky. Naproti tomu použití indukčního ohřevu je sice velmi efektivní, ale bylo by náročné docílit rovnoměrného výhřevu na povrch desky bez vzniku lokálních extrémů, které jsou pro indukční ohřev charakteristické. Zbylá možnost použití topných patron je tedy nejvhodnější. Při uložení v přesně tolerované díře, je možné maximálně využít přenosu tepla z patrony do tělesa vyhřívané desky. Navíc výrobce sám doporučuje topné patrony pro přesný ohřev kovových těles v laboratorních podmínkách. Nejnáročnější výzvou pro konstrukci desky je zvolit správné rozložení topných patron ve vyhřívané podložce, aby bylo docíleného rovnoměrného rozložení teploty na povrchu.

Z rešerše zaměřené na použití předehřevu vyplývá, že metoda předehřívání základního materiálu při WAAM výrobě nebyla doposud dostatečně popsána. Existují publikace, které hovoří o předehřevu dvou materiálů před jejich svařením [1], kdy by díky tomu mělo být dosaženo lepšího průvaru pevnějšího spoje. To bylo potvrzeno v i článku [24], který jako jediný popsal vliv předehřevu na svarový spoj ze slitiny hořčíku. V publikaci byla použita jiná technologie svařování, než je používána v této diplomové práci, a proto nejsou výsledky zcela průkazné pro tento případ.

Dále byly v rešerši byly popsány defekty a nežádoucí jevy, které byly pozorovány při výrobě dílů z hořčíkových slitin pomocí technologie WAAM. Byly objasněny mechanismy vzniků defektů a jejich závislost na vstupu velkého množství tepla při procesu navařování. Ukázalo se, že při samovolném ohřevu na 150 °C vlivem navařování došlo ke změnám geometrie a mechanických vlastností tenkostěnného dílu. Je tedy možné odvodit, že použitím vyhřívané podložky je možné značně ovlivnit proces výroby WAAM. Je také pravděpodobné, že k pozorovatelným změnám dojde už při nižší teplotě základního materiálu než 150°C. Není ovšem zcela jasné, jak přesně se předehřev projeví a jakým způsobem se bude měnit základní geometrie návarů, od které se odvíjí i rozměry vícevrstvých výrobků jako jsou tenkostěnné nebo objemové díly. Lze předpokládat, že s rostoucí teplotou předehřevu, se bude šířka návaru zvětšovat, stejně tak se bude snižovat výška návaru a také bude docházet k prohlubování průvaru.

Závislost na teplotě základního materiálu a teplotě interpass prokázalo i zbytkové napětí uvnitř tenkostěnných vzorků. V publikaci [20] byl popsán pouze případ redukce zbytkového napětí o 20 % při teplotě 100°C (interpass). To naznačuje potenciál použití předehřevu jako nástroje pro redukci zbytkového napětí v dílech vyprodukovaných technologií WAAM.

## 3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

### 3.1 Analýza problému

Technologie Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) nabízí možnost ke zvýšení produktivity při výrobě velkorozměrových kovových dílů, které jsou charakteristické svou komplexní geometrií. Budoucnost a využitelnost této technologie ovšem vysoce závisí na kvalitě výsledných produktů. V tomto směru je stále velký potenciál pro zlepšení. Obzvláště při výrobě z kovů, jako jsou hořčíkové slitiny, které nejsou využívány v takové míře jako například hliník a jeho slitiny, případně oceli vhodné pro svařování.

Při použití hořčíkových slitin pro výrobu technologií WAAM se často objevují nežádoucí nehomogenity. Ukazuje se například, že výsledné výrobky nemají konstantní šířku a výšku vrstev, nebo se vlivem zbytkového napětí celé deformují. Také dochází ke vzniku různých materiálových defektů. Může se jednat například o vznik pórů nebo mikrotrhlin. Ty mohou následně za působení vnějšího zatížení působit jako koncentrátoři napětí a zapříčinit tak nepředvídatelné poškození výrobků. Přispívá tomu také vznik velké míry již zmíněného zbytkového napětí, které vzniká při nerovnoměrném ohřevu, natavování a následně i díky rychlému ochlazování a smršťování právě navařeného materiálu.

Autoři studií, kteří se zabývali tématy vzniku materiálových defektů, se často shodují na faktoru množství vneseného tepla při deponování vrstvy navařováním. Objevují se i práce, ve kterých byla zkoumána přímo teplota základního materiálu. I zde byly popsány možné důsledky nehomogenně rozloženého teplotního pole, které vzniká při navařování.

Klíčem ke snížení teplotního gradientu a homogenizaci teplotního pole by mohlo být použití kontrolovaný ohřev základního materiálu. V tomto směru v době vypracovávání této práce neexistovaly žádné studie, které by zkoumaly důsledky cíleného ohřevu během výroby a jeho dopady na kvalitu vyrobených dílů.

Konkrétně pro technologii WAAM se nabízí použití přehřevu ve formě vyhřívaného stolu, který by sloužil jakožto platforma pro stavbu aditivně vyráběných dílů. Vystávají ovšem otázky o tom, jak se bude celý proces výroby chovat při použití přehřevu a jak moc lze jeho vliv využít pro zvýšení kvality výrobků z hořčíkové slitiny.

## 3.2 Výzkumné otázky

VO 1 Jaký vliv má teplota základního materiálu na geometrii návaru, tedy jeho šířku, výšku, kontaktní úhel a hloubku průvaru?

VO 2 Jak lze pomocí předehřevu určit schopnost vyrovnat rozdíly v šířkách prvních vrstev tenkostěnného dílu?

VO 3 Do jaké míry lze pomocí předehřevu snížit množství zbytkového napětí u tenkostěnných dílů?

## 3.3 Cíl práce

Cílem této diplomové práce je určit, jaký vliv má použití předehřevu základního materiálu na proces výroby dílů z hořčíkové slitiny AZ61 pomocí technologie WAAM. Jedná se o experimentálně výzkumnou práci s cílem zlepšit kvalitu výrobků vytvořených technologií WAAM z hořčíkové slitiny AZ61.

### Dílčí cíle diplomové práce:

- Navrhnout a sestavit testovací zařízení pro nastavení konkrétních teplot předehřevu základního materiálu.
- Navrhnout testovací vzorky společně s vhodnou metodou vyhodnocení.
- Vyrobit vzorky a provést měření sledovaných parametrů.
- Vyhodnotit a interpretovat výsledky v závěrečné práci a draftu článku.

## 3.4 Hypotézy

- H1 S rostoucí teplotou základního materiálu bude rychleji dosaženo bodu tavení materiálu vlivem teploty hořícího oblouku. Z toho důvodu bude průvar hlubší, zároveň dojde vlivem lepší smáčivosti povrchu k tomu, že bude výsledný návar s rostoucí teplotou širší, ale zároveň bude mít menší výšku. V souladu s předchozím tvrzením se bude také zvětšovat kontaktní úhel návaru.
- H2 Použitím předehřevu dojde k vyrovnání rozdílu mezi šířkami prvních vrstev, které jsou navařovány na chladnější základní materiál a mezi ostatními vrstvami, které jsou kladeny na vrstvy předehřáté předchozím navařováním. K úplnému vyrovnání mezi šířkami by mělo dojít od teploty 150°C.
- H3 Zvýšením teploty základního materiálu se sníží teplotní gradient, který vzniká vlivem hoření oblouku. Předehřátý model se po ukončení výroby bude dále rovnoměrněji ochlazovat z teploty předehřevu na pokojovou teplotu, čímž dojde k zamezení prudkého lokálního ohřevu a ochlazování. Pomocí předehřevu by mělo dojít ke snížení zbytkového napětí minimálně o 20% v závislosti na teplotě předehřevu.



## 4 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ

V této kapitole bude popsán proces návrhu vyhřívané podložky, který předcházet finálnímu konstrukčnímu řešení. Jednalo se o iterační proces, jehož cílem bylo vytvořit funkční, efektivní a spolehlivé zařízení uzpůsobené pro danou technologii.

### 4.1 Definice základního konceptu

Na základě rešerše doporučených teplot pro svařování hořčikovými slitin byla určena maximální potřebná teplota předehřevu 400 °C [1]. To bylo hlavním vstupním parametrem pro návrh vyhřívané podložky. Pro určení potřebného výkonu topného tělesa byl dále vytvořen požadavek rychlosti ohřevu 30 minut na maximální teplotu. Rozložení teplot na povrchu desky by mělo být maximálně rovnoměrné bez větších odchylek.

Dále byla zvolena velikost plochy cca 500x500 mm. Deska by měla být upnutelná na běžný svařovací stůl. Také by měla umožnit upínání základního materiálu pro zajištění dobrého přenosu tepla z vyhřívané podložky na základní materiál.

K rozpracování konstrukčního návrhu byla zvolena varianta, která využívá pro výhřev elektrické topné patrony. Konstrukční řešení bylo navrženo s respektem na zvolenou variantu a také, aby byla podložka co nejjednodušeji vyrobitelná pomocí CNC frézování. Tato výrobní technologie by měla zaručit přesnou výrobu uložení topných patron, tedy jejich správnou funkci a efektivní přenos tepla do hliníkové desky.

### 4.1 Volba materiálu podložky

Jako materiál pro vyhřívanou podložku byla zvolena hliníková slitina AW6082. Tato slitina byla zvolena z důvodu dobré tepelné vodivosti. Výhodou obecně hliníku a jeho slitin je také nízká tepelná emisivita. Díky tomu nedochází k disipaci tepelné energie do prostředí radiací. Nevýhodou pak může být vyšší tepelná roztažnost, která by mohla způsobit zvýšení kontaktního tlaku v místech šroubových spojů nebo podobných konstrukčních uzlech. Nicméně tomu lze předejít pomocí správně zvolených vůlí ve spojích. Vzhledem k zvolené technologii výroby je navíc tato slitina snadno obrobitelná, čímž se snižuje pravděpodobnost vzniku výrobních vad.

Tab. 4-1 Mechanické a tepelné vlastnosti slitiny AW 6082 [25]

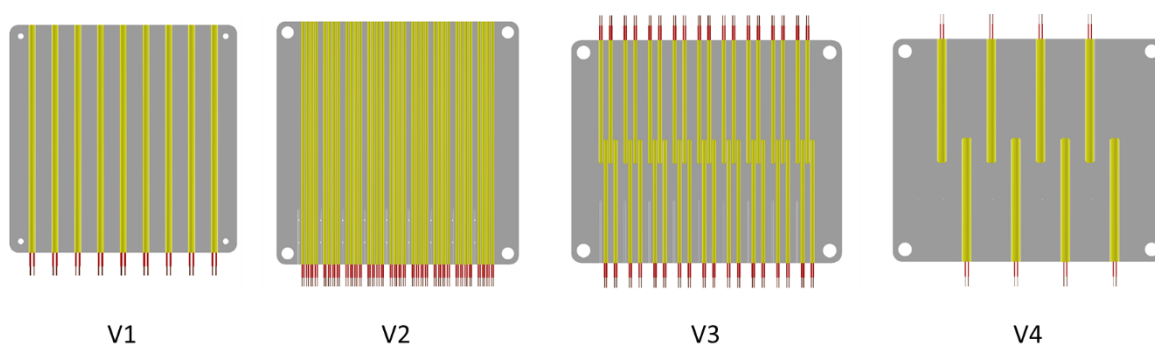
Hustota	Modul pružnosti v tahu	Mez kluzu	Mez pevnosti	Tepelná vodivost	Emisivita (při 100 °C)	Roztažnost	Tepelná kapacita
2,7 kg/m <sup>3</sup>	70 GPa	250 MPa	300 MPa	200 W/mK	0,03	23.4 *10 <sup>-6</sup> /K	896 J*Kg <sup>-1</sup> *K <sup>-1</sup>

## 4.1 Volba konceptu vyhřívacího systému

Jako způsob předehřevu byl z navržených konceptů zvolen předehřev pomocí elektrických topných patron. Tento způsob ohřevu je vhodný pro výhřev i na vysoké teploty, a to s poměrně vysokou přesností na jednotky stupňů Celsia. Lze ho navíc řídit pomocí jednoduchých PID regulátorů.

## 4.2 Uložení topných patron

Nejvýraznější vliv na funkčnost desky má bezesporu koncept uložení topných patron. Celkem bylo navrženo a testováno přes pět různých konceptů uložení. Lišily se v zásadě ve způsobu uložení patrony v desce, v celkovém počtu patron a v rozměrech patron.



Obr. 4-1 Koncepty rozložení topných patron

Původní návrh V1 počítal s použitím devíti topných patron o průměru 15 mm a dlouhých 500 mm přes celou délku desky. Tento koncept ovšem nedosahoval dostatečné přesnosti rozložení teploty na povrchu.

Pro zlepšení rozložení teploty na povrchu byl tedy navržen druhý koncept V2, u kterého byla snaha rozprostřít zdroje tepla co nejrovnoměrněji po celé šířce desky. Celkem bylo tedy použito 36 topných patron o průměru 8 mm a délce 500 mm. Tento koncept také uvažoval rozdělení topných patron do 9 zón, kde by každá zóna byla řízena separátně. Mezi jednotlivými zónami byl ponechán prostor pro termočlánky, které by sloužily jako vstupní hodnota pro regulaci každé zóny. Díky tomu byl koncept velice efektivní a teplota na povrchu dosahovala požadované přesnosti. Nicméně tento koncept byl zdaleka nejnákladnější ze všech uvažovaných. Velká nákladnost byla dána vysokým počtem topných patron, které měly atypické rozměry a musely by být vyráběny zakázkově. Zároveň s vysokým počtem topných patron se snižovala spolehlivost systému, protože bylo více pravděpodobné, že dojde k poruše jedné z patron.

Třetí varianta byla tedy vytvořena s cílem zachování přesného a efektivního výhřevu a s cílem snížení nákladů. Varianta V3 opět využívá 36 topných patron o průměru 8 mm, ale s délkou 250 mm, tedy s maximálním sériově vyráběným rozměrem. Byla také pozměněna šířka desky z 500 mm na 450 mm. Důvodem bylo uvažování konstrukce topných patron, které mají typicky na začátku a na konci 5–25 mm dlouhou netopnou zónu. Díky zmenšení šířky desky, se topné patrony uprostřed překrývají, čímž je vykompenzována netopná část každé patrony. Díky této konstrukční úpravě došlo ke snížení pořizovacích nákladů o 60%.

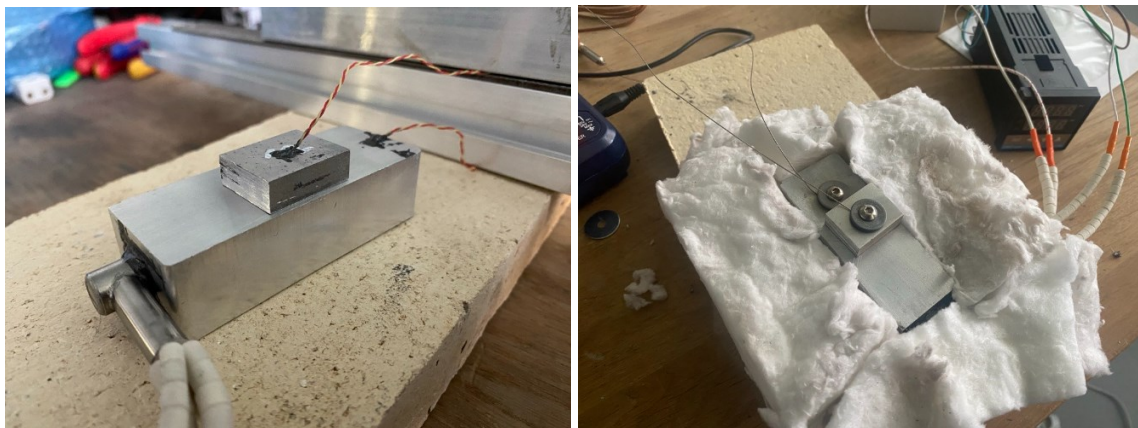
I přes příznivé výsledky předchozích iterací byla varianta V3 upravena s cílem snížení náročnosti výroby, dalšího snížení nákladů a zjednodušení komplexnosti systému (spojeného s regulací původních devíti zón) na minimum tak, aby byla stále zachována požadovaná homogenita rozložení teplot na povrchu. Výsledkem byla varianta V4, která uvažuje pouze 8 topných patron o délce 250 mm. Tato varianta uvažuje topné patrony o průměru 20 mm, z důvodu zachování velké styčné plochy mezi tepelnými zdroji a tělesem desky tak jako u varianty V3. Zároveň při tomto počtu patron je možné snížit počet topných zón na 2 až 4. Díky tomu se výrazně snížila náročnost na řízení a náklady byly sníženy o 70 % oproti variantě V3.

#### 4.2.1 MKP model

Chování různých variant desky bylo testováno pomocí MKP analýzy. Zde bylo v termálně transienční analýze simulován ohřev tepelným výkonem topných patron. Zkoumáno bylo rozložení teplot na povrchu podložky a také v celém jejím objemu, aby se ověřilo, že nedojde během ohřevu k lokálnímu překročení teploty solidu materiálu a tím poškození podložky.

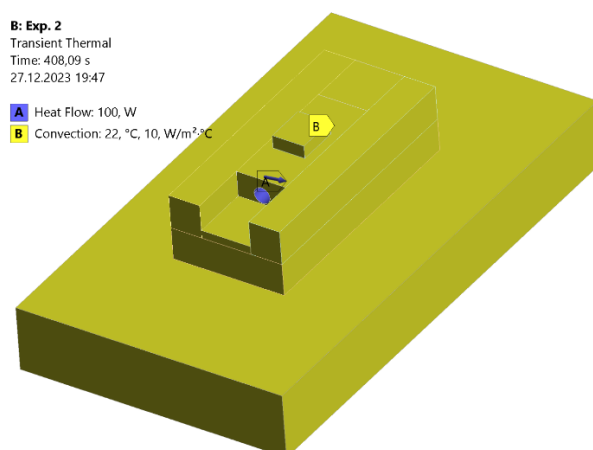
## 4.2.2 Verifikace MKP modelu vyhřívání desky

Pro simulaci byl nastaven simulační model se zvolenými okrajovými podmínkami. Zda byly tyto podmínky a jejich způsob zadávání validní bylo potřeba ověřit pomocí zjednodušeného experimentu. V něm byl použit hliníkový bloček o rozměrech 31x79x21mm a hořčičková destička o rozměrech 20x25x8 mm. Do hliníkového bloku byla vložena topná patrona o průměru 10 mm a výkonu 100 W, která byla řízena pomocí PID regulátoru a SSR relé. Na obě tělesa byly připevněny termočlánky pomocí šroubů. Hliníkový blok byl položen na šamotové podložce a obložen izolačním materiálem.



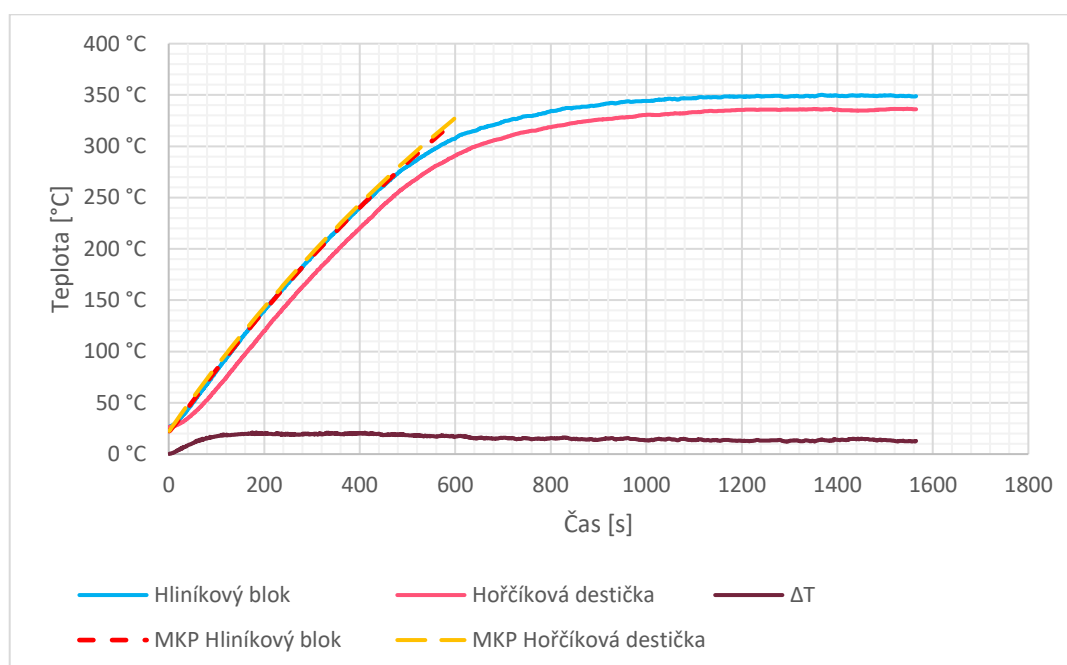
Obr. 4-2 Měřicí sestava

Do MKP modelu byla zahrnuta všechna tělesa včetně izolačního materiálu s výjimkou šroubů pro přidržení termočlánků a také s výjimkou topné patrony, která byla nahrazena zadáním okrajové podmínky ve formě tepelného výkonu 100 W na plochu díry. Dále byly nastaveny materiálové vlastnosti všech těles a konvence tepla do ovzduší o velikosti  $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{°C}^{-1}$  a okolní teplotě 22 °C. Pomocí modelu byly vyhodnocovány teploty v přibližně stejných bodech, jako byly uloženy termočlánky při experimentu.



Obr. 4-3 Nastavení okrajových podmínek MKP simulace

Při porovnání naměřených dat s vypočtenými parametry z MKP modelu se ukazuje, že vypočtené teploty na obou místech kopírují průběh teploty naměřené na hliníkovém bloku. Tato shoda trvá až do zhruba 280 °C a poté experimentálně změřené hodnoty zpomalují nárůst teploty a dále se asymptoticky přibližují k 350°C. Důvodem zpomalení nárůstu teploty je bezesporu zásah PID regulátoru, který byl nastaven na 400 °C. Ten je ovšem řízený na teplotu termočlánku, který je umístěný uvnitř v topné patroně, a proto se teplota na povrchu hliníkového bloku ustaluje při nižší teplotě, než bylo nastaveno. Zajímavé je také pozorovat rozdíly mezi teplotou hliníkového bloku a hořčikové destičky. Zatímco vypočtené hodnoty jsou téměř shodné na obou tělesech, v případě experimentálně změřených hodnot je hořčiková destička o zhruba 20 °C chladnější. V průběhu ustalování se ale tento rozdíl snižuje. Důvodem rozdílu mezi MKP modelem a experimentem je kontakt mezi tělesy, který je v numerickém modelu uvažován ideálně. V případě experimentu byl kontakt bez přitlaku a povrchy uvnitř díry pro patrony měly běžnou drsnost pro vystružování na tolerovaný rozměr H7.



Obr. 4-4 Porovnání naměřených teplot s vypočtenými teplotami pomocí MKP modelu při nastavení PID regulátoru na 400 °C

Výsledky experimentu ověřily, že okrajové podmínky použitých MKP modelů jsou nastaveny vhodně a není potřeba je upravovat. Dále se ukázalo, že je potřeba regulovat výkon topných patron podle teploty na povrchu tělesa nikoli na patroně. Kontakt mezi tělesy musí být opatřen přitlakem, například šroubovým spojením nebo upínkami. Na závěr bylo ověřeno, že použití hliníkové slitiny pro vyhřívanou desku je vhodné, nedochází k lokálnímu natavení materiálu, a navíc díky nízké emisivitě nedochází k nadměrnému ohřevu těles v blízkosti desky. Všechny tyto poznatky byly zohledněny při konstrukčním návrhu, který byl popsán v kapitole 6.2.1.

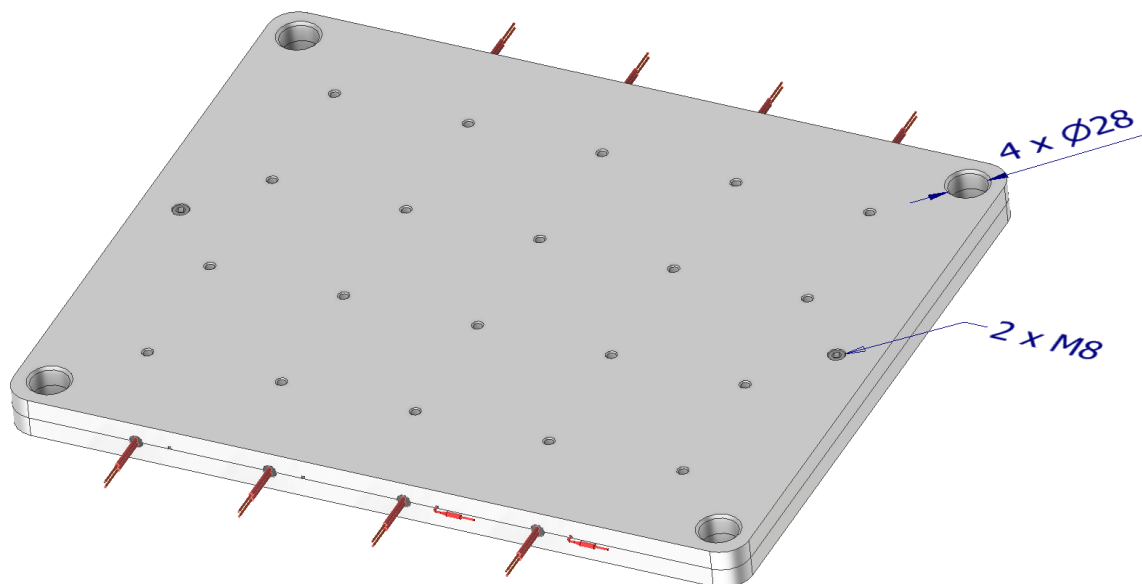
## 5 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

Po ukončení iteračního procesu vývoje základního konceptu výhřevu pomocí topných patron, který byl popsán v kap. 4, byl návrh detailněji rozpracován. Nejprve byl zvolený koncept rozložení topných patron optimalizován do konečné podoby, která je popsána v této kapitole. Dále jsou popsány dílčí konstrukční uzly jako způsob uložení řídicích termočlánku nebo systém pro upínání na topnou desku. Kromě samotného tělesa desky je popsán způsob provedení tepelné izolace a systém napájení a regulace výkonu topných patron. Závěrem jsou také popsány funkční zkoušky.

### 5.1 Konstrukční návrh

#### Koncept tělesa desky

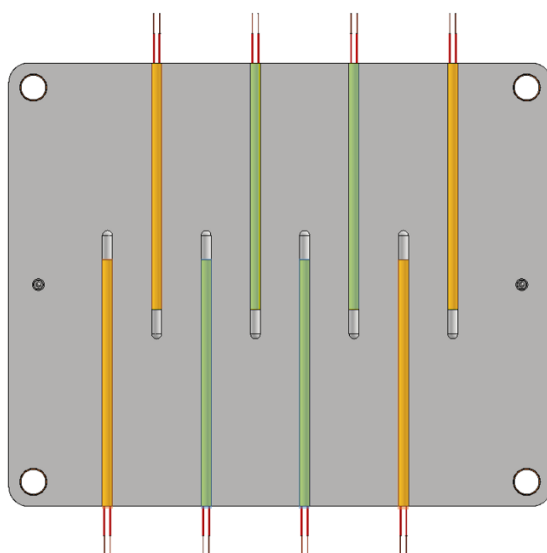
S ohledem na technologické možnosti CNC pracoviště, byla deska zkonstruována jako dvoudílná. Do vyfrézovaných válcových drážek ve spodní polovině desky byly uloženy topné patrony a následně přikryty druhou polovinou desky. Polohy obou částí desky jsou vůči sobě vymezeny pomocí samotných topných patron a jsou k sobě staženy pomocí dvou šroubů M8. Dále je deska vybavena čtveřicí otvorů o průměru 28 mm v rozích pro upnutí na svářečí stůl. Svářečí stůl reprezentuje rovinu XY v souřadnicovém systému robotického ramene. Díky upnutí topné desky na svařovací stůl je zajištěna přesná poloha v souřadném systému. Výrobní výkresy obou desek je možné vidět v příloze č.1.



Obr. 5-1 Dvoudílná deska spojená dvojicí šroubů M8

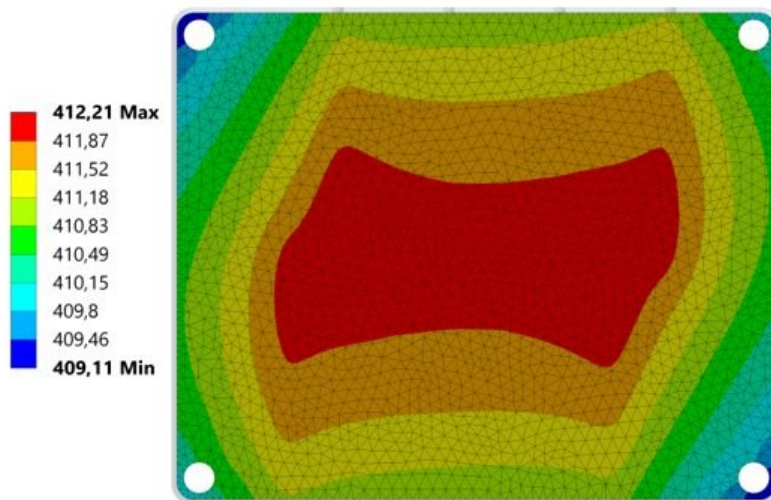
## Rozložení topných patron

Při konstrukci byl kladen důraz na konzistentnost rozložení teploty na povrchu vyhřívané podložky za použití co nejmenšího počtu topných patron. Dále byl stanoven požadavek pro rychlost přehřevu na maximální teplotu do zhruba 30 minut. To se odrazilo především na minimalizaci objemu topné desky s cílem co nejvíce snížit tepelnou kapacitu zařízení. Bylo provedeno celkem pět iterací s různými variantami rozložení, počtem a rozměry topných patron, které byly podrobeny tepelně transienční analýze (viz kap. 4.2). Protože se střed desky ohřívá mnohem rychleji než její kraje, byla deska rozdělena na dvě zóny, a to středovou zónu a krajní zónu (Obr. 5-2). Obě zóny jsou řízeny nezávisle na sobě. Díky tomuto rozdělení je rozložení teplot na celém povrchu desky rovnoměrné s minimálními odchylkami. Ve finálním návrhu bylo použito celkem 8 topných patron o celkovém výkonu 3,2 kW, které zajišťují přehřev na maximální teplotu 400 °C v časovém rozsahu do 30 minut.



Obr. 5-2 Rozložení topných patron ve dvou zónách (zelená - střed, oranžová - kraje)

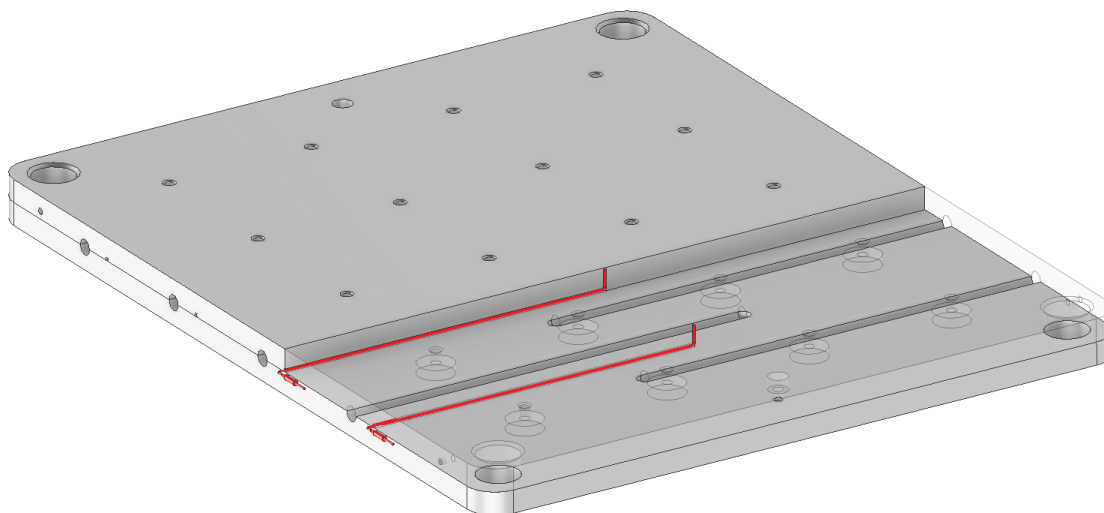
Z výsledků simulace zobrazené na Obr. 5-3 je patrné, že se podařilo pomocí dvouzónového ohřevu dosáhnout rovnoměrného ohřevu s přesností na  $\pm 1,5$  °C. Při objemové analýze se neukázalo žádné lokální přehřátí, které by překročilo teplotu solidu a způsobilo tak poruchu zařízení lokálním natavením tělesa desky.



Obr. 5-3 Rozložení teplot na povrchu desky

### Uložení řídicích termočlánků

Termočlánky o průměru 1,5 mm jsou vedeny úzkou drážkou v horní polovině desky, která je zakončena dírou o průměru 2 mm. Hloubka děr byla navržena tak, aby se termočlánky dotýkaly svými konci těsně pod povrchem. Jedině tak může být dosaženo toho, aby cílová teplota nastavená na regulátoru odpovídala teplotě na povrchu desky. Na Obr. 5-4 je možné vidět červeně zvýrazněné termočlánky uložené v horní polovině desky.

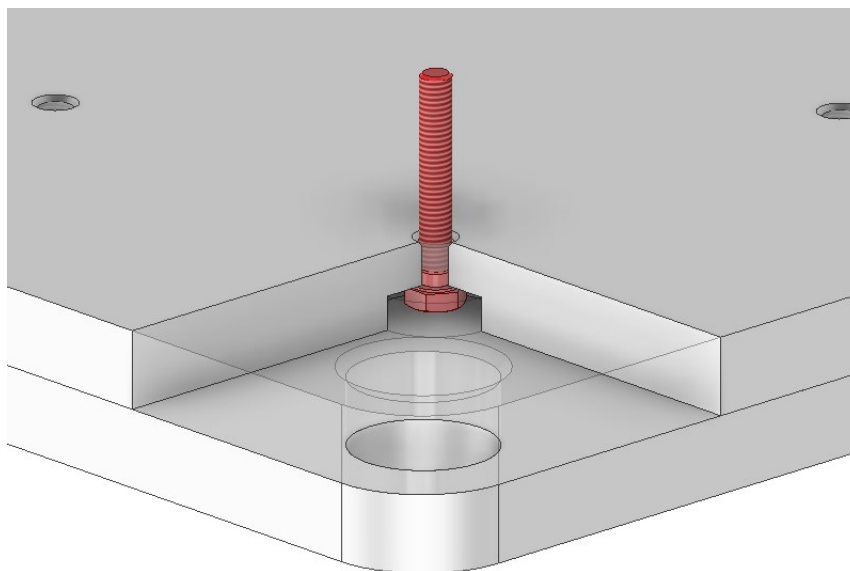


Obr. 5-4 Způsob uložení termočlánků v desce



## Upínací systém

Pro upínání destiček základního materiálu byl navržen systém dvaceti závitových děr s rozestupem 100x100 mm. Díry umožňují použití upínek na podložku. Alternativně lze díky zahloubení zašroubovat šrouby zevnitř tak, aby dřík se závitem přesahoval nad povrch podložky. Na tyto šrouby lze poté připevňovat základní materiál pomocí matic, což je vhodné například pro opakované upínání na stejné místo při malosériové výrobě.



Obr. 5-5 Řez upínací dírou se zahloubením pro šroub

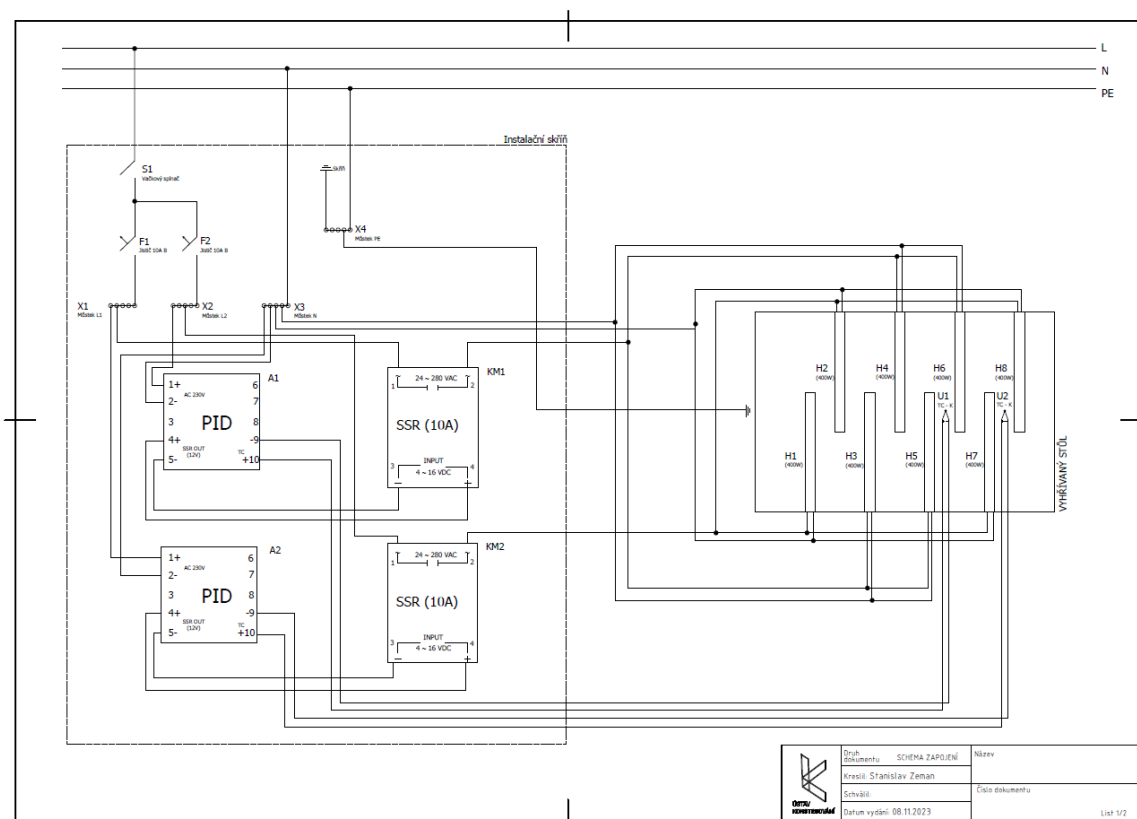
## 5.2 Optimalizace tepelných úniků

Při návrhu byl kladen důraz na maximální snížení tepelných úniků. Při zachování desky v neizolované podobě by docházelo k největšímu tepelnému úniku do svařovacího stolu, na němž je deska umístěna. Proto byla deska odizolována z pěti stran pomocí žáruvzdorné desky o tloušťce 25 mm. Materiál desky je schopen odolat teplotám do 1200 °C a zároveň disponuje nízkým součinitelem přestupu tepla  $0,2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  [26]. Izolační materiál lze navíc snadno obrábět. Do boční části izolace byly tedy vyfrézovány drážky pro vývod vodičů topných patron a termočlánků. Současně pak drážky v izolaci plní funkci ochrany vodičů před případným poničením od jisker odletujících z tavné lázně při svařování.

Mezi izolací a rozvodnicí jsou napájecí vodiče chráněny pomocí ocelového opletu schopného odolávat teplotám do 300 °C [27].

## 5.1 Řízení a regulace

Pro regulaci teploty přehřevu bylo zvoleno řízení pomocí PID regulátorů. Tyto regulátory využívají pro přesné a spolehlivé řízení tepelného zdroje polovodičová SSR relé. Jako vstupní veličina je teplota měřená pomocí termočlánků. Termočlánky fungují na principu termoelektrického jevu. V tomto případě byl zvolen termočlánek typu K, který je schopný měřit teploty do teploty 980 °C [28]. Schéma zapojení je možné vidět na Obr. 5-6, případně v plné velikosti v příloze č. 2.



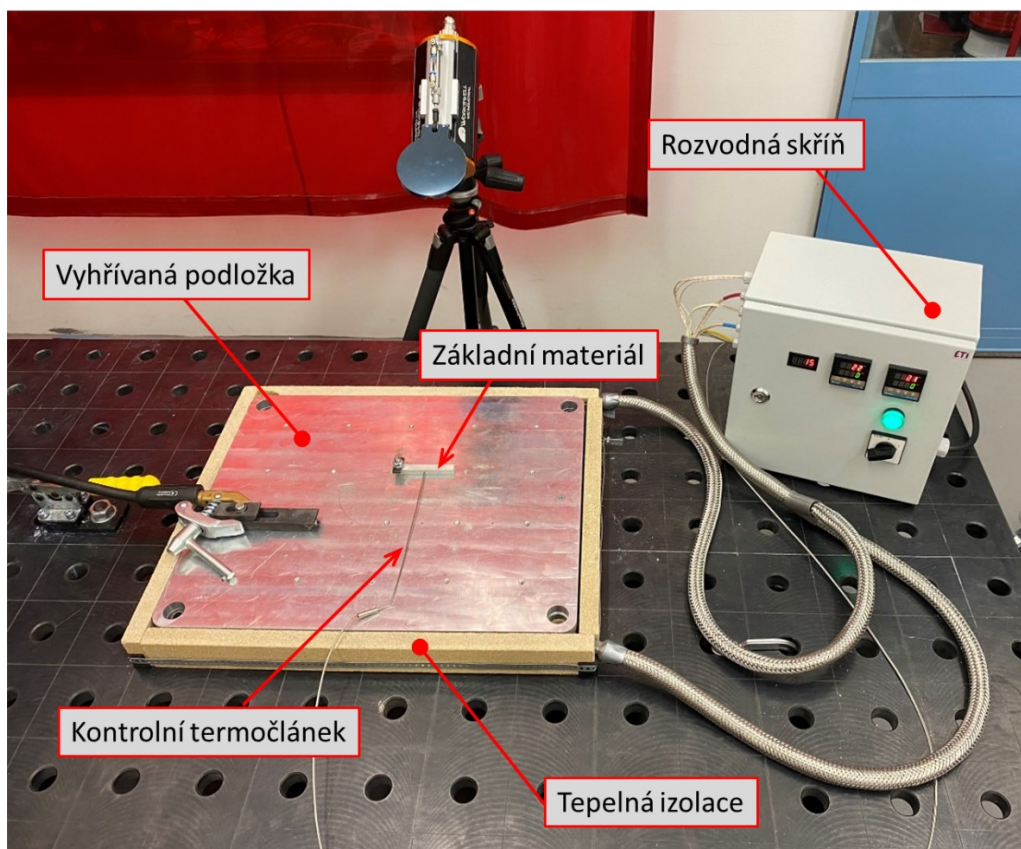
Obr. 5-6 Schéma zapojení rozvodné skříně

Řídicí regulační systém byl navržen tak, aby bylo možné napájet vyhřevanou podložku ze síťového napětí 230 V. Zvolený řídicí systém se skládá ze dvou okruhů, kdy každý z těchto okruhů se dále skládá z jističe o jmenovitém proudu 10 A, PID regulátoru a SSR relé. Deska i rozvodná skříň jsou uzemněny, aby nedošlo k úrazu elektrickým proudem v případě dotyku s vodičem.

Kromě výše zmíněných prvků nezbytných pro funkci a bezpečnost systému, byla dále také přidána programovatelná deska Arduino UNO pro sledování teploty samotného základního materiálu položeného na desce pomocí třetího termočlánku. Měřená teplota je v reálném čase zobrazována na panelu umístěném vedle PID regulátorů na přední straně rozvodnice. Dále byl na boční stranu rozvodnice přidán USB konektor pro snadnější připojení k desce Arduino. Ta slouží jako separátní měřicí systém, který využívá třetí termočlánek pro měření teploty základního materiálu nebo jiného požadovaného místa. Zároveň deska Arduino vytváří prostor pro další možná vylepšení do budoucna.

## 5.2 Funkční zkoušky

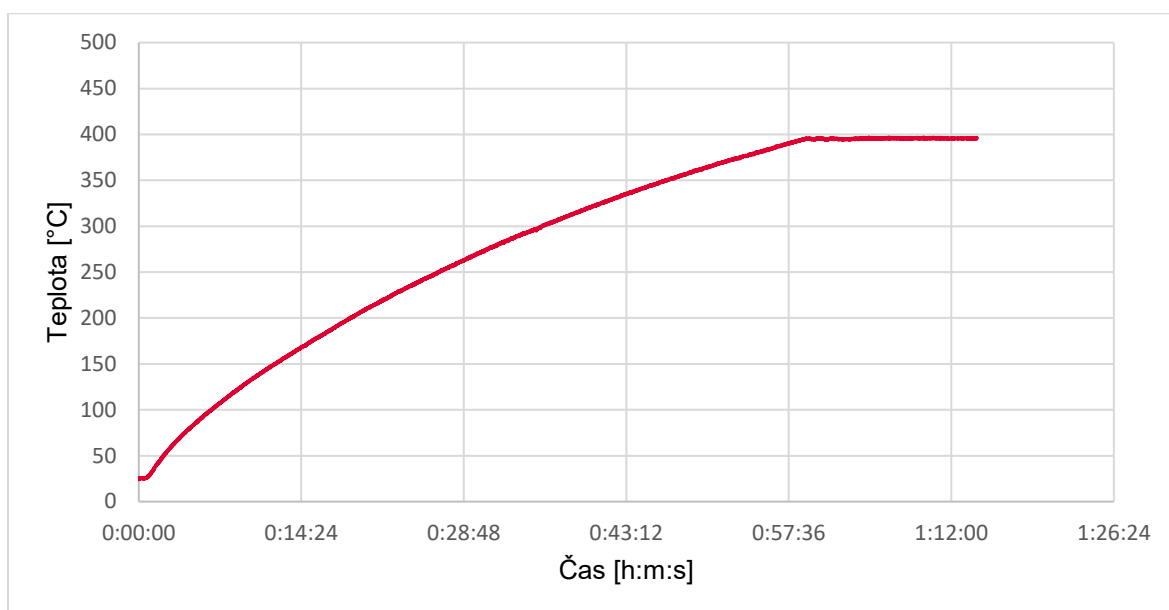
Výsledný návrh vyhřívané podložky byl následně realizován. Obě poloviny hliníkové podložky byly obrobena na CNC obráběcím centru HAAS nacházejícím se na ÚK. Elektroinstalace skládající se z topných patron, termočlánků a řídicí rozvodné skříně byly vyhotoveny dle předem navrženého schématu (viz příloha č. 2).



Obr. 5-7 Kompletní vyhřívaná podložka

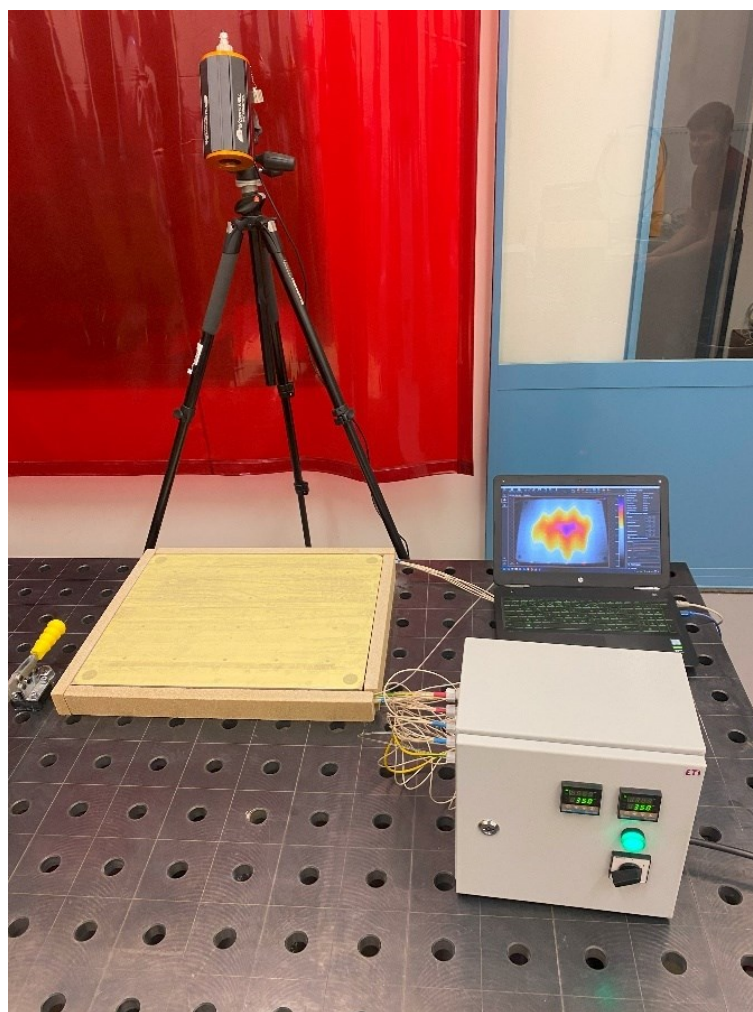
Kompletní zařízení bylo následně testováno a byla ověřována jeho funkčnost. Zkoušky byly rozděleny do dvou částí.

V první části bylo testováno, zda je zařízení schopno dosáhnout maximální požadované teploty 400 °C. Teplota byla měřena pomocí třetího kontrolního termočlánku, který je napojený na integrovanou desku Arduino. Tento termočlánek byl zaveden stejným způsobem jako řídicí termočlánek pro středovou zónu. Na Obr. 5-8, který vyobrazuje výsledky měření, je možné vidět, že koncept rozložení topných patron a jejich výkon, je dostatečný pro výhřev na požadovanou teplotu a bylo by možné dosáhnout i vyšších hodnot. Nelineární charakteristika náběhové křivky způsobila, že oproti předpokladu, došlo k prodloužení časového intervalu přehřevu, a to zhruba na dvojnásobek původního požadavku, tedy 1 hodinu. Důvodem je pravděpodobně nepřesné uložení některých patron, které bylo způsobeno nepřesností a chybami při výrobě.



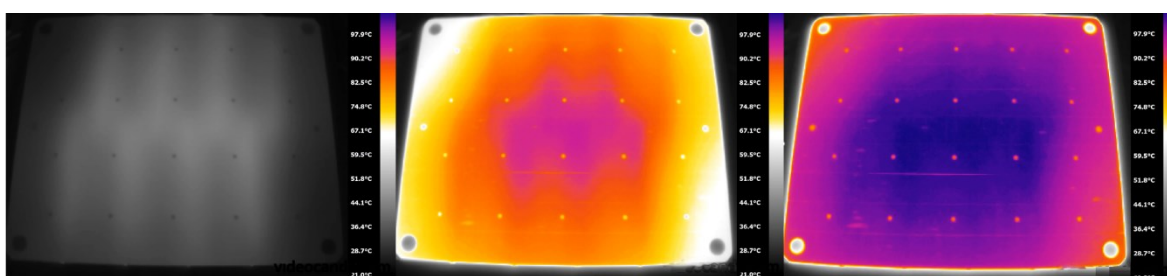
Obr. 5-8 Náběhová křivka výhřevu na 400 °C

V druhé části funkčních zkoušek byla použita termokamera pro ověření rovnoměrnosti rozložení teploty na povrchu desky. Protože hliníková deska s nízkou drsností povrchu není vhodná pro tento druh měření, byla na povrch nalepena vrstva papírové pásky, která disponuje požadovanou emisivitou a při měření nezpůsobuje chyby měření. Cílová teplota byla nastavena na 100 °C, a to z důvodu, aby nedošlo ke spálení papírové pásky.



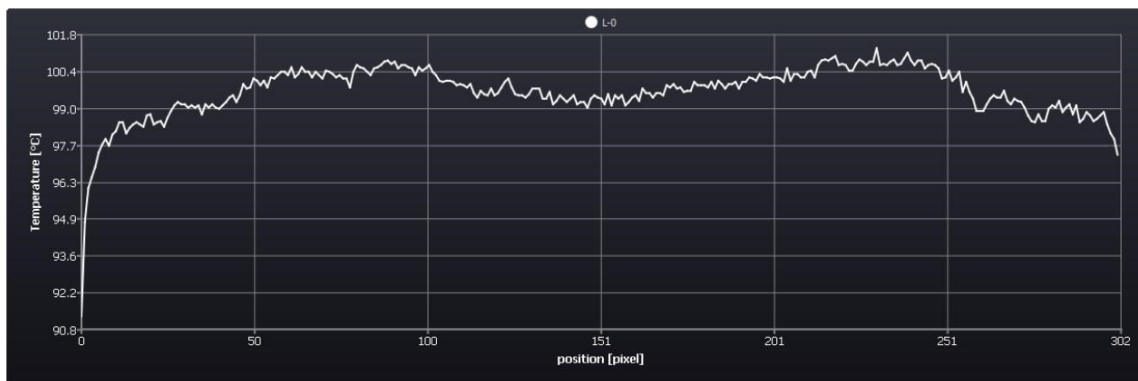
Obr. 5-9 Měřící sestava rovnoměrnosti rozložení teploty na povrchu

Výsledky měření ukázaly, že v průběhu výhřevu dochází k předpokládanému rychlému ohřevu uprostřed desky a pomalejšímu ohřevu na krajích. Po přiblížení se k cílové teplotě se projevilo rozdělení topných patron do dvou topných zón a rozdíl mezi středovou částí a kraji desky se postupně vyrovnal (Obr. 5-10).



Obr. 5-10 Průběh rozložení teploty na povrchu desky

Pro vyhodnocení rovnoměrnosti byl proveden vodorovný řez, zhruba ve středu desky, a v tomto řezu byly vyobrazeny hodnoty teplot naměřené termokamerou. Na Obr. 5-11 pak vidíme, že teplota v tomto řezu se pohybuje v rozmezí 99 °C až 101 °C. Reálná přesnost rozložení teplot je tedy zhruba  $\pm 1$  °C. Takto přesné rozložení teplot na povrchu je více než dostačující pro aplikaci při výrobě technologií WAAM.

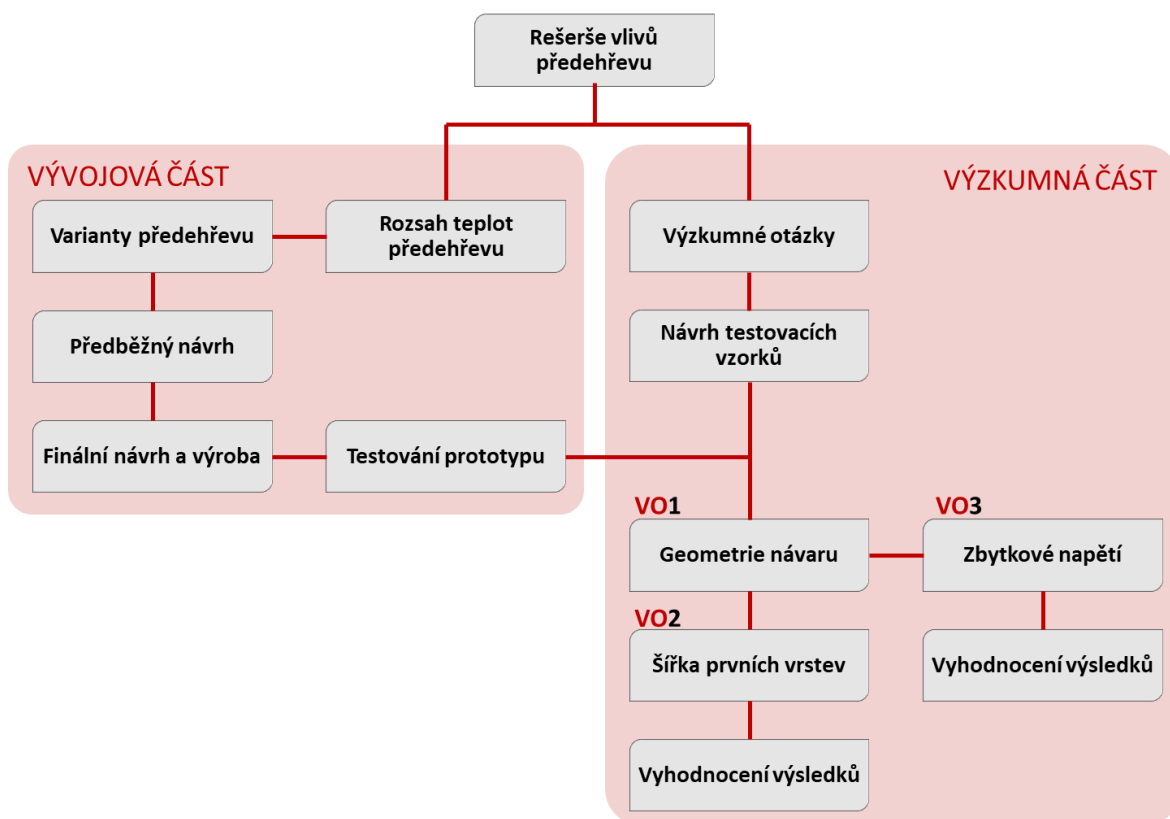


Obr. 5-11 Řez změřeným teplotním polem po ustálení

## 6 MATERIÁL A METODY

### 6.1 Metodika

Pro řešení problému byla nejprve provedena kritická rešerše, na základě které vyzstaly tři výzkumné otázky. Zároveň byla z poznatků rešerše zvolena maximální teplota, která je vhodná pro předehřev materiálu AZ61. Ta následně sloužila jako kritérium pro vývoj vyhřívané podložky. Díky vyhřívané podložce bylo možné uskutečnit výrobu třech různých typů vzorků. Podoba vzorků byla volena tak, aby bylo možné vyhodnotit a zformulovat odpovědi na výzkumné otázky. Série vzorků byly vyhodnocovány separátně. Z výsledků byly formulovány odpovědi na výzkumné otázky a také vyhodnoceny intervaly hodnot teploty předehřevu, které lze označit jako vhodné pro daný zkoumaný parametr.



Obr. 6-1 Schéma postupu řešení diplomové práce

## 6.2 Experimentální zařízení a přístrojové vybavení

### 6.2.1 Vyhřívání podložka

V důsledku toho, že v současné době neexistují komerčně dostupná zařízení, která by byla použitelná při WAAM výrobě, bylo vyvinuto vlastní zařízení vyhřívání podložky. Celý vývoj tohoto zařízení a jeho funkce jsou blíže popsány v kapitole 4 a 5.

### 6.2.2 Zařízení pro technologii WAAM

Pro technologii Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) se výrobní zařízení skládá ze dvou částí. Hlavní částí je svařovací zdroj. V tomto případě byl použit svařovací zdroj Fronius TPS 3200 CMT. Tento zdroj lze použít pro svařování metou MIG, MAG nebo WIG. Mimo tyto konvenční metody je zdroj uzpůsoben pro navařování metodou CMT, jenž je modifikací metody MIG. Díky tomu, že oblouk mezi elektrodou a materiálem nehoří po celou dobu, ale pouze krátce, aby vytvořil tekutou kapku na konci drátu, vnáší do místa svaru menší množství tepla. To přináší velkou výhodu pro technologii WAAM. CMT je také vhodná pro svařování i jiných kovů, než jsou běžně v praxi využívány. Nabízí tak větší paletu možností pro WAAM technologii.

Druhou částí zařízení je robotické rameno Kuka KR60HA, které zajišťuje přesný pohyb a polohování hořáku. Jedná se o robotické rameno s nosností až 60 kg. Pohyb zajišťuje 6 os s přesností  $\pm 0,05$  mm v případě polohování a přesností  $\pm 0,16$  mm při pohybu po zadané trajektorii. Robot je schopen pohybu v prostoru o objemu 27,2 m<sup>3</sup> s dosahem do vzdálenosti až 2,033 m. Právě díky přesnosti, resp. opakovatelnosti pohybu je toto rameno vhodné pro WAAM technologii. Zařízení je díky tomu schopné při výrobě tenkostěnných modelů vytvářet vrstvy návarů přesně nad sebou.



Obr. 6-2 Robotické rameno Kuka vybavené Svařovacím zdrojem Fronius



### 6.2.3 Zdrojový kód

Pohyb robotického ramene byl řízen pomocí předem vytvořeného SRC kódu. Jedná se o kód, který řídí pohyb robotického ramene v kartézském souřadnicovém systému. V tomto případě řídí SRC kód pohyb hořáku tak, aby vytvářel jednotlivé návary a vrstvy. Pro tvorbu SRC kódu byl využit plugin Grasshopper, který rozšiřuje software Rhinoceros 6. Grasshopper byl navíc doplněn o plugin Kuka/prc, který převádí geometrická data vytvořená v Grasshopperu na kinematické příkazy pro předem zvolený typ robota.

### 6.2.4 3D Skener

Pro měření geometrie návaru bylo využito 3D skenování povrchu pomocí přístroje ATOS Triple Scan III. Skener funguje na principu stereo snímání neboli promítání rastrových pruhů o různých šířkách na povrch. Obraz snímají dvě kamery se známým natočením do scény a podle deformace promítaných pruhů na povrchu přesně mapuje tvar povrchu. Kvalitě skenování napomáhá projekce úzkopásmového modrého světla, díky kterému dojde k odfiltrování rušivých vlivů z okolí. Aby nedošlo k tvorbě odlesků od měřeného povrchu, byl na měřený povrch nanesen zmatňující křídový nástřik.

### 6.2.5 Metalografická leštička

Pro leštění metalografických vzorků, které byly dále zkoumány mikroskopem, byla použita leštička SAPHIR 250 A2-ECO. Leštička je vybavena dvěma lešticími kotouči o průměru 250 mm. Přístroj dokáže automaticky řídit dávkování mikro-abrazivní lešticí pasty. Samotné leštění probíhá automaticky na základě zvoleného lešticího programu nebo v ručním režimu lze nastavit přítlak, rychlost i směr otáčení lešticích kotoučů.

### 6.2.6 Mikroskop

Pro měření hloubky průvaru byl použit mikroskop Olympus SZX7. Mikroskop je připojen na počítač, na kterém je možné zpracovávat obraz z mikroskopu. Fotografie pořízené mikroskopem, lze doplnit měřítkem, které se odvíjí od přiblížení mikroskopu.

## 6.3 Materiál a testovací podmínky

Pro výrobu technologií WAAM byl použit svařovací drát z hořčíkové slitiny AZ61. Drát byl navinut na cívku a jeho průměr byl 1,6 mm. Drát byl vždy očištěn od hydroxidů na povrchu mechanickou čističkou. Poté byl drát umístěn do pece pro dodatečné ošetření hydroxidů, které čistička neodstranila. Chemické složení hořčíkové slitiny je uvedeno v tabulce níže.

Tab. 6-1 Složení hořčíkové slitiny AZ61 (hm%)

Al	Zn	Mn	Si	Cu	Fe	Ni
6	1	0.28	0.1	0.05	0.005	0.005

Výroba vzorků byla provedena v místnosti s pokojovou teplotou. Teplota v laboratoři nebyla nijak kontrolována, byla pouze průběžně monitorována. Obecně se teplota v místnosti pohybovala v rozmezí od 18 °C do 23 °C.

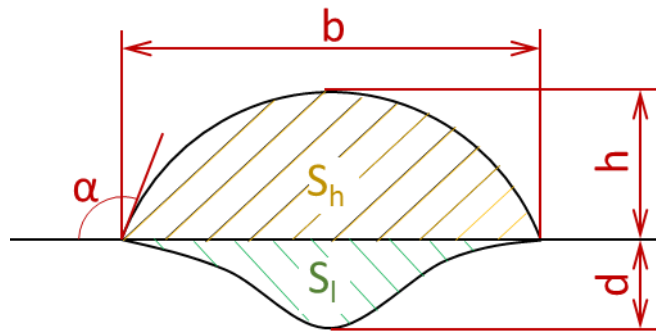
## 6.4 Metody

Aby bylo možné jednoznačně odpovědět na výzkumné otázky z kapitoly 3.2 a potvrdit či vyvrátit tak hypotézy, byla pro každou výzkumnou otázku navržena podoba vzorků, které byly následně vyrobeny pomocí technologie WAAM za použití vyhřívané podložky. Detailní popis navržených druhů vzorků i s jejich způsobem vyhodnocování je popsán v této kapitole.

### 6.4.1 Druhy vzorků

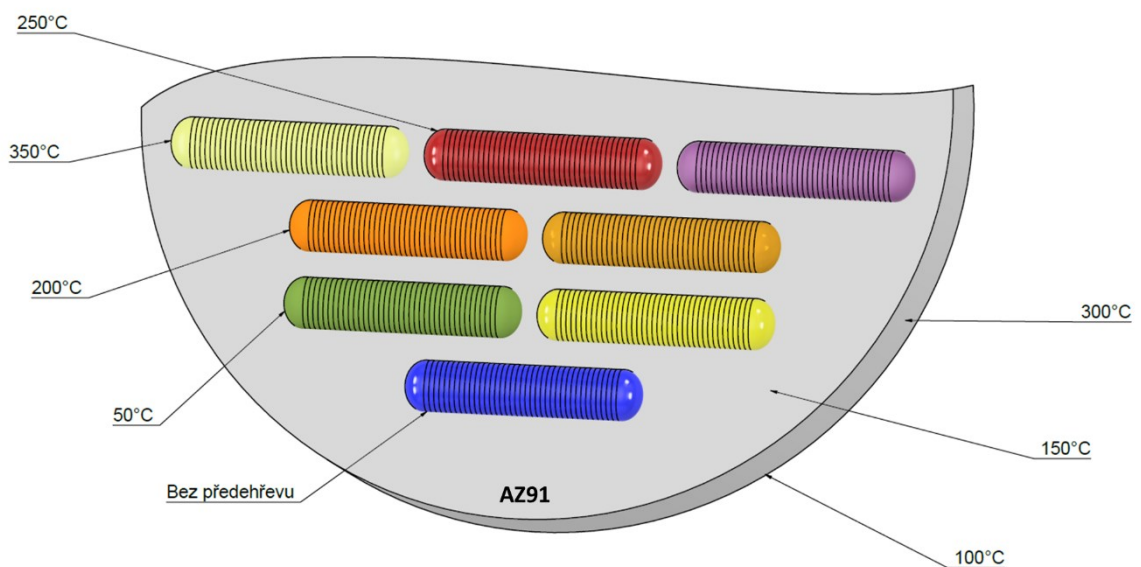
#### Vzorky pro testování vlivu na změnu geometrie návaru [VO 1]

Na základě první výzkumné otázky byly navrženy vzorky pro pozorování změn geometrie návaru. Konkrétně byla na vzorcích pozorována šířka návaru, výška návaru, kontaktní úhel, hloubka průvaru a také plochy průřezu nad a pod úrovní plochy základního materiálu (obr. 6).



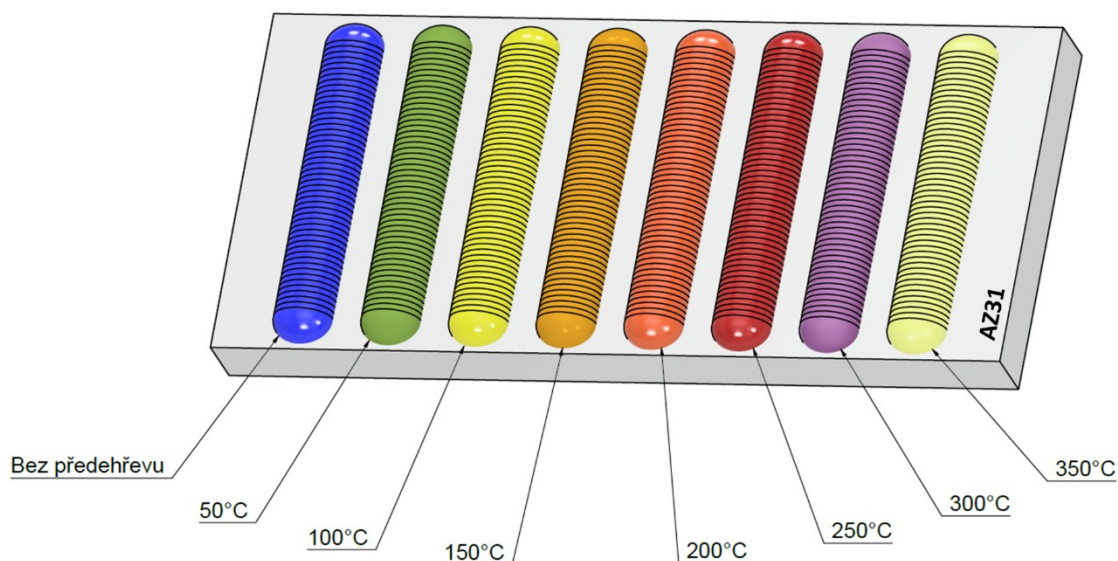
Obr. 6-3 Měřitelné parametry návaru

Vzorky byly vytvářeny ve formě jednoduchého návaru tzv. “single-tracků“ dlouhých 50 mm. Z důvodu omezené nabídky polotovarů z hořčkových slitin nebylo možné navařovat na základní materiál ze shodné slitiny, jako byla slitina svařovacího drátu, tedy ze slitiny AZ61. Proto byly použity dva různé polotovary z obdobných slitin. Díky tomu bylo možné porovnat jednotlivé sady mezi sebou a ověřit jejich kompatibilitu a zaměnitelnost. Celkem byly vyrobeny tři sady single-track vzorků. První sada byla navařena na základní materiál kruhového tvaru s průměrem 160 mm a tloušťkou 40 mm ze slitiny AZ91. Sada vzorků obsahovala vzorky s osmi teplotami předehřevů (včetně referenční – bez předehřevu).



Obr. 6-4 Sada vzorků č. 1 pro ověření vlivu na geometrii návaru

Druhá a třetí sada byla vyrobena na desku o rozměrech 140x60x10 mm ze slitiny AZ31. Na obě sady bylo vytvořeno opět osm vzorků s různými teplotami předehřevu. Tyto dvě sady byly dále určeny pro měření všech parametrů včetně výbrusů pro měření průvaru a průřezových ploch.



Obr. 6-5 Vzorky pro ověření vlivu předehřevu na geometrii návaru (2. a 3. sada)

Druhá a třetí sada vzorků od sebe lišily parametry navařování. Druhá sada vycházela z výchozí parametrů, které stanovil Šváb (2023) ve své diplomové práci [13]. V této práci navařoval s přidavným drátem ze slitin AZ61 na základní materiál ze slitiny AZ91. Třetí sada byla vyrobena s parametry, které měly zaručit větší průvar do základního materiálu oproti výchozím parametrům, které nevytvářely dostatečný průvar na základním materiálu AZ31. (Tab. 6-2).

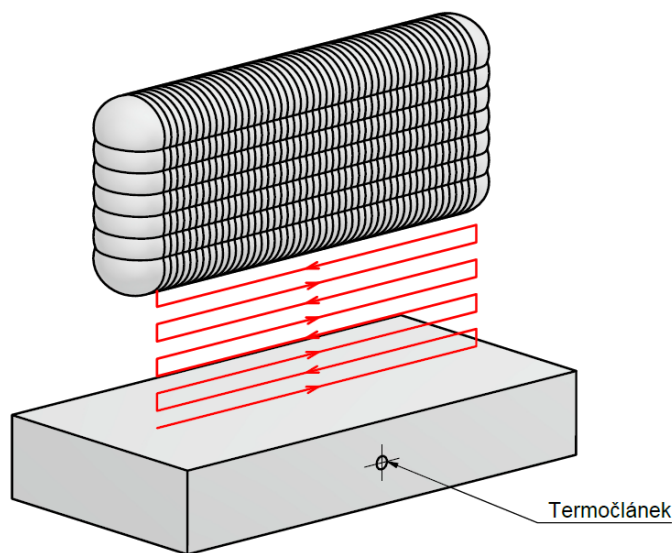
Tab. 6-2 Nastavení svařovacího zdroje

Parametry	Sada	I_boost	t_I_boost
Výchozí	1, 2, 3	430 A	2,5 ms
Vyšší průvar	4	400 A	3,5 ms

Vzorky pro testování změny geometrie návaru byly po ukončení výroby očištěny drátěným kartáčem od nečistot, které vznikly při výrobě. Dále byly nastříkány zmatňujícím křídovým sprejem a poté byly skenovány na zařízení ATOS. Výstupem skenování byla trojúhelníková STL síť, která byla importována do softwaru GOM Inspect. Zde byly měřeny vnější parametry, jako je výška, šířka a kontaktní úhel návaru. Druhá sada a třetí sada vzorků byly dále rozřezány tak, aby každý návar bylo možné změřit na začátku, uprostřed a na konci návaru. Jednotlivé průřezy byly dále zality do pryskyřice pro snadné broušení a leštění. Výsledné výbrusy byly foceny pod mikroskopem. Fotografie byly dále importovány do softwaru ImageJ, kde byly vyhodnoceny parametry, jako je hloubka průvaru, velikost plochy průřezu návaru a velikost plochy průvaru.

#### Vzorky pro testování změny šířky vrstev tenkostěnných dílů [VO 2]

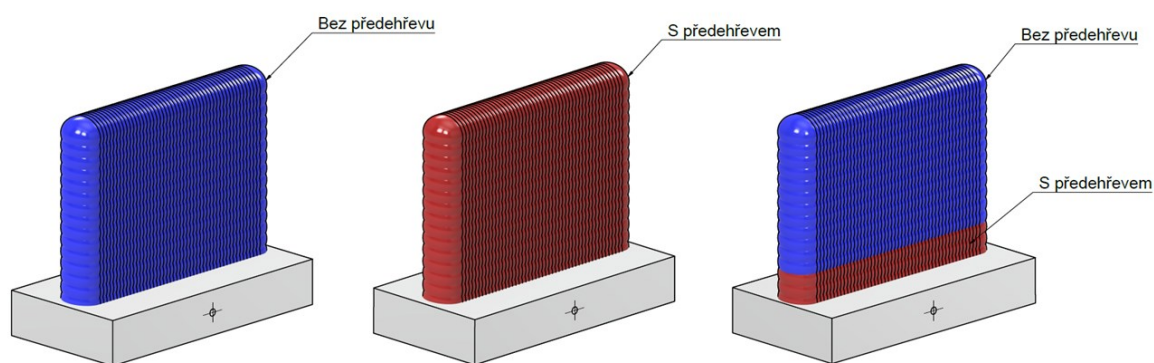
Pro optimální nastavení hodnot předehřevu byly vyrobeny první zkušební vzorky pro určení rozdílu mezi šířkou prvních vrstev, které byly popsány v kapitole 2.3.2. Byly tedy vyrobeny dvě stěny pro obě nastavení svařovacích parametrů, které byly použity i u single-track vzorků. Vzorek tenké stěny se skládal z 15 vrstev jednotlivých návarů dlouhých 50 mm. Výška vrstvy byla nastavena na 2,6 mm a směr navařování každé vrstvy se střídal tak, aby se vykompenzovaly rozdílné výšky začátků a konců každého návaru (Obr. 6-6). Teplota základního materiálu byla kontrolována termočlánkem, který byl umístěný 5 mm pod povrchem základního materiálu. Teplota interpass byla na základě výsledků single-track vzorků určena na 50 °C a byla kontrolována pomocí termokamery.



Obr. 6-6 Podoba a strategie výroby tenkostěnného vzorku

Na základě prvních zkušebních vzorků dvou referenčních stěn a také výsledků single-track návarů byla vyhodnocena teplota předehřevu, při které měl návar takovou šířku, jakou měly i zbývající vrstvy z první sady tenkostěnných vzorků. Protože vzorek s nastavením svářečky, které mělo zajistit větší průvar, dosahoval šířky vyšší, než je možné dosáhnout předehřevem. Dále bylo používáno pouze nastavení s výchozími parametry.

Celkem byly v druhé sadě vyrobeny tři tenkostěnné vzorky s rozměry stejnými jako vzorky z první zkušební sady. Jednalo se o jeden referenční vzorek bez předehřevu a s teplotou interpass 50 °C. Poté se jednalo o vzorek se zvolenou teplotou předehřevu, která se rovnala i teplotě interpass. Jako třetí byl vyroben vzorek se strategií vyrobít první vrstvy, které měly menší šířku než ostatní vrstvy s předehřevem na zvolenou teplotu a poté nechat vzorek zchladit na teplotu interpass 50 °C a pokračovat se sníženou teplotou předehřevu (Obr. 6-7).



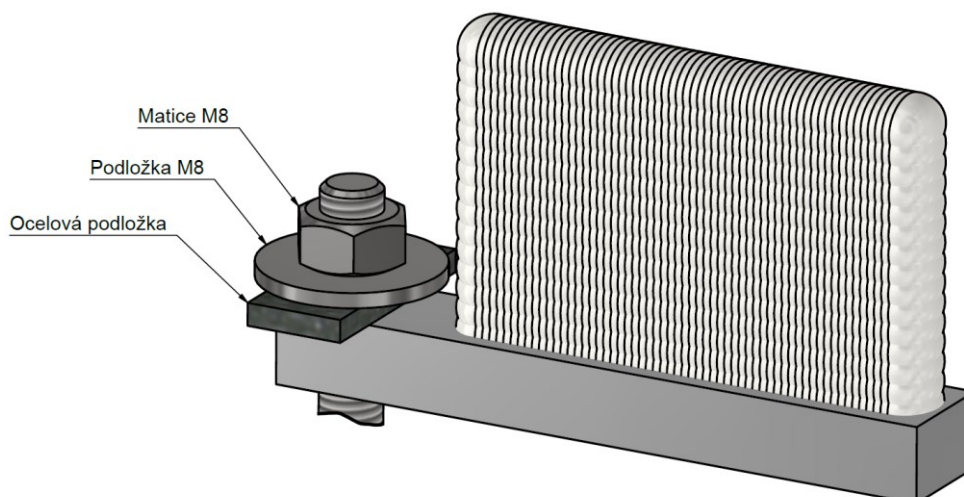
Obr. 6-7 Vzorky Pro testování změny šířky vrstev

Zkušební vzorky i vzorky z druhé sady byly před měřením očištěny drátěným kartáčem a následně zmatněny pomocí křídového spreje. Následně poté byly měřeny pomocí 3D skeneru ATOS a vyhodnocovány v softwaru GOM Inspect.

### Vzorky pro testování zbytkového napětí [VO 3]

Zbytková napětí se nejčastěji projevují deformacemi, které snižují kvalitu výsledného dílu. Na základě poznatků z kapitoly 2.3.3, že díly vyrobené technologií WAAM na tenkém základním materiálu jsou namáhány a deformovány ohybem, byly navrženy následující podoby vzorků.

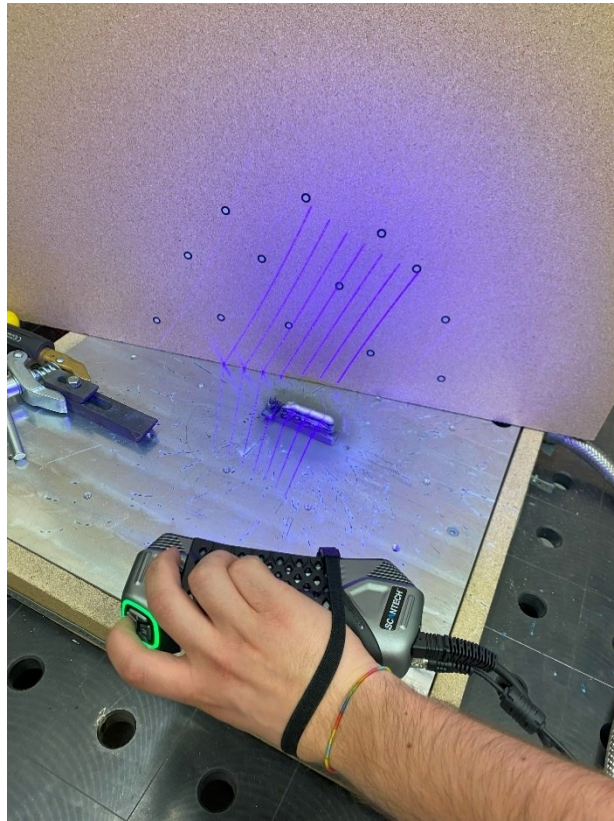
Jedná se o tenkostěnné vzorky stejného typu jako vzorky vyráběny v předchozí kapitole s délkou stěny 60 mm, které se skládaly z 10 vrstev materiálu o výšce vrstvy 2,6 mm. Rozdílem oproti předchozím tenkostěnným vzorkům jsou rozměry základního materiálu a způsob jeho upnutí. Zatímco předchozí vzorky byly upínány na dvou protějších hranách pomocí upínek. Vzorky pro testování velikosti zbytkového napětí byly upnuty pomocí šroubu M8 na jedné straně. Pro co nejrovnoměrnější přitlak od matice byla pod obyčejnou podložku M8 umístěna podložka z konstrukční oceli o rozměrech 30x13x3mm. Celé upnutí bylo zajištěno maticí M8. Rozměry základního materiálu byly minimalizovány na 90x15x10 mm. Minimální rozměry zajišťovaly minimální kvadratický moment, a tedy umožnily větší deformace vlivem zbytkového napětí (Obr. 6-8).



Obr. 6-8 Vzorek pro testování zbytkového napětí a způsob upnutí

Celkem bylo vyrobeno šest vzorků pro stejný počet různých teplot předehřevu. Konkrétně se jednalo o teploty 50 °C, 100 °C, 150 °C, 200 °C, 250 °C a 300 °C. Teploty interpass se rovnaly teplotě předehřevu.

Projevy zbytkové napětí bylo měřeno na výše popsaných tenkostěnných vzorcích. Měření probíhalo přímo na pracovišti pomocí ručního 3D skeneru (Obr. 6-9). Jako první byl naskenován samotný základní materiál upnutý na vyhřívané desce. Po ukončení výroby a po zchladnutí na teplotu předehřevu byl vzorek naskenován v upnuté pozici na desce. Při vyhodnocování byly porovnávány změřené tvary základního materiálu před výrobou se zdeformovanými tvary po výrobě.



Obr. 6-9 Ruční 3D skenování vzorků na pracovišti

Velikost deformace byla vyhodnocována jako porovnání 3D dat získaných před výrobou s daty, které byly získány po výrobě. Porovnávání bylo prováděno v softwaru GOM Inspect.



## 7 VÝSLEDKY

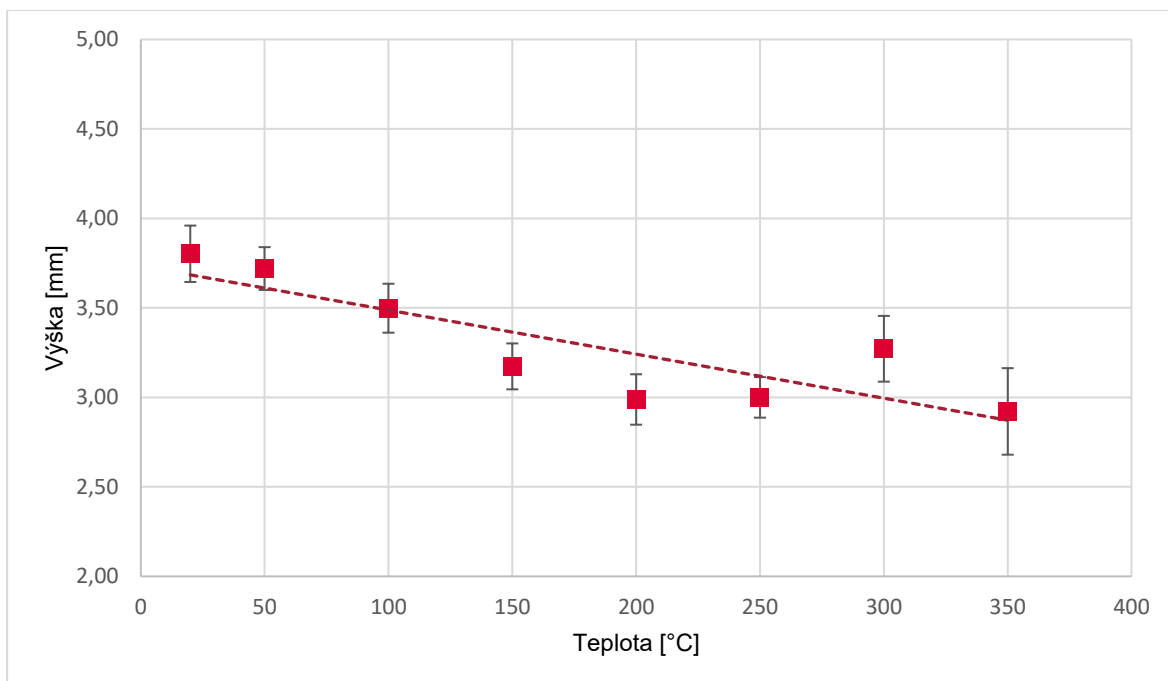
V této kapitole budou popsány výsledky, které byly získány z měření a vyhodnocování jednotlivých druhů vzorků, jak bylo popsáno v kapitole 6.4.1.

### 7.1 Vliv přehřevu na geometrii návaru (VO 1)

Prvním zkoumaným druhem vzorků byly vzorky pro testování vlivu přehřevu na geometrii návaru. Postupně byly vyhodnocovány parametry jako výška a šířka návaru, poté hloubka průvaru, kontaktní uhel návaru a následně také plochy průřezu návarem. U každého parametru bylo vyhodnoceno měření na jednotlivých sadách a poté byly porovnávány sady č.1 a č.2, které se lišily ve slitině základního materiálu, a po nich byly porovnávány sady č.2 a č.3, které se od sebe lišily nastavením svařovacích parametrů na stejné slitině základního materiálu.

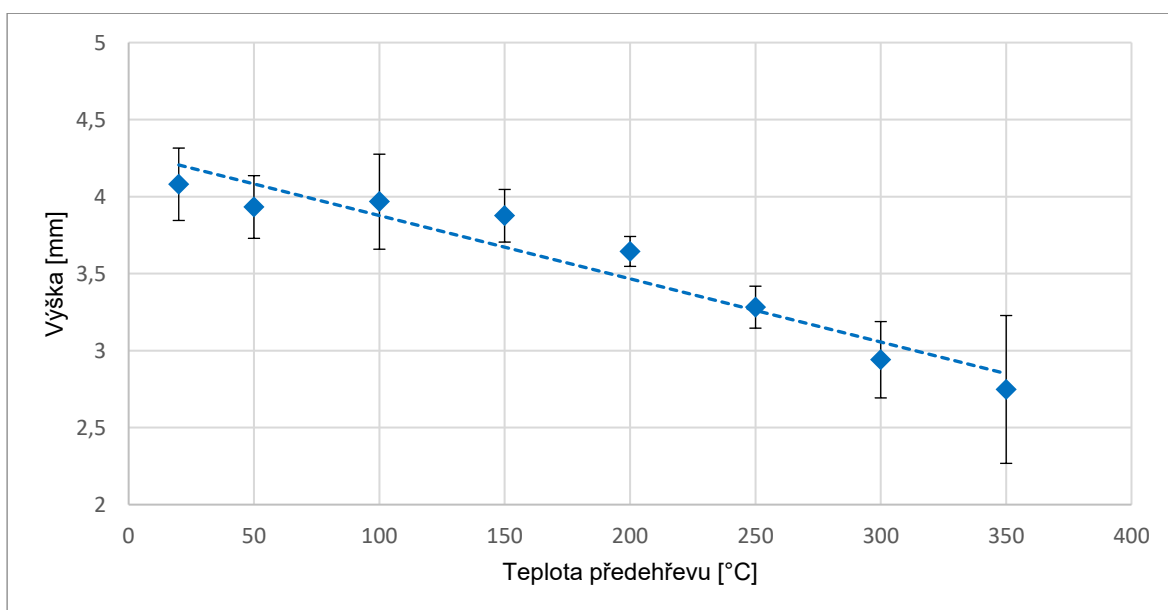
#### 7.1.1 Výška návaru

Při zkoumání průměrné výšky návarů byl pozorován předpokládaný trend snižování výšky návaru s rostoucí teplotou přehřevu, a to u všech vyrobených sad vzorků. Jednotlivé sady vzorků ovšem vykazovaly rozdílné chování v závislosti na zvyšování teploty přehřevu. Sada č. 1 vykazovala lineární klesání průměrné výšky návaru až do teploty 200 °C. Od této teploty se dále chovala nestabilně při 300 °C. Celkem došlo ke snížení výšky návaru z původních 3,8mm při výrobě bez přehřevu na konečných 2,92 mm při přehřevu na 350 °C. Chybové úsečky na Obr. 7-1 zobrazují směrodatnou odchylku výšky návaru a vyjadřují tak stabilitu parametru výšky. Lze pozorovat přibližně konstantní velikost odchylky až do 250 °C, kde je zároveň odchylka nejnižší o 0,113 mm. Od tohoto bodu se stabilita výšky zhoršovala a narůstala až na 0,242 mm v případě přehřevu na 350 °C.



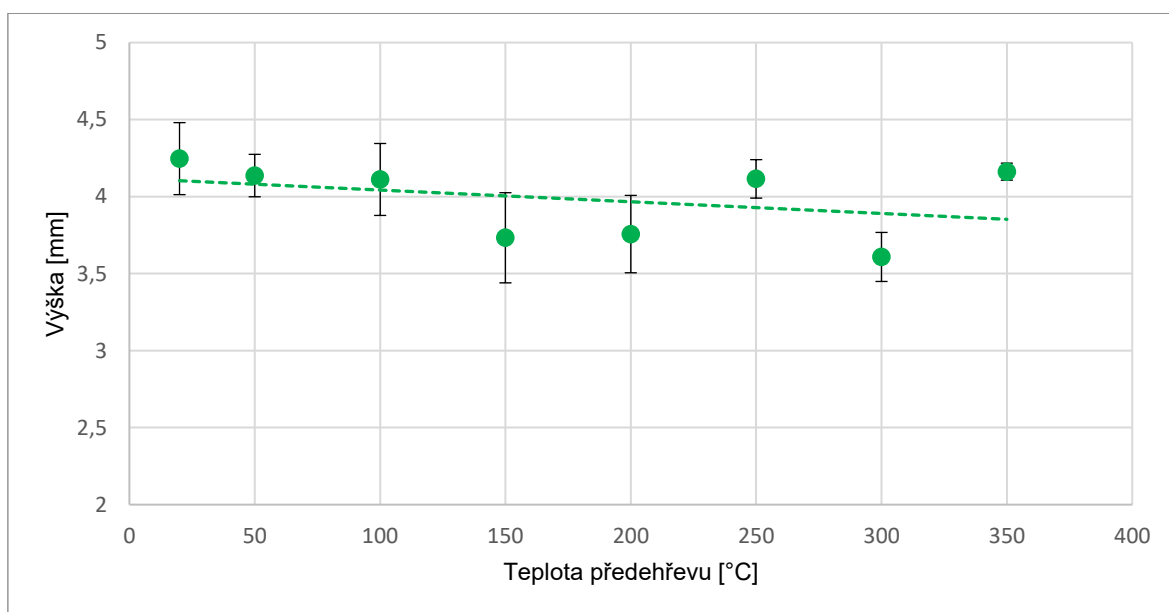
Obr. 7-1 Průměrná výška návaru v závislosti na teplotě předehřevu (sada č. 1)

Sada č. 2 vykazovala největší pokles parametru výšky návaru. Vzorky postupně snižovaly výšku s rostoucí teplotou předehřevu, a to z referenčních 4,08 mm u vzorku bez předehřevu došlo k poklesu na 2,75 mm pro vzorek vyrobený při 350 °C. Odchylka výšky jednotlivých návarů postupně klesala z 0,235 mm pro vzorek bez předehřevu až na odchylku 0,097 mm, která byla naměřena u vzorku vyrobeného při předehřevu na 200 °C. Od tohoto bodu pak odchylka výrazně rostla až na konečných 0,48 mm při maximální zkoumané teplotě 350 °C.



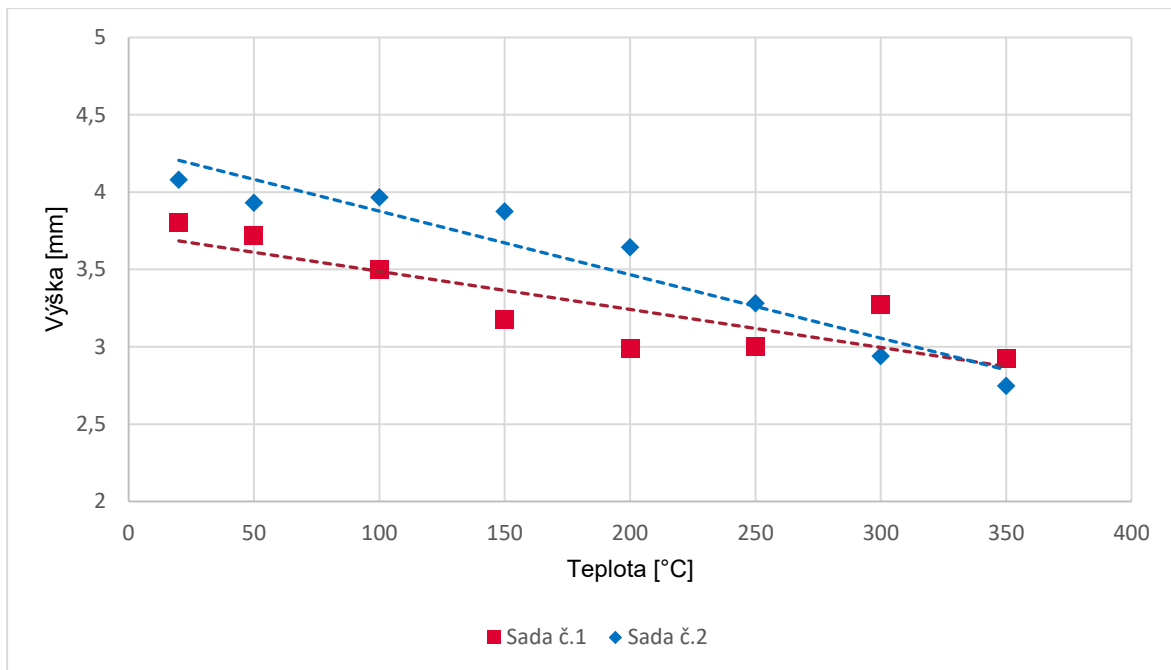
Obr. 7-2 Průměrná výška návaru v závislosti na teplotě předehřevu (sada č. 2)

Výsledky z poslední zkoumané sady č. 3 ukázaly nejmenší pokles výšky návaru ve srovnání s předchozími vzorky (Obr. 7-3). Klesající trend byl jen velmi mírný, avšak viditelný. Na referenčním vzorku bez předehřevu byla naměřena výška návaru 4,25 mm a výška návaru klesala do 200 °C. Zároveň bylo možné v tomto rozmezí pozorovat poměrně velkou nestabilitu výšky. Od 250 °C do 350 °C byla výška jednotlivých vzorků výrazně stabilnější. Nicméně výška návaru se vymykala celkovému klesajícímu trendu a chovala se nepredikovatelně.



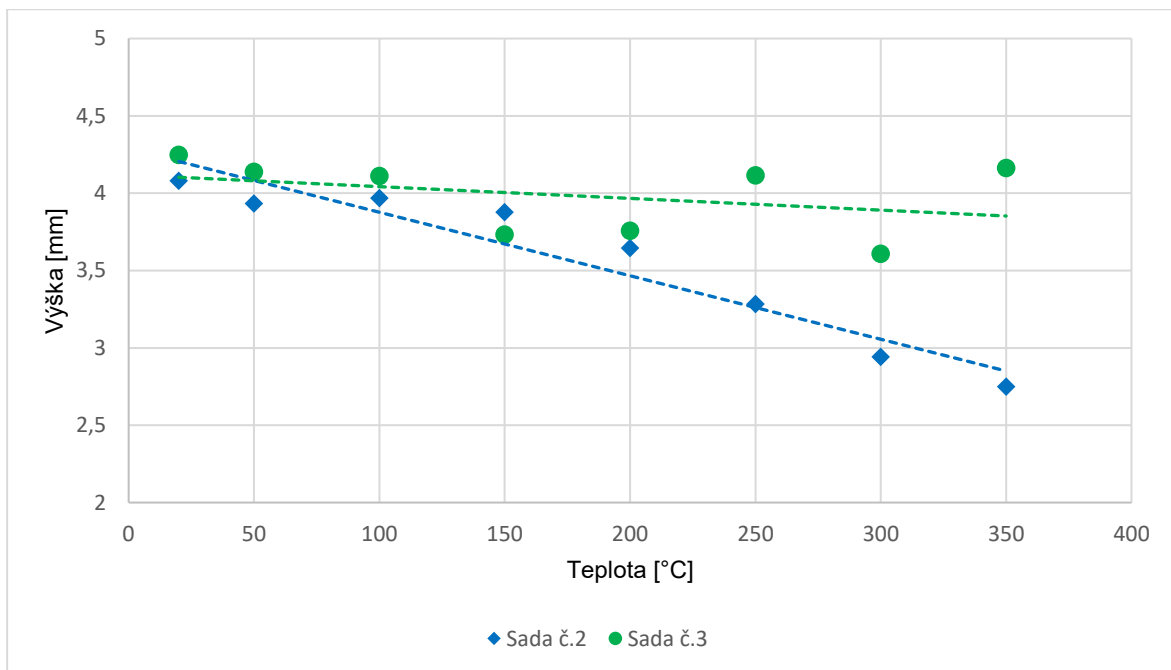
Obr. 7-3 Průměrná výška návaru v závislosti na teplotě předehřevu (sada č. 3)

Při porovnání sady č. 1 a sady č. 2 bylo možné pozorovat rozdíly při navařování na základní desku z různého materiálu při zachování stejného výchozího nastavení svařovacích parametrů. Sada č. 1, která byla z hořčikové slitiny AZ91, vytvářela při pokojové teplotě vyšší návary než návary vyráběné na základní materiál ze slitiny AZ31. Rozdíl mezi oběma sadami se ale s rostoucí teplotou základního materiálu zmenšoval. Při uvažování směrodatných odchylek, které jsou zobrazeny na Obr. 7-1 a Obr. 7-2, je možné vyvodit závěr, že rozdíl ve výškách návaru je pozorovatelný do teploty předehřevu na 200 °C.



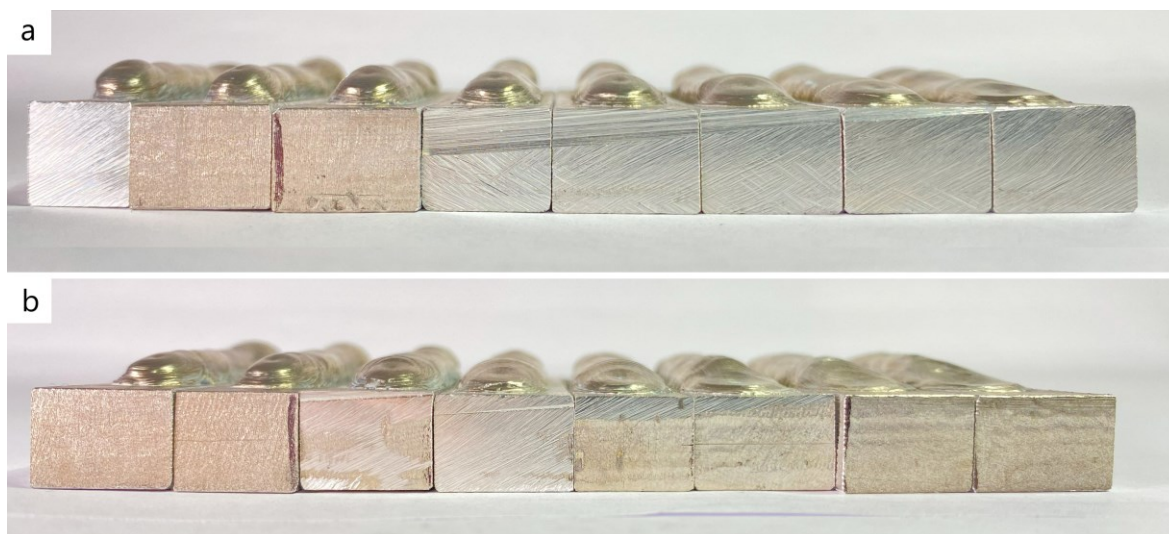
Obr. 7-4 Porovnání sady č.1 (AZ91) a sady č. 2 (AZ31)

Opačný trend byl pak pozorován při porovnání sady č. 2 a sady č. 3, kde obě sady byly navařovány na stejný základní materiál, ale s rozdílnými parametry nastavení svařovacího zdroje (Obr. 7-5). Rozdíl mezi výškami vzorků sady č. 2 a sady č. 3 bylo možné zanedbat do teploty 150 °C až do 200 °C. Poté se výsledky začaly výrazně rozcházet a vliv změny svařovacích parametrů se projevil zvětšujícím se rozdílem, mezi naměřenými výškami u obou sad vzorků.



Obr. 7-5 Porovnání a sady č. 2 (výchozí nastavení) a sady č. 3 (nastavení hlubšího průvaru)

Ačkoliv byl pozorován pokles výšky návaru v řádu desetin až jednotek milimetrů, na výsledné geometrii návaru je možné pozorovat dramatický rozdíl. Vliv předehřevu a teploty základního materiálu na výšku návaru je tedy poměrně významný.

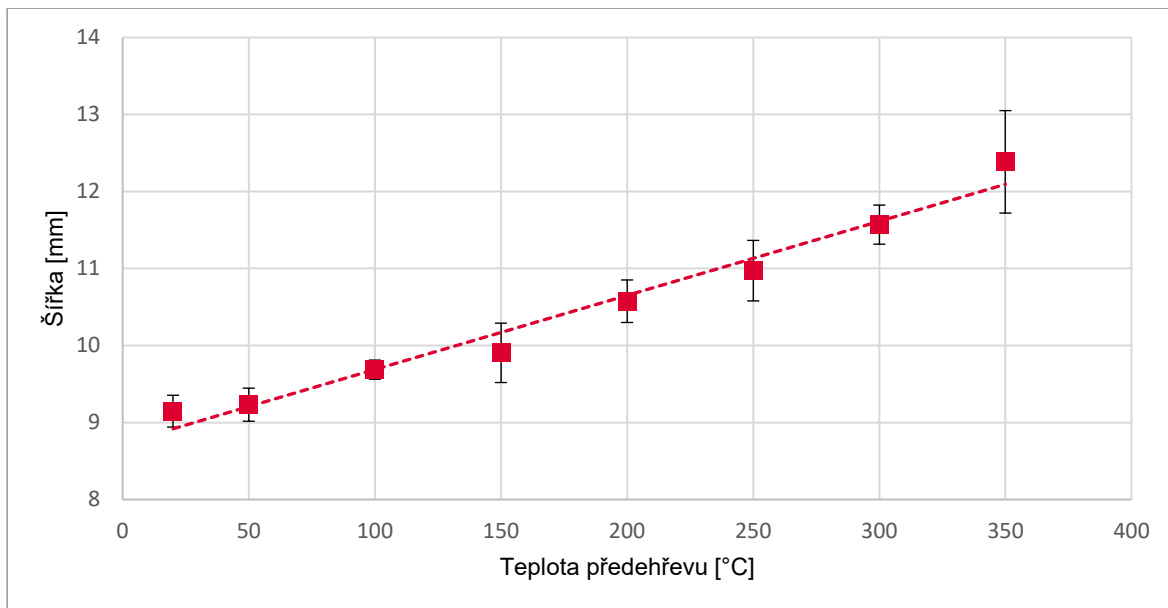


Obr. 7-6 Sada vzorků č. 2 (a), sada vzorků č. 3 (b) seřazeny vzestupně dle teploty předehřevu (zleva)

### 7.1.2 Šířka návaru

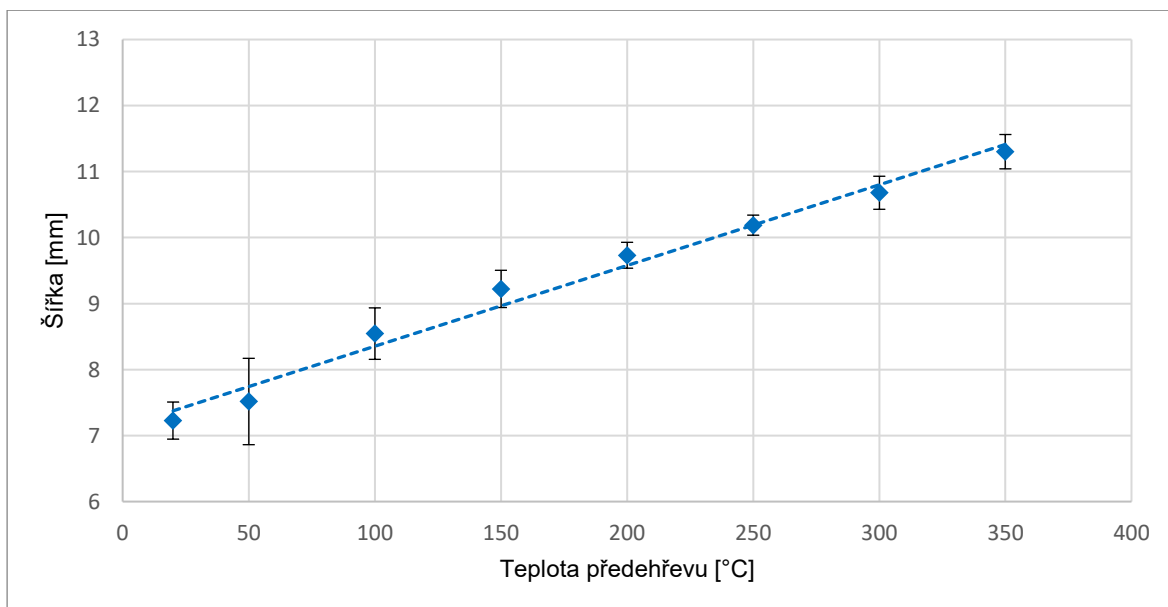
Výraznější změny vlivem předehřevu byly pozorovány u parametru šířky, který se u všech sad vzorků měnil v řádu milimetrů. Obecně byl pozorován rostoucí trend parametru šířky se zvyšující se teplotou předehřevu, a to s přibližně stejnou rychlostí růstu ve všech testovaných konfiguracích. Sada č. 1 vykazovala nárůst průměrné šířky z 9,15 mm na 12,39 mm (Obr. 7-7). Při bližším pohledu na výsledky byl pozorován téměř neznamenný rozdíl mezi případem bez předehřevu a předehřevem na 50 °C, kde rozdíl mezi průměrnými šířkami byl pouze 0,08 mm. Oba vzorky se navíc shodovaly i ve směrodatné odchylce, resp. ve stabilitě zhruba okolo 0,21mm. Výraznější nárůsty šířky poté nabývaly od teploty předehřevu na 100 °C a rostly lineárně.

Směrodatná odchylka s rostoucí teplotou předehřevu také rostla. Důvodem byla změna šířky návaru po jeho délce, která nejvíce ovlivnila odchylku šířky u maximální teploty předehřevu na 350 °C a nabyla hodnoty 0,665 mm. Pro teploty od 150 °C do 250 °C se odchylka pohybovala v rozmezí od 0,276 mm do 0,393 mm.



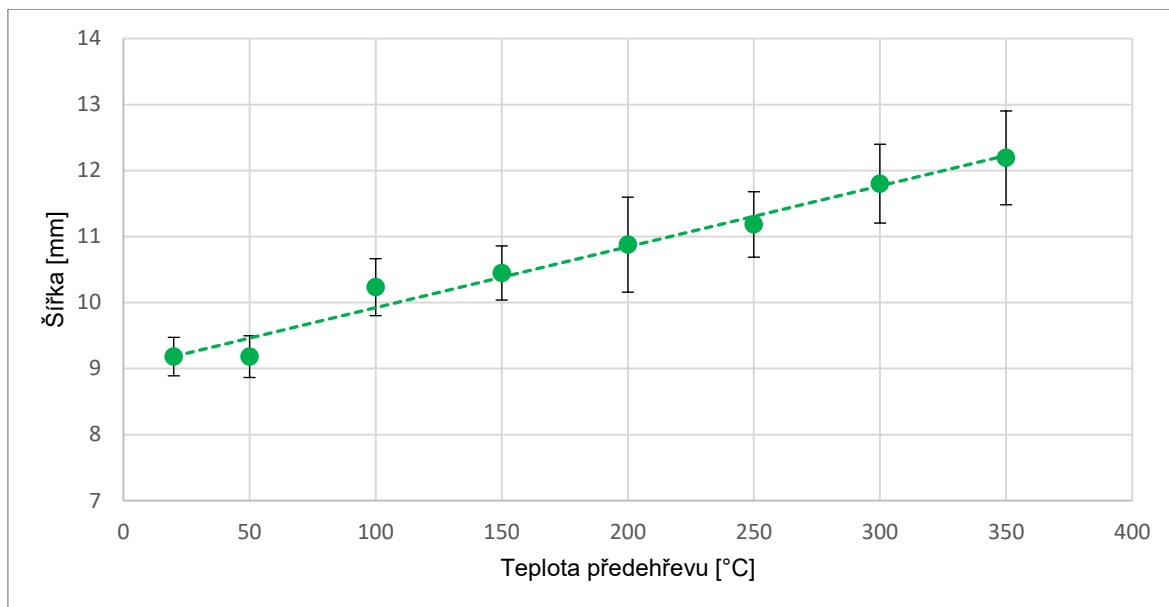
Obr. 7-7 Průměrná šířka návaru v závislosti na teplotě předehřevu (sada č. 1)

Výsledky měření průměrné šířky u sady č. 2 prokázaly stejné chování lineárního růstu šířky jako sada č. 1, konkrétně od 7,23 mm po 11,3 mm (Obr. 7-8). Oproti předchozí sadě nebylo pozorováno stagnující chování mezi nepředehřátým vzorkem a vzorkem předehřátým na 50 °C. Rozdílné bylo také chování odchylek, kdy největší odchylka byla neměřena na vzorku pro 50 °C, a to 0,654. Navíc velikost odchylky postupně klesala a ustálila se při teplotě 200 °C a dále se pohybovala v rozmezí 0,152 mm až do 0,260 mm.



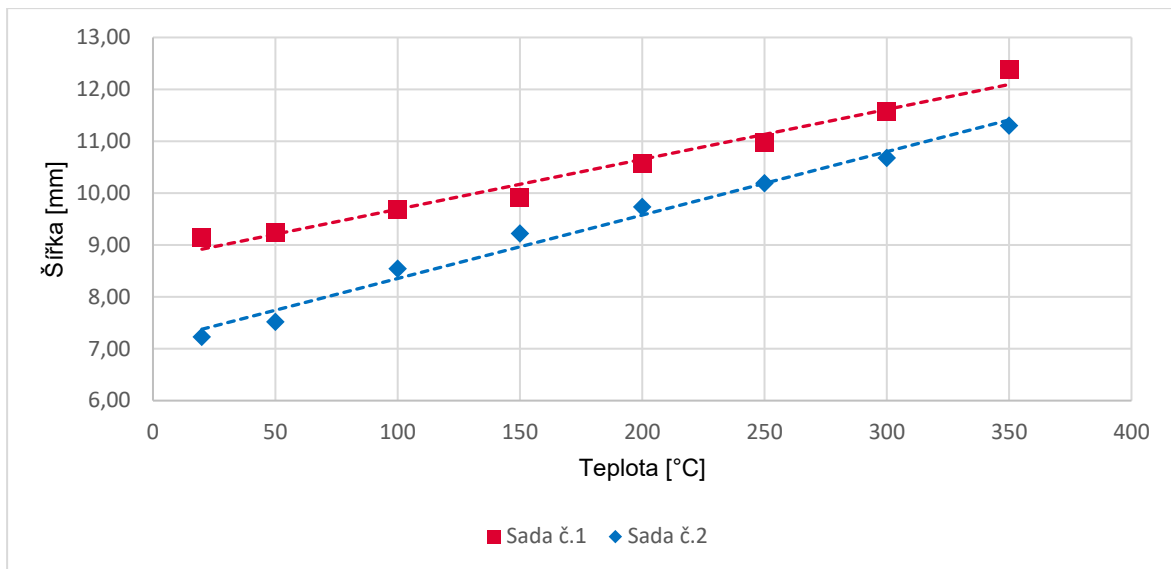
Obr. 7-8 Průměrná šířka návaru v závislosti na teplotě předehřevu (sada č. 2)

Sada č. 3 se nejvíce odlišila od předchozích dvou sad svou vysokou nestabilitou šířek návarů. Stejně jako u sady č. 1 bylo možné pozorovat nárůst odchylky šířky s rostoucí teplotou. Nejvýraznější byly odchylky u vzorků předehřátých na 200 °C až do 350 °C, které se pohybovaly v rozmezí 0,597 mm až 0,720 mm. Šířka samotná vykázala opět stejný lineární růst od 9,18 mm až po 12,192 mm (Obr. 7-9).



Obr. 7-9 Průměrná šířka návaru v závislosti na teplotě předehřevu (sada č. 4)

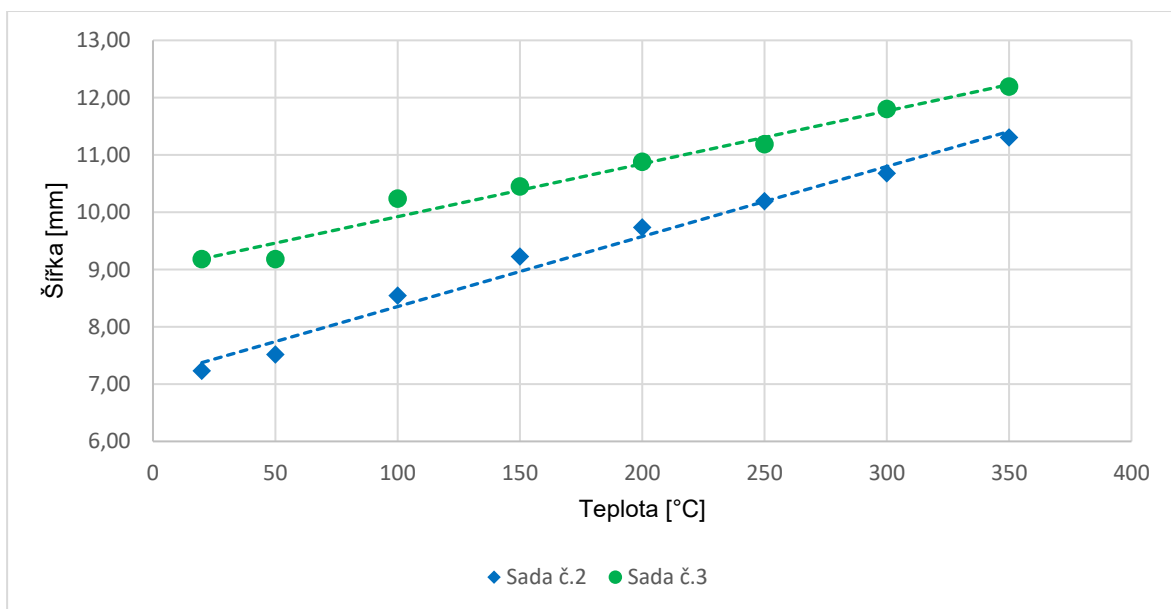
V porovnání vzorků se stejnými parametry svařování ale s rozdílnou slitinou desky základního materiálu byl naměřen průměrný rozdíl mezi šířkami návarů se shodnou teplotou předehřevu 1,13 mm. Po proložení naměřených dat lineární charakteristikou byl pozorován pouze mírně rychlejší trend růstu šířky návaru u sady vzorků č. 2 než u sady č. 1. Lze ovšem předpokládat, že rozdíl rychlosti růstu byl ovlivněn omezenou velikostí naměřených dat. Rychlost růstu může být tedy vnímána jako shodná u obou sad vzorků a složení použité slitiny základního materiálu nemá na rychlost růstu šířky návaru vliv na rozdíl od šířky samotné.



Obr. 7-10 Porovnání šířek návaru u sady č. 1 a sady č. 2

Téměř identický případ byl pozorován při porovnání sady č. 2 a sady č. 3. Oproti sadě č. 2, která byla vyrobena s výchozím nastavením svařovacích parametrů zdroje, byly vzorky ze sady č. 3 vyrobené s nastavením pro hlubší průvar, širší průměrně o 1,34 mm. Důvodem byl delší čas hoření oblouku mezi přídavným drátem a základním materiálem. Vlivem toho docházelo ke vzniku větší kapky roztaveného kovu, který byl dále přenesen do roztavené lázně.

Rychlost trendu zvětšování šířky návaru u sady č. 2 byl vlivem předehřevu mírně rychlejší než u sady č. 3. Nicméně opět byl rozdíl natolik minimální, že ho lze zanedbat a uvažovat shodnou rychlost růstu parametru šířky návaru (Obr. 7-11).



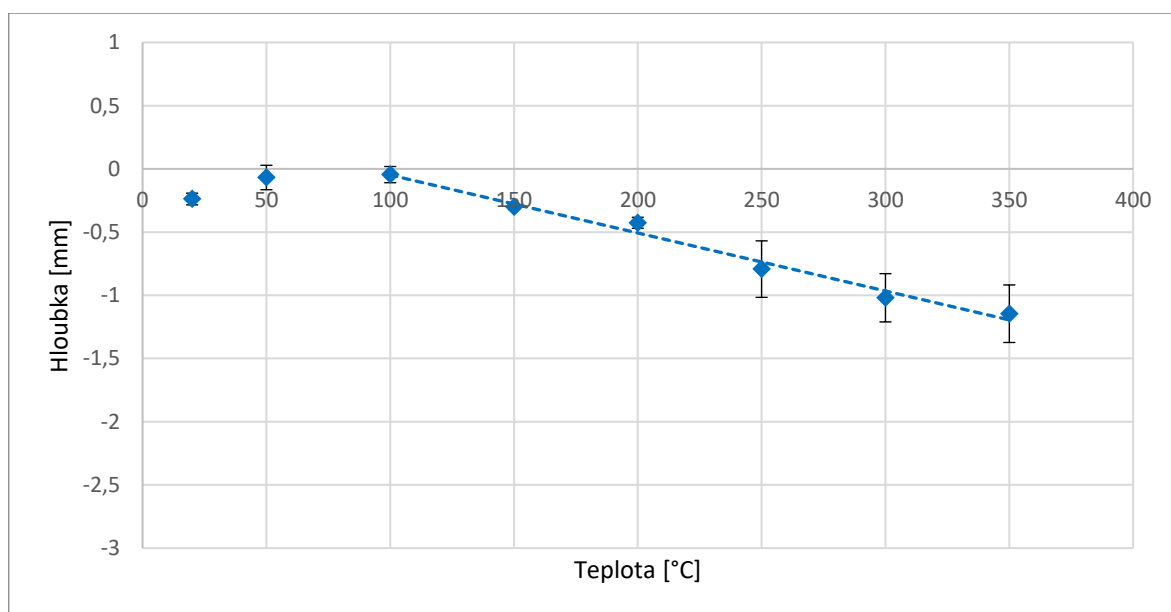
Obr. 7-11 Porovnání šířek návaru u sady č. 2 a sady č.3



### 7.1.3 Hloubka průvaru

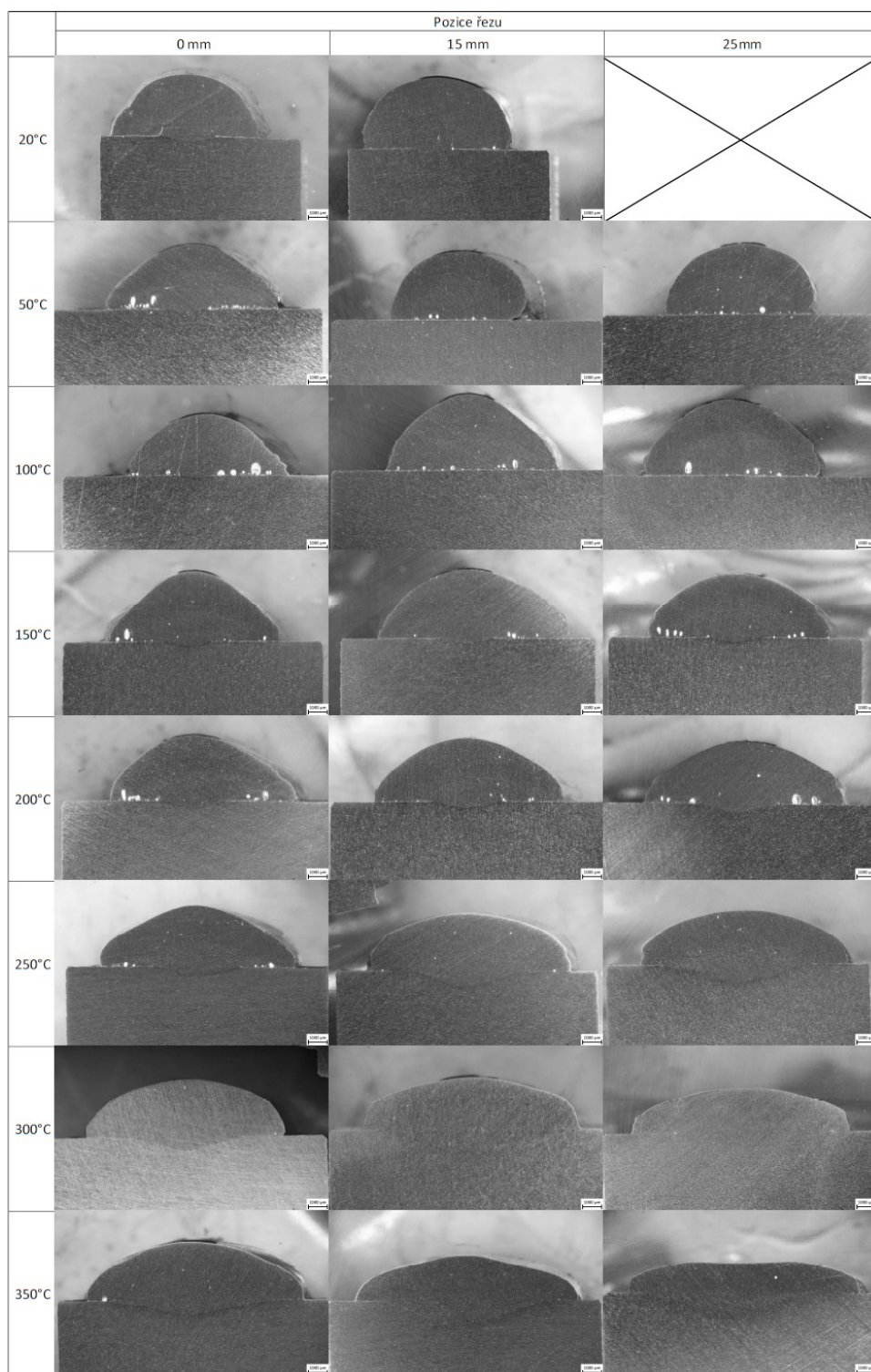
Hloubka provaření návarů byla měřena z výbrusů pomocí mikroskopu. Každý návar byl měřen ve třech místech v pozici 0 mm (začátek návaru), pozici 15 mm (střed návaru) a v pozici 25 mm (konec návaru). První byla vyhodnocována sada č. 2. s výchozím nastavením svařovacích parametrů. Na obr. 7-12 je možné pozorovat, že s tímto nastavením bylo obtížné docílit souvislého provaření u vzorků bez předehřevu a dále také s předehřátím na 50 °C a na 100 °C. Ve všech zkoumaných průřezích byl průvar vyhodnocen jako nulový. V případě vzorku bez předehřevu na pozici 25 mm nebylo možné průřez vyhodnotit, protože došlo k samovolnému odpadnutí návaru od desky základního materiálu. Zbylé vzorky pravděpodobně dosáhly soudržnosti se základním materiálem díky lokálním průvarům s hloubkou v řádu desetin milimetru. Ty je možné pozorovat na pozicích 0 mm nebo 15 mm u vzorku s pokojovou teplotou 20 °C.

Zbylé vzorky předehřívané na teploty od 150 °C dosáhly hloubky průvaru v řádu jednotek milimetrů po celé délce. Vlivem předehřevu na vyšší teploty došlo k rychlejšímu lokálnímu překročení teploty tavení materiálu, což způsobilo hlubší průvar než u vzorků s teplotou základního materiálu pod 100°C. Průvar se tedy s rostoucí teplotou předehřevu prohluboval a maximální hloubky průvaru 1,146 mm bylo dosaženo při předehřevu na 350 °C. Navíc bylo možné pozorovat prohlubování průvaru po jeho délce, ke kterému docházelo vlivem postupného ohřevu základního materiálu v průběhu navařování. Tento postupný nárůst byl nejvýraznější u vzorků s předehřevem na 250 °C, 300 °C a 350 °C, kde se směrodatná odchylka pohybovala okolo 0,2 mm.



Obr. 7-12 Průměrná hloubka průvaru v závislosti na teplotě předehřevu (sada č.2)

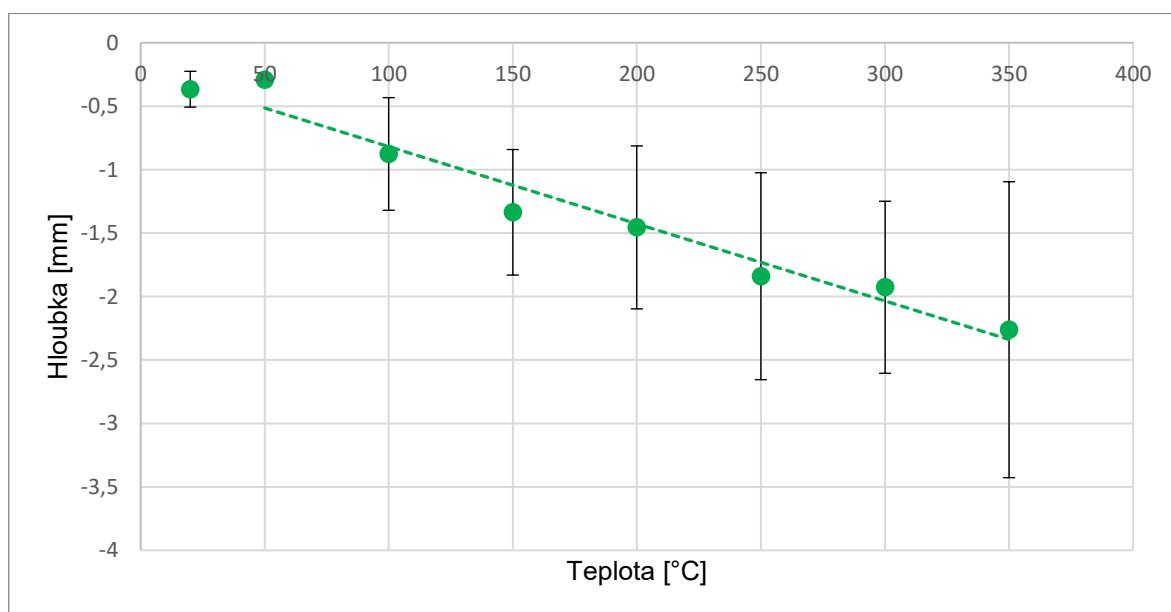
Při analýze snímků výbrusů se navíc ukázalo, že u vzorků, kde průvaru nebylo dosaženo po celé šířce, dochází ke vzniku porozity na rozhraní mezi návarem a základním materiálem. Vzniklé póry u některých vzorků nabývaly velikosti až 0,2 mm. Vznik pórovitosti na rozhraní základního materiálu a návaru může být způsoben nečistotami nebo vrstvičkou koroze na povrchu desky základního materiálu, která vznikla vlivem atmosférické vlhkosti v prostředí laboratoře.



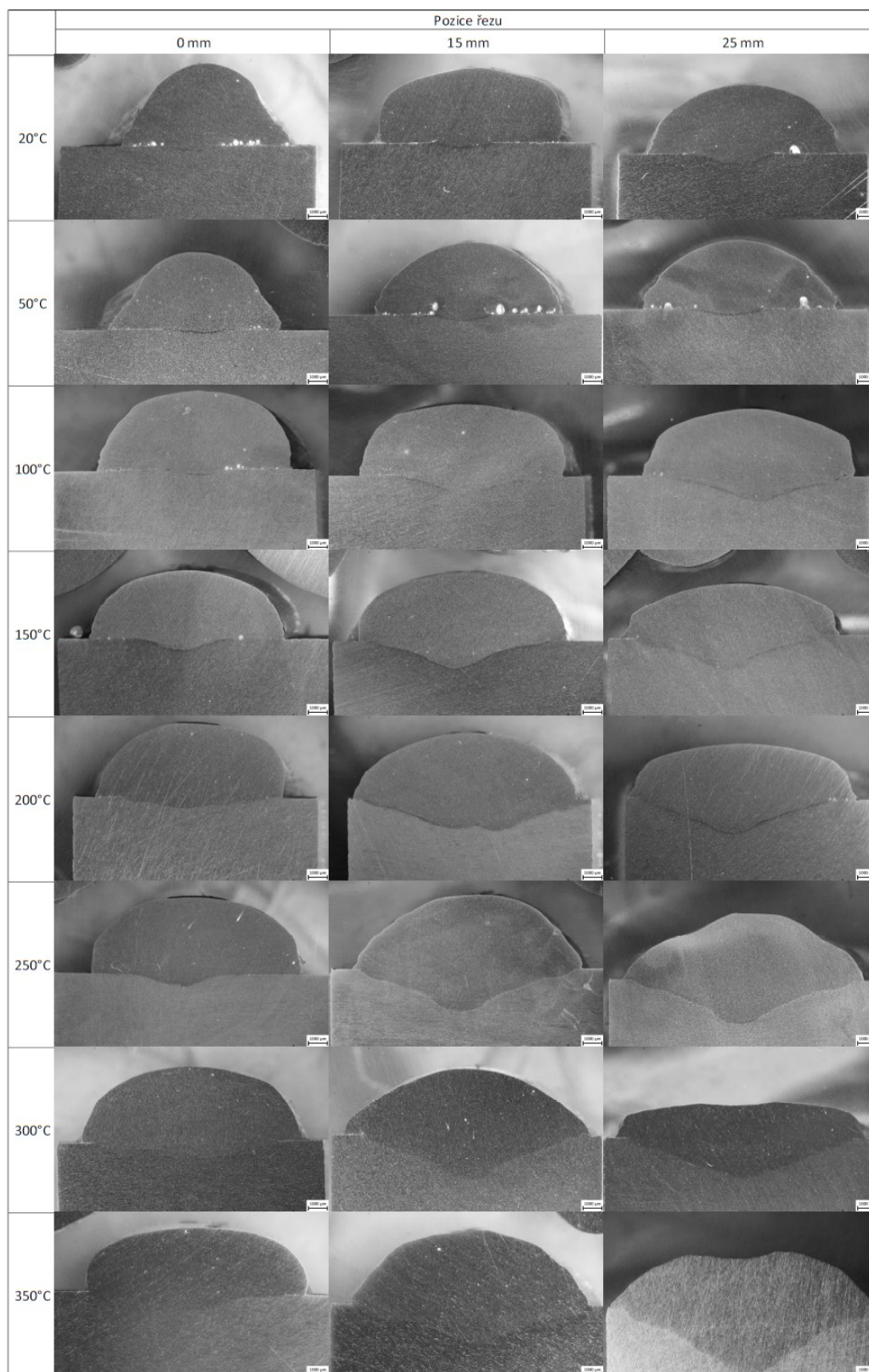
Obr. 7-13 Mapa hloubky průvaru (výchozí nastavení)

Malá hloubka průvaru u sady č. 2 byla řešena změnou nastavení svařovacích parametrů. Sada č. 3 tedy disponovala výrazně hlubším průvarem do základního materiálu. Na Obr. 7-15 je patrné, že došlo k mírnému provaření již u vzorku bez předehřevu, a to do hloubky 0,366 mm z původních 0,236 mm naměřených u vzorku ze sady č. 2. Po délce návaru ovšem došlo k plynulému nárůstu hloubky, která se projevila na směrodatné odchylce 0,141 mm, a lze předpokládat, že provaření bylo v tomto případě po celé délce. Stejně jako u sady č. 2 se vliv předehřátí základního materiálu projevil později. V tomto případě ovšem už při teplotě 100 °C došlo k prudkému nárůstu průvaru až na 0,88 mm. Delší interval hoření oblouku způsobil vnesení většího množství tepla do místa depozice, což způsobilo jednak zmiňovaný celkový nárůst hloubky průvaru, ale také výrazné postupné prohlubování průvaru po délce návaru, a to až od 1,08 mm (směrodatná odchylka 0,444 mm). V intervalu od teploty 50 °C až do 350 °C dále docházelo k lineárnímu nárůstu parametru hloubky průvaru. Maximálního průvaru bylo tedy dosaženo při teplotě 350 °C s hloubkou průvaru 2,261 mm. Směrnice lineárního růstu byla v porovnání se sadou č. 2 výrazně strmější. Obecně docházelo k průměrnému prohlubování průvaru rychlostí 6 $\mu$ m/°C u sady č. 3, zatímco u sady č. 2 pouze 4 $\mu$ m/°C.

S navyšováním teploty předehřevu základního materiálu narůstala také směrodatná odchylka u každého dalšího vzorku, stejně jako bylo pozorováno u sady č. 2. V tomto případě ovšem směrodatné odchylky nabývaly vyšších hodnot, přičemž maximální odchylky 1,166 mm bylo dosaženo analogicky při předehřevu na 350 °C.



Obr. 7-14 Průměrná hloubka průvaru v závislosti na teplotě předehřevu (sada č.3)

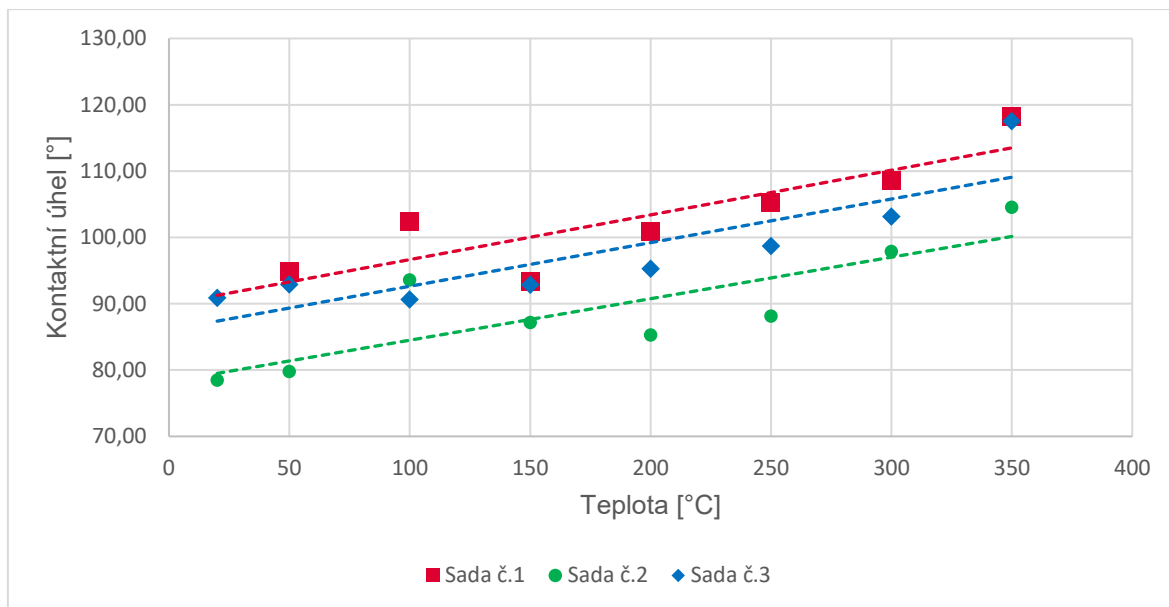


Obr. 7-15 Mapa průvarů (nastavení svařovacích parametrů pro hlubší průvar)

## 7.1.4 Kontaktní úhel

V důsledku postupného zvětšování parametru šířky a výšky návaru docházelo také ke změně kontaktního úhlu návaru. Tento parametr byl měřen z naskenovaných 3D dat. Změnu kontaktního úhlu bylo možné pozorovat i ve výbrusech na Obr. 7-13 a na Obr. 7-15. Lineární nárůst šířky a výšky způsobil u všech sad vzorků lineární růst také kontaktního úhlu. Na Obr. 7-16, který ukazuje naměřená data všech tří sad zkoumaných vzorků proložená lineární funkcí, lze pozorovat totožný trend růstu ve všech zkoumaných případech. Vliv předehřevu na tento parametr tedy prokázal nezávislost na okrajových podmínkách, jako je slitina základního materiálu nebo svařovací parametry.

Okrajové podmínky prokázaly vliv pouze na počáteční hodnotu kontaktního úhlu při pokojové teplotě. Například při porovnání sady č. 1 a sady č. 2 je vidět, že při výchozím nastavení svařovacích parametrů má roztavený materiál lepší smáčivost se základním materiálem z hořčíkové slitiny AZ91, než s materiálem AZ31 kde byl kontaktní úhel při pokojové teplotě změřen okolo 80°. V případě výroby WAAM by ostrý kontaktní úhel mohl působit jako koncentrátor napětí a být náchylnější v těchto místech na vznik makroskopických trhlin. Většího, resp. bezpečného kontaktního úhlu návaru, by bylo možné dosáhnout předehřevem na minimálně 200 °C, případně změnou svařovacích parametrů. Sada č. 3 totiž dosahovala kontaktních úhlů blízkých výsledkům naměřeným na sadě č. 1, která už od referenčního vzorku s teplotou základního materiálu cca 20 °C dosahovala kontaktního úhlu okolo 90°.

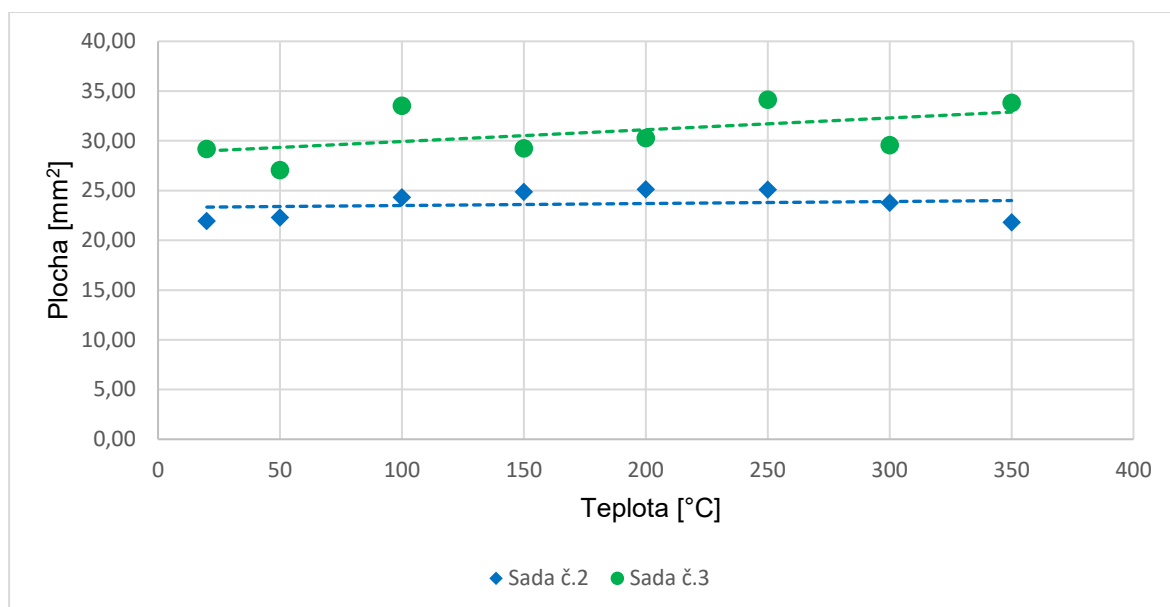


Obr. 7-16 Změna kontaktního úhlu vlivem předehřevu základního materiálu

### 7.1.5 Plocha průřezu

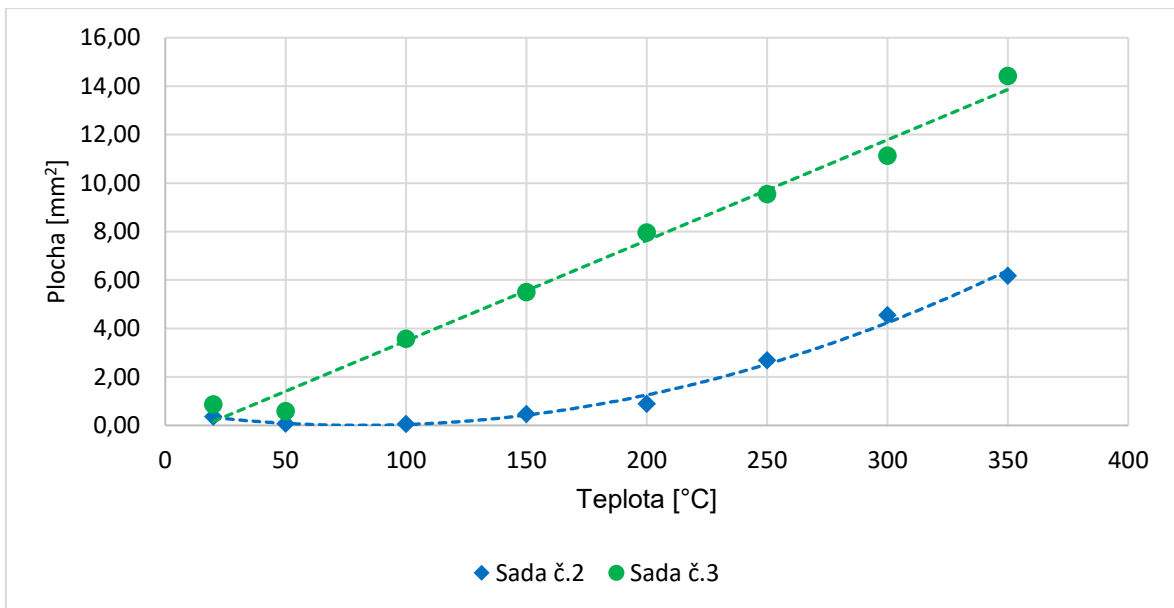
Společně s hloubkou průvaru byly také porovnány plochy návaru, resp. části na návaru, které se nachází nad rovinou destičky základního materiálu, a plocha průvaru nacházející se pod touto rovinou.

V případě sady č. 2 nebyla zjištěna žádná změna plochy průřezu návarem nad úrovní základního materiálu. Depozice materiálu z roztaveného přídavného drátu v průběhu navařování tedy probíhala v konstantním množství. Obdobné chování bylo zjištěno i u sady vzorků č. 3. V tomto případě ovšem docházelo k nepatrnému nárůstu velikosti plochy průřezu. To by mohlo znamenat, že při vnesení většího množství tepla do místa svaru docházelo k rychlejšímu odtavování přídavného drátu, což vyvolalo reakci svařovacího zdroje. Ten za účelem udržení stability hoření oblouku automaticky zvýšil rychlost přísuvu přídavného drátu a navýšil tak množství objemu navařovaného materiálu.



Obr. 7-17 Průměrná plocha návaru v závislosti na teplotě předehřevu

Na druhé straně výsledky měření plochy průvaru ukázaly, že s rostoucí teplotou předehřevu plocha průřezu také roste stejně jako hloubka průvaru. Rozdíl mezi oběma sadami vzorků byl ovšem pozorován v charakteru zvětšování plochy průřezu. Zatímco sada č. 3 lineárně zvětšovala plochu průvaru v intervalu od 50 °C do 350 °C teploty předehřevu, sada č. 2 vykazovala spíše exponenciální růst plochy průřezu průvarem.



Obr. 7-18 Průměrná plocha průvaru v závislosti na teplotě předehřevu

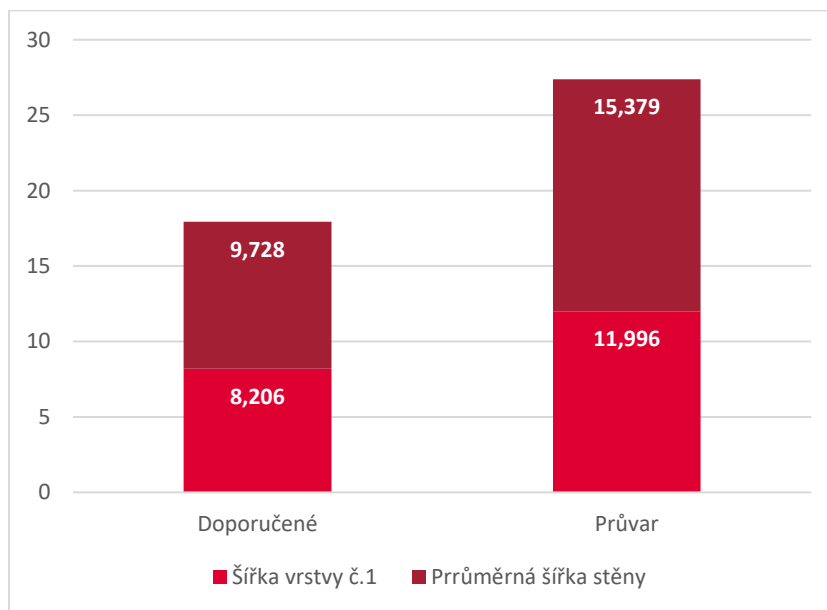
Rozdílnost průběhů si lze vysvětlit změnou tvaru průvaru. V první fázi, kterou je možné vidět na Obr. 7-13 u vzorků s předehřevem na 150°C až do 250°C, nabývá průvar tvaru kruhové úseče, která je definována výškou a délkou tětiny. S prohlubujícím se průvarem, kdy šířka průvaru na rozhraní dosáhne šířky návaru, se průvar přetváří na tvar rovnostranného trojúhelníku a jeho plocha roste se svojí výškou, resp. hloubkou průvaru (Obr. 7-15). Za předpokladu, že plocha kruhové úseče roste s výškou při konstantním poloměru, dostáváme exponenciální růst plochy. Na druhé straně plocha rovnostranného trojúhelníku roste v závislosti na své výšce lineárně. Na základě těchto předpokladů a naměřených dat lze vyvodit závěr, že plocha průvaru v první fázi, kdy je průvar minimální, roste exponenciálně. V druhé fázi u vzorků s větší hloubkou průvaru ve tvaru trojúhelníku, dojde k přechodu z exponenciální charakteristiky na lineární, které pokračuje dále s přibývajícím teplotou předehřevu.

## 7.2 Stabilizace šířky vrstev použitím předehřevu (VO 2)

Na základě poznatků získaných při zkoumání vlivu teploty předehřevu na geometrii single track návaru, bylo testováno možné využití v praxi při výrobě tenkostěnných dílů. Konkrétně se jednalo o využití předehřevu pro vyrovnání rozdílu mezi šířkou první vyrobené vrstvy a šířkou následujících vrstev.

### 7.2.1 Předběžné výsledky

V první fázi byly vyrobeny předběžné vzorky pro určení vhodné teploty předehřevu. Šířka první vrstvy vzorku s výchozím nastavením svařovacích parametrů byla 8,206 mm. Dále pak šířka dalších vrstev vzrostla zhruba o 18,5 % a pohybovala se kolem průměrné hodnoty 9,728 mm. V případě vzorku s nastavením pro hlubší průvar byla změřena šířka první vrstvy 11,996 mm. Šířka druhé vrstvy pak výrazně vzrostla a společně s dalšími vrstvami měla průměrnou šířku 15,379 mm. V tomto případě se jednalo o nárůst o 28 %.



Obr. 7-19 Rozdíl mezi šířkou první vrstvy a průměrnou šířkou stěny

Pro docílení toho, aby šířka první vrstvy dosáhla průměrné šířky stěny, byla pro variantu s výchozím nastavením zvolena teplota předehřevu na 200 °C, kdy při této teplotě dosáhla šířka single track návaru šířky 9,732 mm, tedy téměř shodné šířky, jako byla průměrná šířka předběžné stěny. V případě varianty se svařovacími parametry pro hlubší průvar, se požadovaná hodnota šířky stěny nenacházela v intervalu výsledků naměřených na single track návarech.



## 7.2.2 Strategie výroby všech vrstev s předehřevem

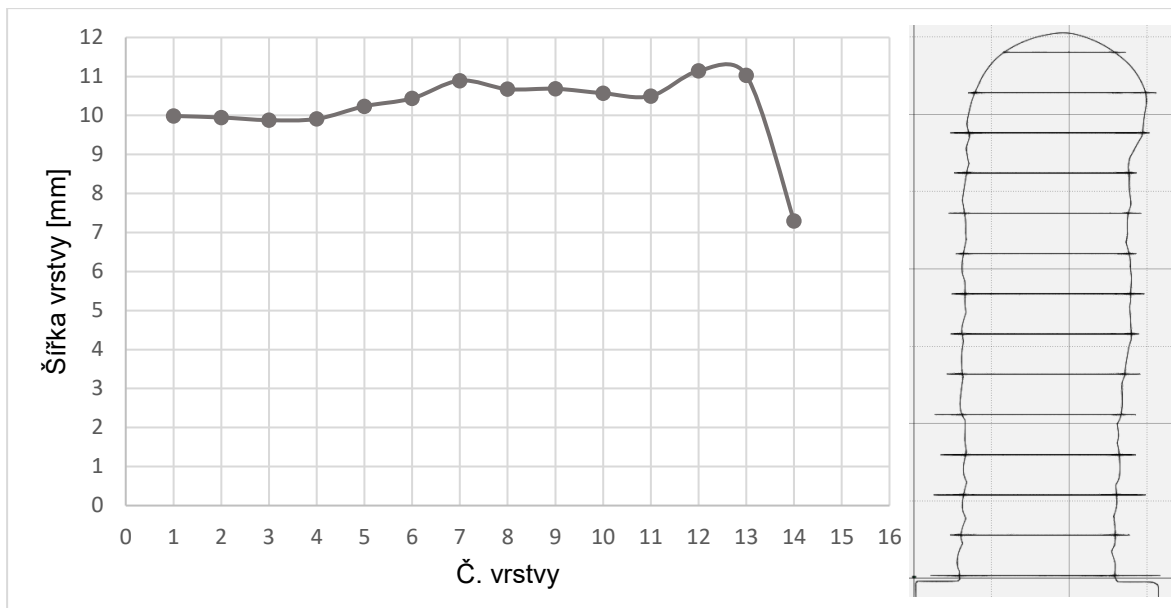
První byl vyroben vzorek s předehřevem základního materiálu na 200 °C a interpass teplotou 200°C. Výroba byla stabilní a jednotlivé vrstvy měly po téměř celé délce konstantní rozměry, což se pozitivně projevilo na celkové kvalitě vzorku. V předposlední vrstvě došlo vlivem nečistot a přítomnosti oxidů na svařovacím drátu k jeho zadrhnutí a vrstva nebyla vyrobena celá. Nedokončená vrstva byla dovařena a opravena, což se negativně podepsalo na kvalitě předposlední a i poslední vrstvy (Obr. 7-20).



Obr. 7-20 Tenkostěnný vzorek vyrobený s konstantní teplotou předehřevu

Šířka jednotlivých vrstev byla měřena stejným způsobem jako u předběžných vzorků. Naměřené hodnoty byly vyneseny do grafu společně s vyobrazenými řezy, ve kterých byly měřeny šířky jednotlivých vrstev. Vzdálenost mezi rovinami řezu odpovídá nastavené výšce vrstvy, o kterou se vertikálně posouval hořák během výroby.

Již první vrstvy dosáhly šířky 9,99 mm a až do čtvrté vrstvy se tato šířka udržovala v téměř shodných hodnotách. Od páté vrstvy došlo k mírnému nárůstu šířky vrstev na cca 10,5 mm. Následující vrstvy opět dosahovaly obdobných výsledků. U posledních dvou vrstev došlo k mírnému vzrůstu na 11,14 mm, což mohlo být způsobeno již popsanou chybou při výrobě. Propad v šířce poslední vrstvy byl důsledkem rozdílu mezi nastavenou výškou vrstvy, o kterou se posouval hořák a mezi reálnou výškou vrstvy. Během výroby docházelo k mírnému zvětšování vzdálenosti mezi špičkou hořáku a poslední vyrobenou vrstvou a konečná výška tenkostěnného vzorku byla po ukončení výroby menší, než bylo předpokládáno. Pozice řezu poslední vrstvy tedy neodpovídá reálné šířce a změřená šířka vrchlíku vrstvy způsobuje propad v grafickém zobrazení výsledků. Navíc rozdíl přesáhl výšku jedné celé vrstvy, a proto byla jako poslední vrstva změřena vrstva č.14.



Obr. 7-21 Šířka tenkostěnného vzorku vyrobeného s konstantní teplotou předehřevu

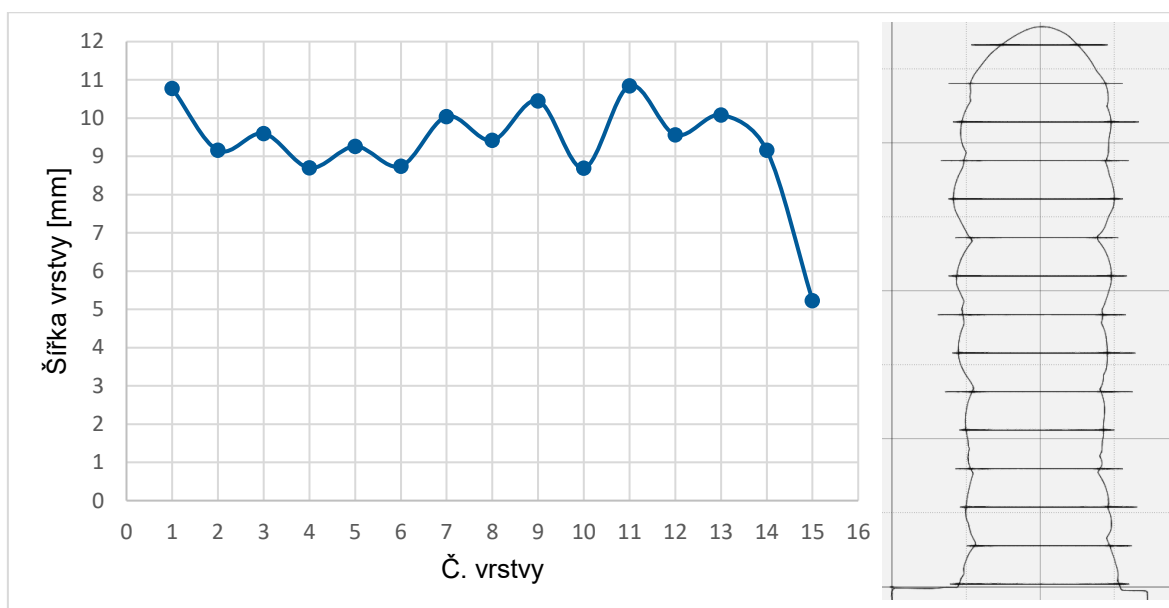
### 7.2.3 Strategie výroby prvních vrstev s předehřevem

Druhá strategie, byla nevržena tak, aby došlo ke kompenzaci šířky předehřevem pouze u prvních tří vrstev, které měly šířku menší než ostatní vrstvy. Tyto vrstvy byly vyrobeny s předehřevem a interpass teplotou 200 °C. Ostatní vrstvy byly vyrobeny s interpass teplotou 50 °C. První tři vrstvy vykazovaly velmi stabilní chování svařovacího procesu. Jejich geometrie byla konstantní po celé délce. Po snížení interpass teploty na 50 °C mezi třetí a čtvrtou vrstvou došlo k poklesu stability geometrie vrstev (Obr. 7-22). Během navařování desáté vrstvy došlo opět k přerušení výroby z důvodu zadrhnutí přidavného drátu. Místo přerušení výroby opět výrazně snížilo kvalitu vyrobeného tenkostěnného vzorku.



Obr. 7-22 Tenkostěnný vzorek vyrobený s částečným předehřevem

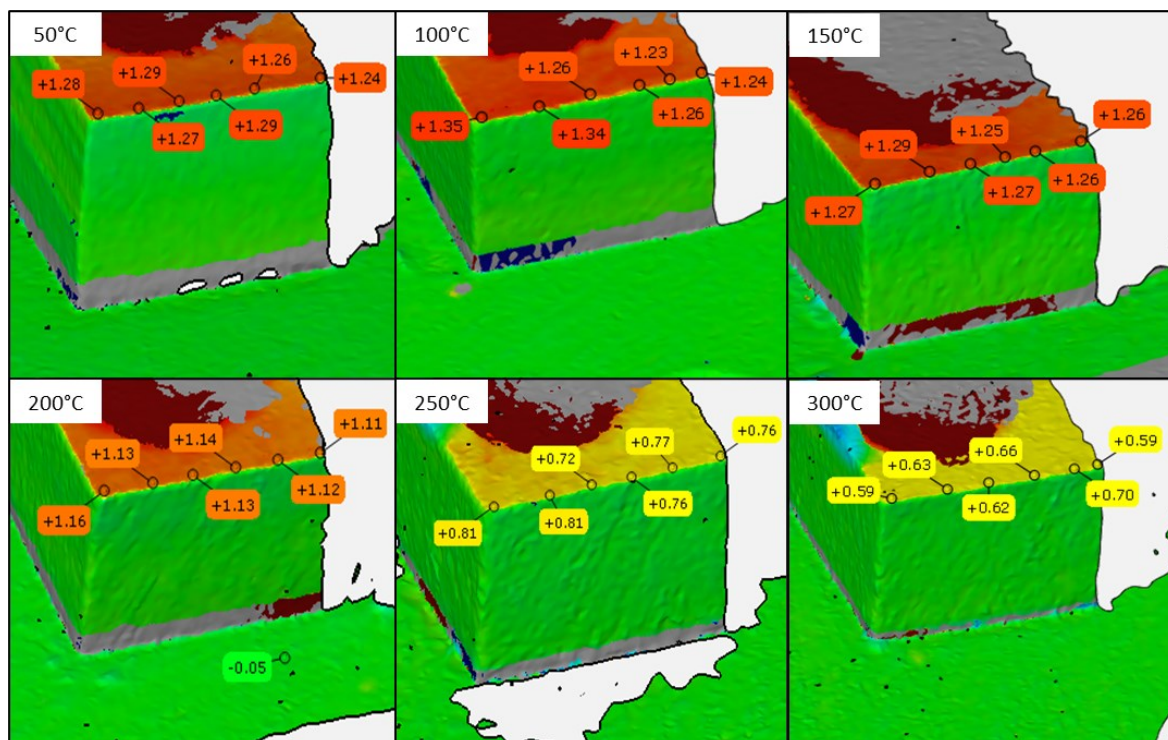
Nižší kvalita výroby se projevila i při měření šířky stěny. Šířka stěny byla méně stabilní než v předchozím případě v kap. 7.2.2. Použití předehřevu se projevilo na větší šířce první vrstvy 10,78 mm. Od druhé do šesté vrstvy se šířka ustálila okolo 9,1 mm. Poté došlo k mírnému rozšíření stěny na průměrnou hodnotu 9,8 mm. Zmíněné přerušení výroby v desáté vrstvě se projevilo rozkmitem hodnot mezi devátou až jedenáctou vrstvou. Zde došlo k nárůstu na 10,45 mm, poté došlo k poklesu na 8,69 mm a následně k opětovnému rozšíření na 10,85 mm (Obr. 7-23). U poslední vrstvy bylo opět možné pozorovat propad šířky, který byl popsán v předchozí kapitole. Absencí předehřevu u dvanácti vrstev ovšem nedošlo k tak výraznému rozdílu mezi předpokládanou a reálnou výškou tenkostěnného vzorku, a proto k propadu došlo až v předpokládané výšce vrstvy č. 15.



Obr. 7-23 Šířka tenkostěnného vzorku vyrobeného s částečným předehřevem

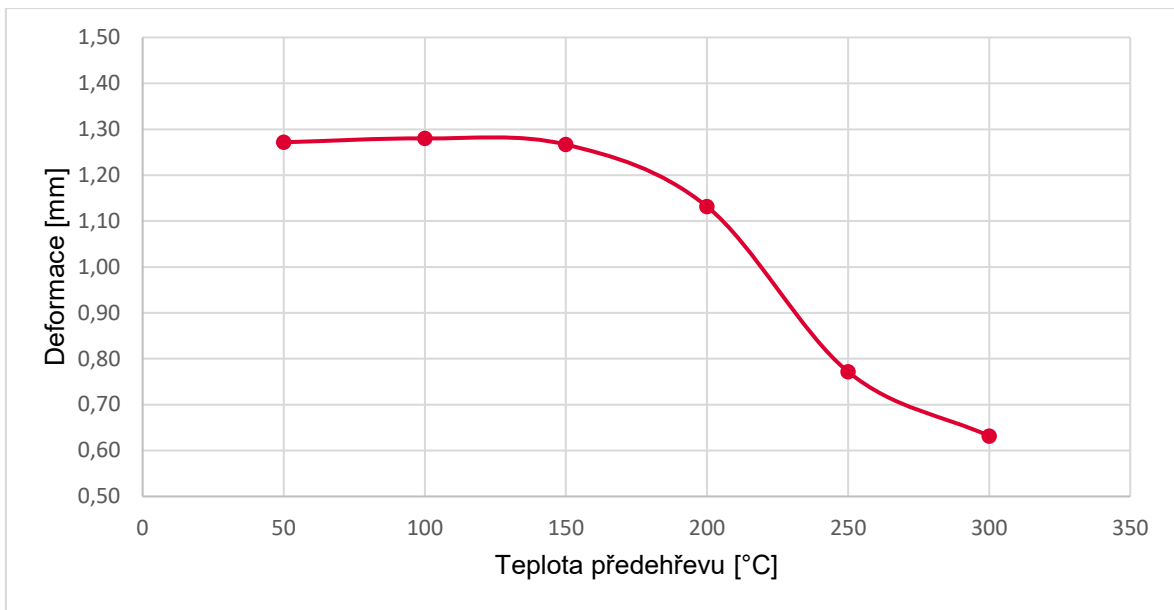
### 7.3 Vliv přehřevu na zbytkové napětí (VO 3)

Výsledky vlivu přehřevu na množství zbytkového napětí byly vyhodnocovány na základě deformace, která vznikla jako projev působení vnitřního zbytkového napětí. Deformace byla vyhodnocována na základě 3D dat pořízených ručním skenerem před výrobou a po ukončení výroby (Obr. 7-24).



Obr. 7-24 Výsledky měření deformace vlivem zbytkového napětí pro různé teploty přehřevu

Z naměřených hodnot deformace byl vypočten aritmetický průměr a byl zaznamenán do grafu (Obr. 7-25). Zde je možné vidět, že do cca 150°C nedochází k žádnému ovlivnění velikosti zbytkového napětí, které zůstává ve vyrobeném tenkostěnném tělese. V tomto intervalu se maximální deformace pohybovala okolo hodnoty 1,27 mm. V intervalu od 150 °C až do 300 °C byl zaznamenán výrazný pokles deformace, a tedy i velikosti zbytkového napětí v tělese. Při teplotě 200 °C klesla deformace na 1,13 mm, a to při přehřevu na 250 °C až na 0,77 mm. Při maximální zkoumané teplotě byla naměřena deformace 0,63 mm. V tomto intervalu došlo vlivem přehřevu k poklesu až o 49,6 %. Z charakteru vývoje je možné předpokládat, že se výsledky asymptoticky blíží k hodnotě mimo zkoumaný interval teplot přehřevu.



Obr. 7-25 Vliv teploty předehřevu na velikost deformace způsobené zbytkovým napětím

## 8 DISKUZE

### 8.1 Vliv přehřevu na geometrii návaru

V reakci na první výzkumnou otázku byl zkoumán vliv přehřevu na geometrii single track návaru vyrobeného technologií WAAM z hořčíkové slitiny AZ61. Výsledky ukazují, že téměř všechny pozorované parametry jsou závislé na teplotě základního materiálu. Výjimkou je pouze plocha průřezu návarem nad úrovní vrchní plochy základního materiálu, a to z důvodu konstantního přísuvu svařovacího drátu.

Výška, šířka a kontaktní úhel single track vzorků lineárně rostly s teplotou přehřevu bez výrazné změny trendu. Lineární chování těchto parametrů nebylo nijak výrazně ovlivněno ani při variování různých slitin základního materiálu nebo při nastavení různých svařovacích parametrů. To mělo vliv pouze na tangentu, resp. rychlost změny pozorovaného parametru.

V případě porovnávání parametrů ze sady č. 2 a č. 3 nebyly pozorovány výrazné odlišnosti v chování ani přes výrazně větší rozměry základních materiálů. Větší rozměry a tím pádem i větší tepelná kapacita základního materiálu ze slitiny AZ91 (sada č. 2) mohla ovlivnit rychlost ohřevu vlivem hoření elektrického oblouku. Na druhou stranu, délky návaru nebyly natolik dlouhé a tím pádem nedocházelo k tak velkému vstupu tepelné energie při navařování.

Měření hloubky průvaru ukázalo, že k zajištění hloubky průvaru je potřeba přehřívát základní materiál minimálně na 100 °C při zachování výchozích svařovacích parametrů. Případně je možné zvolit svařovací parametry, které zajistí hlubší průvar už od nízkých teplot přehřevu. Vhodné nastavení v kombinaci s použitím přehřevu by mělo zajistit pouze takový průvar, který zajistí, že se vyráběný díl neoddělí od základního materiálu během výroby, případně aby se jednotlivé vrstvy mezi sebou dostatečně propojily. Tomuto předpokladu by mělo vyhovovat přehřívání základního materiálu na teploty v rozmezí od 150°C do 250°C.

Po zhodnocení výsledků je možné potvrdit hypotézu první výzkumné otázky. Při kontrolovaném zvýšení teploty základního materiálu za pomoci vyhřívané podložky se geometrie single track návarů mění tak, že dochází k lineárnímu zvětšování parametrů šířky, kontaktního úhlu a hloubky průvaru a zároveň dochází k lineárnímu snižování výšky návaru.

## 8.2 Stabilizace šířky stěny pomocí předeřevu

Po zmapování chování geometrie při změně teploty základního materiálu byly navrženy strategie, pro stabilizaci šířky stěny po celé výšce tenkostěnného dílu. Jako vhodná teplota pro výrobu tenkostěnného modelu byla identifikována teplota 200°C. To zhruba odpovídá hypotéze stanovené k druhé výzkumné otázce, která se opírala poznatky z článku [20]. Autor spojoval ustálení šířky stěny s ustálením teploty základního materiálu na 150°C. Důvodem, proč došlo k ustálení na teplotě 150°C je pravděpodobně to, že autor nechával zchladnout vrstvu po navaření po určitou dobu. Po výrobě prvních vrstev bylo přebytečné teplo částečně pohlcováno tepelnou kapacitou dílu. Ve chvíli kdy těleso nedokázalo v celém svém objemu pohltit více tepla došlo k dosažení rovnováhy mezi vstupem tepla při svařování a odvodem tepla do okolí. Teplota 150°C je poté hodnota, na kterou stihla teplota klesnout za dobu časového intervalu určeného pro chladnutí. V této diplomové práci bylo navařování zahájeno po dosažení požadované teploty interpass, bez ohledu na to, jak dlouho trvalo ustálení na požadované teplotě.

Po aplikaci první strategie (výroba celé stěny s předeřevem na 200 °C) bylo dosaženo velmi dobrých výsledků. Rozdíl mezi šířkou prvních vrstev a šířkou zbylých vrstev byl úplně vyrovnán, a to bez větších odchylek. Navíc byl po téměř celou dobu proces výroby stabilní a jednotlivé vrstvy měli konstantní tvar průřezu po celé délce.

Použití předeřevu na vysokou teplotu 200°C (relativně vůči zkoumanému intervalu teplot) mělo za následek kromě stabilizace šířky i snížení výšky vrstev a konečná výška tenkostěnného vzorku byla nakonec nižší. Dále se průběžně oddaloval hořák od místa svaru, který byl původně ustaven na 12 mm pro optimální svařovací podmínky. Během výroby vzorku o 15ti vrstvách neměl nárůst vzdálenosti mezi hořákem a svarem vliv na stabilitu svařovacího procesu. Nicméně při možné budoucí výrobě vyšších produktů by mohlo dojít k přerušení výroby, nebo k odchýlení od dráhy požadované kontury, kterou opisuje robotické rameno.

Pokles výšky celého vzorku by bylo možné redukovat při použití druhé strategie výroby s předeřevem pouze prvních tří vrstev na 200 °C a poté snížení interpass teploty na 50 °C. Zde došlo pouze k mírnějšímu poklesu výšky celého vzorku oproti předchozí první strategii. V případě šířky vrstvy se ovšem nepovedlo vyrovnat rozdíl mezi první a zbylými vrstvami. Při měření se ukázalo, že první vrstvy mají větší šířku, než byla průměrná šířka celé stěny. Navíc oproti první strategii nebyla šířka stěny stálá a vykazovala tak horší kvalitu.

Po celkovém zhodnocení je možné potvrdit i druhou hypotézu, která říká, že je možné použít předehřev pro vyrovnání rozdílu mezi šířkami prvních vrstev. Ideální strategií je výroba celého tenkostěnného výrobku s předehřevem a interpass teplotou 200 °C. Pro použití této strategie je ale nutné v SRC programu zohlednit proměnnou výšku vrstev, aby nedošlo k nechtěnému přerušení výroby, anebo znehodnocení výrobku.

### 8.3 Vliv předehřevu na zbytkové napětí

Třetí výzkumná otázka se zabývala o možnost redukce zbytkového napětí v tenkostěnném výrobku pomocí použití předehřevu. Pro měření změny velikosti zbytkového napětí bylo zvoleno měření změny velikosti deformace základního materiálu jakožto projevu působení zbytkového napětí, na který byl vyroben tenkostěnný vzorek o 15 vrstvách. Tato metoda se ukázala jako vhodná pro porovnávání vyrobených vzorků mezi sebou, avšak nedovoluje stanovit exaktní velikost napětí.

Výsledky měření ukázaly, že při použití předehřevu do 150°C nedochází k redukci zbytkového napětí. Při teplotě 200 °C ovšem došlo k výraznému poklesu velikosti deformace. Pokles pokračoval až do maximální zkoumané teploty 300 °C. Získané výsledky také potvrdily, že vzniklé zbytkové napětí je jednoosého ohybového charakteru, jak bylo popsáno díky poznatkům z rešerše [23].

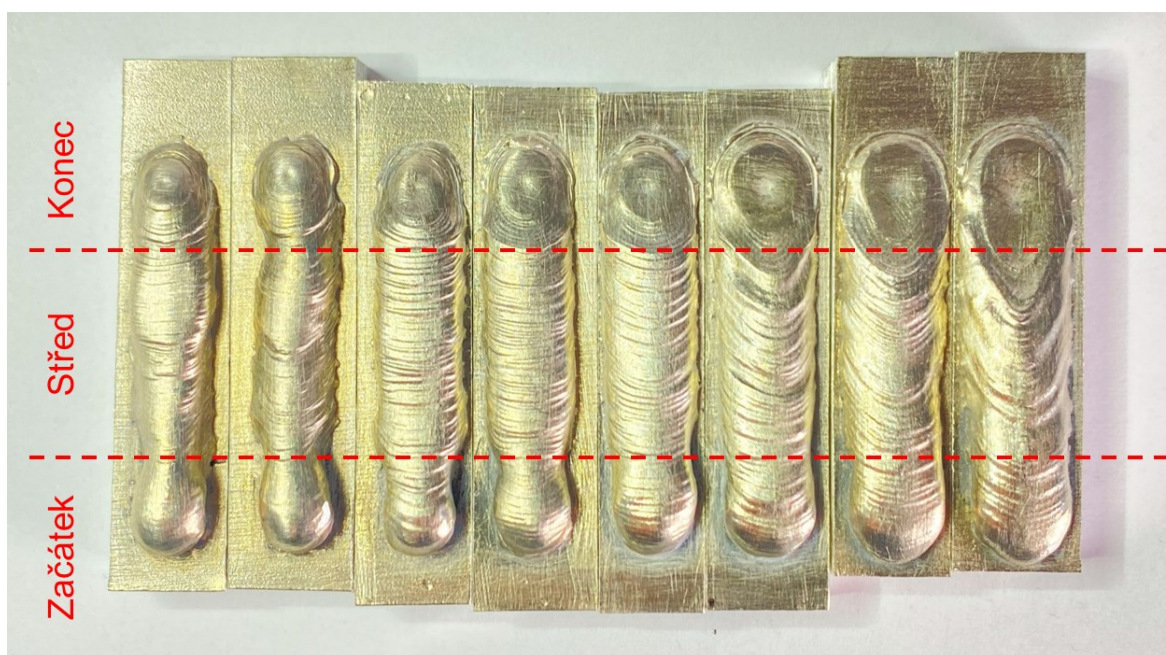
Na základě změřených výsledků je tedy možné potvrdit hypotézu, že pomocí použití vyhřívané podložky pro předehřev základního materiálu lze redukovat velikost zbytkového napětí o 20%, jak bylo předpokládáno. Výsledky navíc ukázaly, že lze dosáhnout redukce zbytkového napětí až o 50%. Pro cílené snížení zbytkového napětí by teplota předehřevu měla být vyšší než 150 °C.

Pro komplexnější výsledky by bylo vhodné provést měření, které by exaktně určilo velikost zbytkového napětí před a po použití předehřevu. Příkladem může být metoda měření dotykem [23] nebo případně vytvořit MKP výpočet [22], který by bylo možné porovnat s výsledky v této diplomové práci a tak zpětně určit velikost zbytkového napětí.



## 8.4 Vliv na kvalitu a stabilitu svařovacího procesu

Hlavním cílem použití předehřevu bylo zvýšit kvalitu výsledného produktu po výrobě technologií WAAM. Ukázalo se, že předehřevem je možné pozitivně ovlivnit řadu různých vlastností vyráběného objektu. Celková podoba vyráběného objektu je z velké části závislá na struktuře jednotlivých návarů, která má tři části – začátek, střední část návaru a konec návaru. Na začátku návaru se bez použití předehřevu tvořily kapky, jež měly větší rozměry než středová část. Naopak konce návaru byly nižší než ve středové části. Během výroby single track návarů se ukázalo, že se zvyšující se teplotou předehřevu se zmenšují rozdíly mezi začátky a středovými částmi až nakonec (od teploty 200°C) úplně vymizely. Naopak konce návarů se s rostoucí teplotou zvětšovaly a zasahovaly více do středové části. Pro maximální kvalitu by bylo vhodné minimalizovat rozdíl mezi začátky a středovými částmi a také minimalizovat velikost koncových částí. Těto podmínky nejlépe vyhovovaly návarům s předehřevem na 200 °C.



Obr. 8-1 Kvalita single track návarů s různým předehřevem (teplota rostoucí zleva)

To, že kvalita single track návaru s 200°C předehřevem nejlépe splňovala podmínky pro výrobu, se projevilo v části minimalizace rozdílu mezi šířkou prvních vrstev a průměrnou šířkou zbylých vrstev tenkostěnného modelu. Absence začátků návarů a minimalizace konců způsobila, že vrstvy měly po celé své délce konstantní rozměry během celé výroby.



Obr. 8-2 Boční a horní pohled (vlevo) na tenkostěnný vzorek v průběhu výroby s předehřevem 200°C

Jak již bylo zmíněno v kap. 7.2.2 a 7.2.3, během výroby docházelo k jejímu přerušování z důvodu zadržávání svařovacího drátu v hořáku. Příčinu zadržávání se nepodařilo přesně určit a eliminovat. Jedním z důvodů byla pravděpodobně přítomnost koroze na povrchu i uvnitř pórů v drátu tak, jak to popsal Šváb ve své práci [13]. Většinou část povrchové koroze se podařilo odstranit za pomoci mechanického odstranění a následného tepelného žíhání. Díky tomu se výrazně snížil počet přerušování výroby a tím se i zvýšila kvalita vyrobených vzorků. Pro optimální podmínky a výsledky WAAM výroby z hořčíkových slitin by bylo vhodné vyvinout metodu ošetření a skladování svařovacího drátu, aby se maximálně snížila pravděpodobnost výskytu nežádoucích jevů, které by narušovaly výrobu.

## 8.5 Vhodná teplota předehřevu pro slitinu AZ61

Na základě výše zmíněných výsledků bylo zjištěno, že při teplotě předehřevu 200 °C je možné docílit výroby tenkostěnného výrobku, který bude disponovat stabilní výškou a šířkou vrstvy po celé délce a bude zajišťovat dostatečný průvar, aby nedošlo k oddělení prvních vrstev od základního materiálu. Při teplotě 200 °C navíc dojde ke snížení zbytkového napětí zhruba o 11 %. Pro větší redukci zbytkového napětí při zachování konstantních rozměrů každé vrstvy je možné zvýšit teplotu předehřevu na teplotu okolo 250°C. Při teplotě předehřevu od 300 °C může docházet k nekonzistentním rozměrům vrstev, tedy i ke snížení kvality výsledného produktu. Vhodná teplota předehřevu základního materiálu pro výrobu tenkostěnných dílů z hořčíkové slitiny AZ61 technologií WAAM se pohybuje v intervalu od 200 °C do 250 °C v závislosti na konkrétních požadavcích na vlastnosti produktu.

## 9 ZÁVĚR

Použití vyhřívané podložky pro předehřev základního materiálu je efektivní metoda, díky které je možné ovlivnit vlastnosti a kvalitu výsledných produktů vyrobených technologií WAAM. V této diplomové práci byl popsán proces vývoje zařízení, které bylo následně použito pro experimentální ověření vlivu předehřevu na proces výroby a kvalitu finálního produktu.

V konstrukční části této práce se podařilo navrhnout vyhřívanou podložku pro předehřívání základního materiálu, který se používá jako podkladový materiál pro aditivní výrobu technologií WAAM. Samotný vývoj byl iterační proces, při kterém bylo využíváno numerických MKP výpočtů pro optimalizaci funkce výhřevu. Díky tomu se podařilo navrhnout vyhřívanou podložku s topnými patronami o výkonu 3,2 kW. Vysoký výkon zajišťoval výhřev na maximální teplotu 400 °C do 30 minut. Výhřev byl zajištěn pomocí osmi topných patron, které byly rozděleny do dvou topných zón pro co nejkonzistentnější rozložení teploty na povrchu topné desky v toleranci  $\pm 2$  °C. Po sestavení byla otestována funkčnost vyhřívané podložky. Bylo zjištěno, že podložka je schopna výhřevu na požadovanou teplotu 400 °C s přesností rozložení teploty po povrchu  $\pm 1$  °C. V důsledku nepřesnosti výroby byla rychlost výhřevu prodloužena na 1 hodinu.

Ve výzkumné části byly na základě rešerše stanoveny tři výzkumné otázky. Pro každou otázku byla navržena vhodná metodika ověření společně s formou testovaných vzorků. Nejprve bylo zkoumáno chování změny geometrie jednoduchého návaru při změně teploty základního materiálu pomocí vyhřívané podložky. Bylo zjištěno, že zkoumané parametry jako výška návaru, šířka návaru, kontaktní úhel s rovinou desky základního materiálu a hloubka průvaru lineárně rostou v závislosti na rostoucí teplotě předehřevu.

Po objasnění chování geometrie návaru byly nabyté vědomosti využity pro stabilizaci šířky vrstev při výrobě tenkostěnného dílu. Na základě předběžného měření šířky vrstev tenkostěnného modelu byla určena ideální teplota 200 °C pro kompenzaci šířek. Byly navrženy dvě strategie výroby, přičemž se strategie výroby celého vzorku s předehřevem ukázala jako nejvíce vhodná nejen pro stabilizaci šířek vrstev, ale i pro zvýšení kvality celého tenkostěnného dílu. Zároveň se ale ukázalo, že vlivem předehřevu dochází k ovlivnění výšky jednotlivých vrstev a tím pádem i celého dílu. Do budoucna je tedy potřeba optimalizovat nastavení výšky vrstvy tak, aby odpovídala reálné výšce vyrobených vrstev.

Třetím tématem výzkumu byla otázka použití výhřevu jako metody pro redukcí zbytkového napětí, které vzniká při výrobě technologií WAAM. Hypotéza byla ověřována měřeními a porovnáváním deformace, která vznikla v důsledku zbytkového napětí na tenkostěnných vzorcích. Bylo zjištěno, že v intervalu od 150 °C dochází k redukcí deformace, resp. zbytkového napětí, a to až o zhruba 50 % při předehřevu na maximální zkoumanou teplotu 300 °C. Je možné odvodit, že předehřevem lze docílit většího snížení zbytkového napětí, nicméně při teplotách nad 300 °C dochází k takovým změnám geometrie návaru, které by mohly negativně ovlivnit výslednou kvalitu výrobků.

V závěru práce bylo stanoveno, že ideální teplotou předehřevu při výrobě dílů z hořčíkové slitiny AZ61 je teplota 200 °C. V případě, že by při výrobě docházelo k nežádoucímu deformování dílu, je možné zvýšit teplotu předehřevu na 250 °C pro efektivnější snížení zbytkového napětí.

Celkově byly všechny dílčí cíle diplomové práce úspěšně splněny. Metoda použití vyhřívané podložky se prokázala jako efektivní způsob pro zlepšení kvality dílů vyrobených technologií WAAM z hořčíkových slitin. V rámci této práce byly ověřeny jen některé aspekty kvality výrobku jako šířka vrstev tenkostěnného dílu nebo velikost zbytkového napětí. Do budoucna by bylo vhodné navázat a ověřit i jiné možnosti použití předehřevu, které byly nad rámec této diplomové práce. Příkladem může být například studium porozity a jejího chování při použití předehřevu. Prokázání možnosti redukovat porozitu v dílech vyrobených technologií WAAM by jistě znamenala významný pokrok. Dále by bylo vhodné zúžit interval teplot doporučených pro výrobu ze slitiny AZ61 s ohledem na typ vyráběného dílu. Ideální teplota předehřevu se pak může lišit například při výrobě objemových dílů nebo velkorozměrových tenkostěnných dílů.

## 10 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. AVEDESIAN, M. and H. BAKER. ASM Speciality Handbook - Magnesium and Magnesium Alloys. USA: ASM International Ohio, 1999, 314 s. ISBN 0-87170-138-3.
2. *Topné kabely*. Online. Easytherm.cz. 2022. Dostupné z: [https://easytherm.cz/index.php?topne\\_kabely](https://easytherm.cz/index.php?topne_kabely). [cit. 2024-05-16].
3. *Topné patrony*. Online. Easytherm.cz. 2022. Dostupné z: [https://easytherm.cz/index.php?topne\\_patrony](https://easytherm.cz/index.php?topne_patrony). [cit. 2024-05-16].
4. *Ohebná topná tělesa*. Online. Easytherm.cz. 2022. Dostupné z: <https://easytherm.cz/index.php?id=98,0,0,1,0,0>. [cit. 2024-05-16].
5. *Topná folie ohebná, samolepící, silikonová*. Online. In: . 2021. Dostupné z: <https://www.solareconomic.cz/230V-500W-topna-folie-ohebna-samolepici-silikonova-300x-400mm-TF17-d1065.htm>. [cit. 2024-05-23].
6. *Co je indukční ohřev*. Online. ROBOTERM. 2022. Dostupné z: <https://www.roboterm.cz/cz/indukce/o-indukci/co-je-indukcni-ohrev>. [cit. 2024-05-16].
7. *Co znamená PID*. Online. Automa. 2016. Dostupné z: <https://www.dixell.cz/teorie-regulace/>. [cit. 2024-05-22].
8. *Základy teorie ON/OFF a PID regulace*. Online. Dixel.cz. 2024. Dostupné z: <https://www.dixell.cz/teorie-regulace/>. [cit. 2024-05-22].
9. *Rychlé seznámení s PID regulátorem*. Online. Dostupné z: <https://bastlirna.hwkitchen.cz/rychle-seznameni-s-pid-regulátorem/>. [cit. 2024-05-16].
10. Tang, WN., Mo, N., & Hou, J. (2022). Research Progress of Additively Manufactured Magnesium Alloys\_ A Review (2). *ACTA METALLURGICA SINICA*.
11. MANJHI, Shambhu Kumar et al., 2024. Additive manufacturing of magnesium alloys: Characterization and post-processing. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*. Vol. 7, no. 1, pp. 184–213. DOI 10.1016/j.ijlmm.2023.06.004.
12. SLAVÍČEK Jakub et al., 2023. Strategies for wire arc additive manufacturing of thin walls and overhangs. *Journal of Mechanical Science and Technology*. Vol. 37, no. 11. DOI 10.1007/s12206-023-2303-7.
13. ŠVÁB, Čeněk. Vývoj WAAM procesních parametrů pro tenkostěnné díly z hořčíkové slitiny AZ61 [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/145867>. Diplomová práce. Vysoké učení Technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce Jakub Slaviček.

14. LANG, B. et al., 2008. Hot cracking of resistance spot welded magnesium alloy. *ISIJ International*. Vol. 48, č. 1, s. 77–82. DOI 10.2355/ISIJINTERNATIONAL.48.77.
15. YE, H. et al., 2009. Analysis on the weld defects of the AZ91D magnesium alloy joints. *Materials Science Forum*. Vol. 610–613, s. 931–935. DOI 10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/MSF.610-613.931.
16. HUANG, C. J., CHENG, C. M. a CHOU, C. P., 2011. The influence of aluminum content of AZ61 and AZ80 magnesium alloys on hot cracking. *Materials and Manufacturing Processes*. Vol. 26, č. 9, s. 1179–1187. DOI 10.1080/10426914.2010.536936.
17. HUANG, C. J. et al., 2011. Hot Cracking in AZ31 and AZ61 Magnesium Alloy. *Journal of Materials Science and Technology*. Vol. 27, č. 7, s. 633–640. DOI 10.1016/S1005-0302(11)60118-7.
18. NIKNEJAD, Seyedtirdad et al., 2014. Resistance spot welding of AZ series magnesium alloys: Effects of aluminum content on microstructure and mechanical properties. *Materials Science and Engineering A*. Vol. 618, s. 323–334. DOI 10.1016/j.msea.2014.08.013.
19. GU, Jianglong et al., 2018. Design and cracking susceptibility of additively manufactured Al-Cu-Mg alloys with tandem wires and pulsed arc. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 262, s. 210–220. DOI 10.1016/j.jmatprotec.2018.06.030.
20. GUO, Yangyang et al., 2021. Formability, microstructure evolution and mechanical properties of wire arc additively manufactured AZ80M magnesium alloy using gas tungsten arc welding. *Journal of Magnesium and Alloys*. Vol. 9, č. 1, s. 192–201. DOI 10.1016/J.JMA.2020.01.003.
21. VLK, Miloš. *Experimentální mechanika*. Online. 2003. Dostupné z: [http://ean2011.fme.vutbr.cz/img/fckeditor/file/opory/Experimentalni\\_mechanika.pdf](http://ean2011.fme.vutbr.cz/img/fckeditor/file/opory/Experimentalni_mechanika.pdf). [cit. 2024-05-24].
22. AHMAD, Siti Nursyahirah et al., 2020. FEM simulation procedure for distortion and residual stress analysis of wire arc additive manufacturing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 834, č. 1. DOI 10.1088/1757-899X/834/1/012083.
23. DEREKAR, Karan S. et al., 2022. Effects of Process Variants on Residual Stresses in Wire Arc Additive Manufacturing of Aluminum Alloy 5183. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*. Vol. 144, č. 7, s. 071005. DOI 10.1115/1.4052930
24. Shen, J., & Xu, N. (2012). Effect of preheat on TIG welding of AZ61 magnesium alloy. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 19(4), 360–363. <https://doi.org/10.1007/s12613-012-0564-8>

25. *EN AW 6082*. Online. Gleich. 2021. Dostupné z: <https://gleich.de/cs/produkty/en-aw-6082/>. [cit. 2024-05-24].
26. *Vlastnosti Grenamat AS*. Online. 2023. Dostupné z: <https://www.grenamat.cz/cz/grenamat-as/>. [cit. 2024-05-21].
27. *Ochranný nerezový oplet z nerezové oceli AISI 304*. Online. Ochrana kabelů a hadic. Dostupné z: <https://www.oplet.cz/ochranne-oplety-a-navleky-pro-kabely-a-hadice/kovove-oplety-ocel-nerez-emv-mosaz/efx-es-ochranny-oplet-z-nerezove-oceli-aisi-304/>. [cit. 2024-5-21].
28. *Plášťové termočlánky s minerální izolací*. Online. Easytherm.cz. 2022, 2017. Dostupné z: [https://easytherm.cz/index.php?sensor\\_m2](https://easytherm.cz/index.php?sensor_m2). [cit. 2024-05-21]



## 11 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

WAAM	Wire Arc Additive Manufacturing
CNC	Computer Numerical Control
MKP	Metoda Konečných Prvků
VO	Výzkumná Otázka
ÚK	Ústav Konstruování
SSR	Solid State Relé
CMT	Cold Metal Transfer
MIG	Metal Inert Gas
MAG	Metal Active Gas
WIG	Wolfram Inert Gas
TIG	Tungsten Inert Gass
3D	Trojdimenzionální
PWM	Pulse Width Modulation
PID	Proporcionální, Integrální a Derivační regulátor
SRC	System Resource Controller
VUT	Vysoké učení technické
USB	Universal Seriól Bus
LPBF	Laser Powder Bed Fusion

## 12 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 2-1 (a) Topné patrony [2] (b) Topný drát [1](c) Ohebná topná tělesa [5] .....	7
Obr. 2-2 (a) Počet publikací zabývajících se aditivní výrobou hořčíkových slitin [11], (b) Princip WAAM výroby [10].....	9
Obr. 2-3 Vliv svařovacího proudu na trhlinu: (a) 15 kA; (b) 19 kA; (c) 23 kA; (d) 27kA. [14] .....	10
Obr. 2-4 Precipitace $Mg_{17}Al_{12}$ v mikrostruktuře svaru [16] .....	11
Obr. 2-5 Makrotrhliny ve vzorcích [19] .....	11
Obr. 2-6 Vývoj teploty základního materiálu [20] .....	12
Obr. 2-7 Šírky jednotlivých vrstev [20].....	13
Obr. 2-8 Rozložení tvrdosti po výšce stěny [20].....	13
Obr. 2-9 Rozložení zbytkových napětí podle MKP simulace [22].....	14
Obr. 2-10 Zbytkové napětí v tenké stěně (výsledky v MPa) [23] .....	15
Obr. 2-11 Vliv předehřevu na mikrotvrdost, množství eutektika a mez pevnosti v tahu [24] .....	16
Obr. 2-12 Mikrostruktura po předehřevu na teploty: (a) bez předehřevu (b) 100 °C (c) 150 °C (d) 200°C (e) 250 °C (f) 300 °C [24] .....	16
Obr. 4-1 Koncepty rozložení topných patron .....	22
Obr. 4-2 Měřicí sestava.....	24
Obr. 4-3 Nastavení okrajových podmínek MKP simulace.....	24
Obr. 4-4 Porovnání naměřených teplot s vypočtenými teplotami pomocí MKP modelu při nastavení PID regulátoru na 400 °C .....	25
Obr. 5-1 Dvoudílná deska spojená dvojicí šroubů M8 .....	26
Obr. 5-2 Rozložení topných patron ve dvou zónách (zelená - střed, oranžová - kraje).....	27
Obr. 5-3 Rozložení teplot na povrchu desky .....	28
Obr. 5-4 Způsob uložení termočlánků v desce .....	28
Obr. 5-5 Řez upínací dírou se zahloubením pro šroub .....	29
Obr. 5-6 Schéma zapojení rozvodné skříně .....	30
Obr. 5-7 Kompletní vyhřívaná podložka .....	31
Obr. 5-8 Náběhová křivka výhřevu na 400 °C .....	32

Obr. 5-9 Měřicí sestava rovnoměrnosti rozložení teploty na povrchu .....	33
Obr. 5-10 Průběh rozložení teploty na povrchu desky .....	33
Obr. 5-11 Řez změřeným teplotním polem po ustálení .....	34
Obr. 6-1 Schéma postupu řešení diplomové práce .....	35
Obr. 6-2 Robotické rameno Kuka vybavené Svařovacím zdrojem Fronius .....	36
Obr. 6-3 Měřitelné parametry návaru .....	39
Obr. 6-4 Sada vzorků č. 1 pro ověření vlivu na geometrii návaru .....	39
Obr. 6-5 Vzorky pro ověření vlivu předehřevu na geometrii návaru (2. a 3. sada) .....	40
Obr. 6-6 Podoba a strategie výroby tenkostěnného vzorku.....	41
Obr. 6-7 Vzorky Pro testování změny šířky vrstev .....	42
Obr. 6-8 Vzorek pro testování zbytkového napětí a způsob upnutí.....	43
Obr. 6-9 Ruční 3D skenování vzorků na pracovišti .....	44
Obr. 7-1 Průměrná výška návaru v závislosti na teplotě předehřevu (sada č. 1) .....	46
Obr. 7-2 Průměrná výška návaru v závislosti na teplotě předehřevu (sada č. 2) .....	46
Obr. 7-3 Průměrná výška návaru v závislosti na teplotě předehřevu (sada č. 3) .....	47
Obr. 7-4 Porovnání sady č.1 (AZ91) a sady č. 2 (AZ31).....	48
Obr. 7-5 Porovnání a sady č. 2 (výchozí nastavení) a sady č. 3 (nastavení hlubšího průvaru) .....	48
Obr. 7-6 Sada vzorků č. 2 (a), sada vzorků č. 3 (b) seřazeny vzestupně dle teploty předehřevu (zleva) .....	49
Obr. 7-7 Průměrná šířka návaru v závislosti na teplotě předehřevu (sada č. 1) .....	50
Obr. 7-8 Průměrná šířka návaru v závislosti na teplotě předehřevu (sada č. 2) .....	50
Obr. 7-9 Průměrná šířka návaru v závislosti na teplotě předehřevu (sada č. 4) .....	51
Obr. 7-10 Porovnání šířek návaru u sady č. 1 a sady č. 2 .....	52
Obr. 7-11 Porovnání šířek návaru u sady č. 2 a sady č.3 .....	52
Obr. 7-12 Průměrná hloubka průvaru v závislosti na teplotě předehřevu (sada č.2) .....	53
Obr. 7-13 Mapa hloubky průvaru (výchozí nastavení).....	54
Obr. 7-14 Průměrná hloubka průvaru v závislosti na teplotě předehřevu (sada č.3) .....	55
Obr. 7-15 Mapa průvarů (nastavení svařovacích parametrů pro hlubší průvar).....	56
Obr. 7-16 Změna kontaktního úhlu vlivem předehřevu základního materiálu.....	57

Obr. 7-17 Průměrná plocha návaru v závislosti na teplotě předehřevu .....	58
Obr. 7-18 Průměrná plocha průvaru v závislosti na teplotě předehřevu .....	59
Obr. 7-19 Rozdíl mezi šířkou první vrstvy a průměrnou šířkou stěny .....	60
Obr. 7-20 Tenkostěnný vzorek vyrobený s konstantní teplotou předehřevu.....	61
Obr. 7-21 Šířka tenkostěnného vzorku vyrobeného s konstantní teplotou předehřevu .....	62
Obr. 7-22 Tenkostěnný vzorek vyrobený s částečným předehřevem .....	62
Obr. 7-23 Šířka tenkostěnného vzorku vyrobeného s částečným předehřevem .....	63
Obr. 7-24 Výsledky měření deformace vlivem zbytkového napětí pro různé teploty předehřevu .....	64
Obr. 7-25 Vliv teploty předehřevu na velikost deformace způsobené zbytkovým napětím	65
Obr. 8-1 Kvalita single track návarů s různým předehřevem (teplota rostoucí zleva) .....	69
Obr. 8-2 Boční a horní pohled (vlevo) na tenkostěnný vzorek v průběhu výroby s předehřevem 200°C .....	70

## 13 SEZNAM TABULEK

Tab. 4-1 Mechanické a tepelné vlastnosti slitiny AW 6082 [25] .....	22
Tab. 6-1 Složení hořčikové slitiny AZ61 (hm%) .....	38
Tab. 6-2 Nastavení svařovacího zdroje .....	40

## 14 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1	Výkresová dokumentace
Příloha č. 2	Schéma zapojení