



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

**Zmapování teplotního ovlivnění při aditivní
výrobě AL slitiny metodou WAAM**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

AUTOR: Bc. Vojtěch Houska

VEDOUcí PRÁCE: doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.

STUDIJNÍ PROGRAM: Výrobní inženýrství

Praha 2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Houska** Jméno: **Vojtěch** Osobní číslo: **476512**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Výrobní inženýrství**
Specializace: **Bez specializace**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Zmapování teplotního ovlivnění při aditivní výrobě Al slitiny metodou WAAM

Název diplomové práce anglicky:

Mapping of temperature effects during the additive manufacturing of Al alloy using the WAAM method

Pokyny pro vypracování:

- Popis technologie WAAM v návaznosti na navařování Al slitin
- Analýza teplotních cyklů a teplotních polí – způsoby jejich měření
- Návrh experimentu při navařování slitiny EN AW 5087
- Závěrečné vyhodnocení

Seznam doporučené literatury:

- [1] Kolařík, L., Kovanda, K., Gurčík, T. Využití metody robotického navařování - WAAM a porovnání s 3D tiskem kovových materiálů, Dny svařovací techniky 2019, Rychnov nad Kněžnou, 2019
- [2] Pavlík, M.; Sahul, M.; Sahul, M.; Novák, V. Influence of CMT overlay welding mode on the microstructure and mechanical properties of 5087 aluminium alloy fabricated by Wire and Arc Additive Manufacturing, THE 76th IIW ANNUAL ASSEMBLY AND INTERNATIONAL CONFERENCE ON WELDING AND JOINING, 2023
- [3] Pan Jiangang, Yuan Bo, Ge Jinguo, Ren yu, Chen hongjun, Zhang Liang, Lu Hao, Influence of arc mode on the microstructure and mechanical properties of 5356 aluminum alloy fabricated by wire arc additive manufacturing, Journal of Materials Research and Technology, Vol. 20, 2022, p. 1893-1907, ISSN 2238-7854, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.08.005>

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D. ústav strojírenské technologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Ing. Miroslav Sahul, Ph.D. ústav strojírenské technologie FS

Datum zadání diplomové práce: **28.04.2023** Termín odevzdání diplomové práce: **11.08.2023**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2023**

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Ladislava Kolaříka, Ph.D. , a to pouze pomocí podkladů uvedených v seznamu použité literatury v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne:

.....

Podpis autora

Poděkování

Tímto bych velice rád poděkoval svému vedoucímu doc. Ing. Ladislavu Kolaříkovi, Ph.D. IWE za ochotu, cenné rady a vstřícné jednání při psaní mé závěrečné práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Miroslavu Sahulovi, Ph.D. za odbornou pomoc při experimentálním měření. V neposlední řadě bych rád poděkoval všem lidem, kteří mě během psaní závěrečné práce i celém studiu podporovali, především pak své rodině.

Anotace

Tato diplomová práce popisuje metodu navařování WAAM, která je progresivní aditivní technologií. Popisuje její princip a ukazuje, jak ji lze ve strojírenství využít. Také pojednává o svařovací metodě CMT, o tom, jaké jsou její charakteristiky a rozdělení. Dále se zaměřuje na hliník, jakožto hojně využívaný strojírenský materiál.

Experimentální část je věnována zmapování teplotního ovlivnění, tedy měření teplotních cyklů a sledování teplotních polí, při navařování hliníkové slitiny metodou WAAM.

Název diplomové práce:	Zmapování teplotního ovlivnění při aditivní výrobě AL slitiny metodou WAAM
Autor práce:	Bc. Vojtěch Houska
Vedoucí práce:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
Konzultant:	Ing. Miroslav Sahul, Ph.D.
Akademický rok:	2022/2023
Vysoká škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	12133 – Ústav strojírenské technologie
Vedoucí ústavu:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
Rozsah práce:	107 stránek, 21 tabulek, 121 obrázků
Klíčová slova:	Aditivní technologie, WAAM (Wire and Arc Addite Manufacture), Termální analýza, CMT (Cold Metal Transfer), Hliník

Annotation

This thesis describes the WAAM welding method, which is a progressive additive technology. It describes its principle and shows how it can be used in engineering. It is also about the CMT welding method, what are its characteristics and divisions. It also focuses on aluminum, as a widely used engineering material.

The experimental part is devoted to the mapping of temperature effects, i.e. measurement of temperature cycles and monitoring of temperature fields, during welding of aluminum alloy using the WAAM method.

Title of the final thesis:	Mapping of temperature effects during the additive manufacturing of Al alloy using the WAAM method
Author:	Bc. Vojtěch Houska
Supervisor:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
Consultant:	Ing. Miroslav Sahul, Ph.D.
Academic year:	2022/2023
University:	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	12133 – Department of Manufacturing Technology
Head of department:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
Extent:	107 pages, 21 tables, 121 pictures
Keywords:	Additive Manufacturing, WAAM (Wire and Arc Additive Manufacture), Thermal Analysis, CMT (Cold Metal Transfer), Aluminium

Obsah

1. ÚVOD A CÍL DIPLOMOVÉ PRÁCE	11
2. Přehled aditivních metod	12
2.1 Laser Additive Manufacturing (LAM)	12
2.2 Electron Beam Melting (EBM)	14
2.3 WAAM	15
2.3.1 Popis metody WAAM	16
2.3.2 Srovnání s ostatními metodami aditivní výroby	16
3. Obecná charakteristika svařování	19
3.1 Historie svařování	19
3.2 Základní pojmy	19
3.3 Přehled metod svařování	22
4. Technologie MIG – CMT	23
4.1 MIG svařování	23
4.1.1 Princip metody	23
4.1.2 Přenos svarového kovu	24
4.1.3 Ochranné plyny	26
4.2 Technologie CMT	27
4.2.1 Metody svařování CMT	29
4.3 Vliv přenosu kovu do lázně na tvar housenky svaru	30
5. Hliník a jeho slitiny	33
5.1 Vlastnosti hliníku	33
5.2 Značení a rozdělení hliníku	34
5.3 Označení stavu hliníku	35
5.4 Svařitelnost hliníku a jeho slitin	36

5.5	Popis vybraných materiálů	37
5.5.1	Materiál EN AW 5083	37
5.5.2	Materiál EN AW 5087	37
6.	Termální analýza	39
6.1	Infračervená termografie.....	39
6.2	Termočlánky.....	41
7.	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	43
7.1	Návrh experimentu	43
7.2	Popis pracoviště	44
7.3	Použité měřicí přístroje a experimentální zařízení	45
8.	Experimentální měření.....	52
8.2.1	Snímání teplotního pole shora	65
8.2.2	Snímání teplotního pole ze strany.....	70
8.3	Navařování s prodlevou 120 sekund	75
8.3.1	Snímání teplotního pole – shora	75
8.3.2	Snímání teplotního pole ze strany.....	83
9.	Vyhodnocení výsledků.....	88
10.	Závěr	95
	Seznam použitých literárních zdrojů	97
	Seznam tabulek	103
	Seznam obrázků.....	104

Seznam zkratk

<i>zkratka</i>	<i>vysvětlení</i>
3D	trojdimenzionální
AM	Addite Manufacturing
BTF	Buy-To-Fly
C _e	Uhlíkový ekvivalent
CAD	Computer Aided Design
CMT	Cold Metal Transfer
EBM	Electron Beam Melting
IR	InfraRed
LAM	Laser Additive Manufacturing
LMD	Laser Metal Depositing
MAG	Metal Active Gas
MIG	Metal Inert Gas
PM	Přídavný materiál
SLM	Selective Laser Melting
SLS	Selective Laser Sintering
TIG	Tungsten Inert Gas
WAAM	Wire and Arc Addite Manufacture

Seznam použité symboliky

<i>symbol</i>	<i>[jednotka]</i>	<i>vysvětlení</i>
m	Metr	
mm	Milimetr	
μm	Mikrometr	
nm	Nanometr	
kg	Kilogram	
I	Produ	
A	Ampér	
U	Napětí	
V	Volt	
mV	Milivolt	
f	Frekvence	
Hz	Hertz	
T	Teplota	
°C	Stupeň Celsia	
s	Sekunda	
Kg/m^3	Kilogram na metr krychlový	
MPa	Megapascal	
λ	Vlnová délka	
DC	Stejnoseměrný proud	
Mpx	Megapixel	

1. ÚVOD A CÍL DIPLOMOVÉ PRÁCE

V dnešní době se velmi intenzivně vyvíjí aditivní technologie, které byly dříve používány především pro výrobu prototypů. Pro tzv. 3D tisk se používaly zejména polymerní materiály. Dnes je tendence používat aditivní výrobu i při výrobě součástí a komponent, a to z různých materiálů. Velkým rozvojem v současné době prochází zejména 3D tisk z kovových materiálů zejména v letectví, kde se používají speciální niklové a titanové slitiny, ale také v lékařství nebo v automobilovém průmyslu.

Výhodami kovového 3D tisku jsou především rychlost, využití materiálu, velmi vysoká přesnost a také fakt, že jeho pomocí lze vytisknout i výrobky, které žádnou jinou technologií nelze vytvořit.

Mezi nevýhody patří velká investice, poměrně drahý provoz a omezená pracovní plocha, případně kvalita povrchu vytištěných součástí. I 3D tisk má svá geometrická omezení, která neumožní vytisknout naprosto jakýkoliv výrobek. Tato fakta vedou k vývoji alternativních metod, jako je např. metoda WAAM. Jedná se o robotické navařování pomocí elektrického oblouku a drátových přídavných materiálů.

Výrobky (návary) této metody jsou dnes intenzivně zkoumány z hlediska strukturních a mechanických vlastností, z hlediska optimalizace procesních parametrů a z hlediska teplotního ovlivnění – což ovlivňuje geometrickou stabilitu navařování, a tím i možnosti vlastního navařování.

Pro účely této diplomové práce byla použita slitina hliníku EN AW 5083, protože hliník patří mezi nejvíce používané neželezné kovy a tato slitina má dobré vlastnosti z hlediska svařování a navařování.

Hlavní cíle práce:

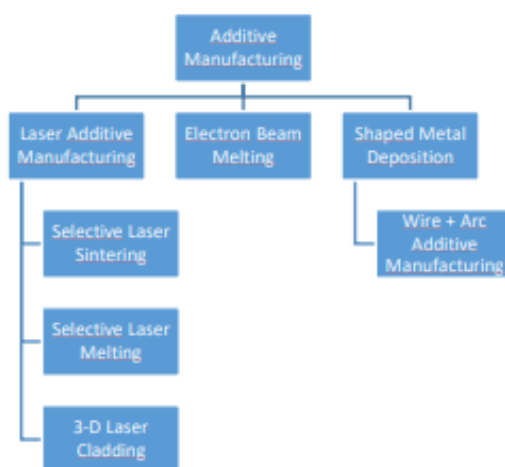
1. Popis technologie WAAM v návaznosti na navařování Al slitin
2. Analýza teplotních cyklů a teplotních polí – způsoby jejich měření
3. Zmapování teplotních cyklů při aditivní výrobě Al slitiny metodou WAAM
4. Zmapování teplotních polí při aditivní výrobě Al slitiny metodou WAAM

2. Přehled aditivních metod

Aditivní výroba (Additive Manufacturing) je označení pro průmyslový 3D tisk. Během tohoto výrobního procesu vznikají podle digitálního modelu, vrstva po vrstvě, trojrozměrné objekty. Aditivní výroba umožňuje objektům získat unikátní geometrické tvary, které jsou konvenčním způsobem nedosažitelné. [1]

Snížení nákladů a zvýšení efektivity – takto lze obecně charakterizovat hlavní požadavky zákazníků. Z tohoto důvodů AM prochází velkým vývojem. Tento proces výroby je založen na vrstvení přídavného materiálu, tak aby výsledná 3D struktura byla co nejvíce podobná finální součásti dle CAD předlohy. Oproti konvenčním metodám produkuje AM výrazně menší množství odpadového materiálu. [1]

Při výrobě pomocí AM s využitím kovových materiálů lze použít celou řadu metod, obvykle rozdělovaných podle typu přídavného materiálu a způsobu jeho zpracování. Obvykle se pro kovové materiály uvádí tyto základní metody (obr. 1). [1]



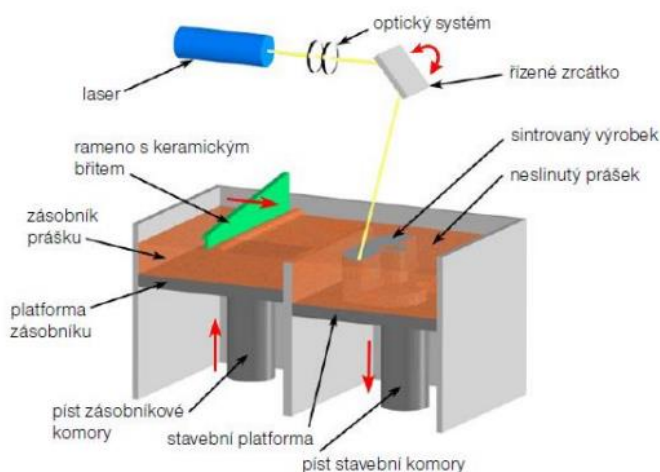
Obr. 1 – Rozdělení metod AM pro zpracování kovových materiálů [1]

2.1 Laser Additive Manufacturing (LAM)

Jak již název napovídá, jedná se o metody AM využívající laserový paprsek. Ty se následně dělí na 3 typy: Selective Laser Sintering (SLS), Selective Laser Melting (SLM) a Laser Metal Depositing (LMD).

Selective Laser Sintering (SLS)

Zkratka SLS znamená v překladu „laserové spékání“ (slinování, sintrování). Jedná se o typický AM proces. Princip této metody spočívá v tom, že materiál ve formě velmi jemného prášku je ohříván těsně pod teplotu tavení pomocí laseru. Prášek je nanášen na vertikálně posuvnou podkladovou desku a ohříván laserem těsně pod teplotu tavení a tím dochází k jeho spékání. Řídící systém upravuje intenzitu paprsku tak, aby byl materiál spékán jen v požadovaném místě. Po tomto procesu je vytvořena první vrstva a podkladová deska se posune dolů o tloušťku této vrstvy. Poté je nanesena nová vrstva prášku a celý proces se opakuje, dokud nedojde k vytvoření celé 3D součásti. Při celém tomto procesu je nutné, aby byl prostor vyplněn inertním plynem. Dokončovací operace jsou nedílnou součástí tohoto výrobního procesu. [1]



Obr. 2 – Schéma zařízení pro metodu SLS [1]

Selective Laser Melting (SLM)

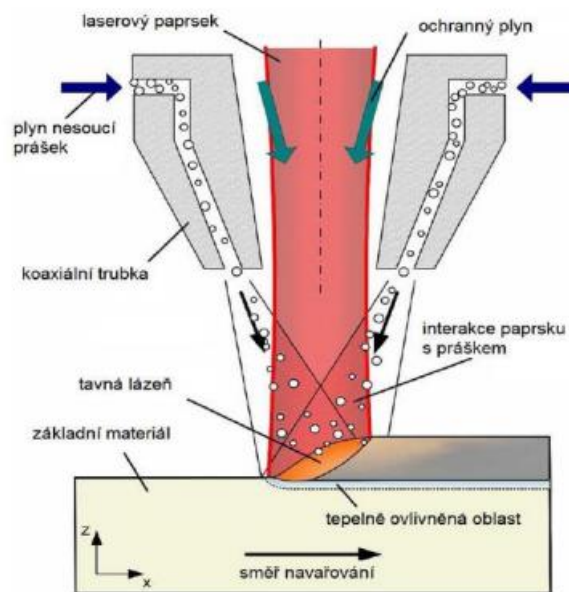
Význam zkratky SLM je „laserové tavení“. Tato metoda má s metodou SLS stejný princip i stejné zařízení na kterém je prováděna. Hlavním rozdílem mezi těmito dvěma technologiemi je ten, že zatímco u SLS nedochází k úplnému roztavení prášku (je ohříván na teplotu těsně pod teplotou tavení), zde dochází k úplnému roztavení. Ke spojení materiálu pak dochází na molekulární úrovni a vzniká homogenní stav. Z tohoto důvodu se metoda SLM používá pro homogenní (čisté) přídavné materiály, jelikož uvažujeme pouze jednu teplotu tavení. U technologie SLS lze použít i heterogenní kovové prášky (slitiny). [1]

Typická tloušťka vrstvy u metody SLM je 30–50 μm . Proto se tato metoda obvykle používá pro výrobu tenkostěnných konstrukcí. [1]

Laser Metal Depositing (LMD)

Této metodě se také říká tzv. Laser cladding, což znamená „laserové navařování“. Princip výroby spočívá v přivedení přídatného materiálu ve formě prášku přímo do proudu plynu tryskami a pomocí laseru je taven a navařován (obr. 3). Tento postup je velmi podobný jako u metod svařování MIG/MAG. U této metody je vhodné používat homogenní přídatné materiály. [1]

Hlavní výhodou metody je absence rozměrného zařízení pro stírání a nanášení kovového prášku, či nutnost zaplnit komoru inertním plynem. [1]



Obr. 3 – Schéma zařízení pro LMD [1]

2.2 Electron Beam Melting (EBM)

Proces EBM je podobný metodám SLS a SLM. I v případě této AM je přídatný materiál používán ve formě prášku v některých případech i ve formě drátu. Rozdílem oproti předchozím metodám je však to, že teplo, které je potřebné pro spojení materiálu je získáváno pomocí elektronového svazku. Celý proces výroby probíhá ve vakuu, což znamená, že lze zpracovávat i velmi obtížně zpracovatelné materiály. To je zde z důvodu, aby se elektrony

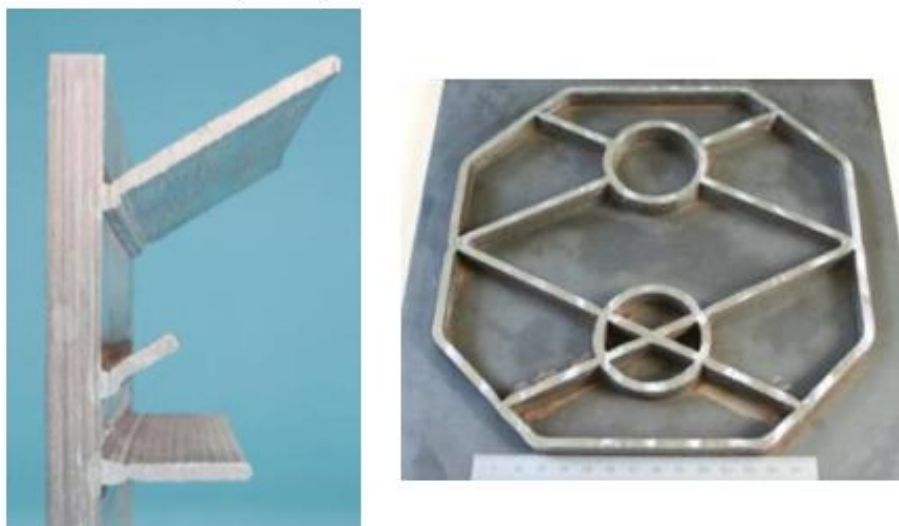
nezpomalovaly od částic přítomných v atmosféře. Tato skutečnost má za následek vyšší kvalitu výsledné struktury. [1]

2.3 WAAM

Metoda WAAM (Wire and Arc Additive Manufacturing) spadá do kategorie AM, která se nazývá Shape Metal Deposition (obr. 1). Tato AM na sebe (popřípadě vedle sebe) ukládá jednotlivé vrstvy pomocí svařovacího (kovového) drátu, který je zde použit jako přídatný materiál. [1]

Navařování metodou WAAM je aditivní výroba, která se používá k vytváření trojrozměrných kovových výrobků. Název vznikl na Cranfield University, která se procesem ohledně této technologie intenzivně zabývá. V této metodě se využívá elektrického oblouku, který je zde jako zdroj tepla, a drátu, který je zde jako přídatný materiál. Vývoj této aditivní technologie započal v 90. letech 20. století. V současné době se jedná o jednu z nejrychleji se rozvíjejících výrobních metod. Pro navařování se používá standardní obloukové svařovacího zařízení (svařovací agregát, podavač drátu, hořák), stroje provádějící proces navařování. [2][3][1]

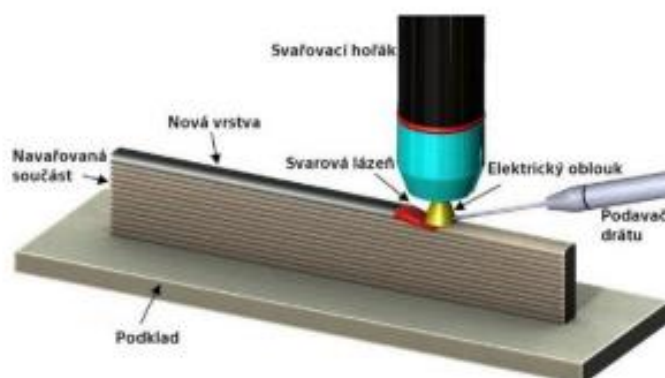
Tato metoda vznikla v důsledku vývoje různých technologických odvětví. Je zde totiž velmi důležité skloubit hned několik věcí dohromady, jako jsou parametry svařovacího procesu, robotické programování, znalost termální analýzy. To všechno je třeba znát, aby bylo docíleno požadovaného tvaru a požadovaných mechanických vlastností. [1]



Obr. 4 a 5 – Ukázka výrobků vytvořených metodou WAAM [4]

2.3.1 Popis metody WAAM

Princip WAAM spočívá v ukládání jednotlivých návarových housenek na sebe nebo vedle sebe. Obvykle se jedná o velký počet těchto housenek, které postupně modelují výsledný požadovaný tvar součásti, který je co nejvíce podobný finální verzi dle CAD předlohy. Velkou roli zde hrají přesné modely pro geometrii jednotlivých housenek, resp. vrstev, neboť ty jsou základním kamenem kvality povrchu a rozměrové přesnosti vyrobených produktů. Navařování probíhá vždy zdola nahoru (obr. 6). [5][1]



Obr. 6 – Princip metody WAAM (s pomocí TIG navařování) [1]

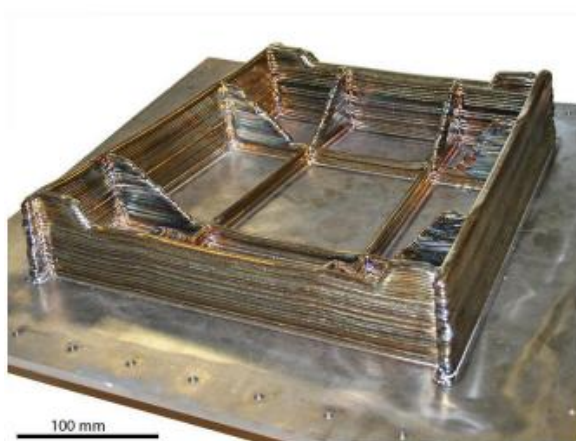
2.3.2 Srovnání s ostatními metodami aditivní výroby

Největší předností metody WAAM je vysoká produktivita. Ta je výrazně vyšší než u podobných metod, které využívají práškových přídatných materiálů (laser, elektronový svazek). Výsledná dosahovaná produktivita může být až 70x větší než u výše zmíněných metod. [1][5]

Mezi další výhody metody WAAM patří využití konvenčního pracoviště (nejčastěji tvořeného průmyslovým robotem), které nevyžaduje vysoké pořizovací náklady, a také náklady na provoz jsou poměrně nízké (díky PM ve formě klasických svařovacích drátů, obvykle používaných pro metodu MIG/MAG svařování). Dalším důvodem, proč se využívá této technologie je tzv. přístup BTF (buy-to-fly) v optimálním poměru. Jedná se o poměr vstupního a výstupního materiálu do procesu výroby. Jako vstupní materiál se bere veškerý materiál, který vstupuje do procesu a jako výstupní materiál se bere ten, který tvoří hotový výrobek. U obvyklých konvenčních způsobů výroby je poměr BTF 10-20:1. Metoda WAAM může tento

poměr snížit až o 35–45 %. To představuje, dle některých studií, možnost snížení ceny např. letadla až o 60 % a jeho hmotnost až o 30 %. [1]

Názorným příkladem porovnání konvenční metody výroby (obrábění) a metody WAAM je část titanového podvozku Bombardier aerospace (obr. 7) vyrobená ze slitiny Ti6Al4V. Tato část podvozku obsahuje stěny, křížení stěn, kolmé i mírně nakloněné stěny. Vstupní materiál měl hmotnost 24 kg a výsledná hmotnost součásti (tedy výstupní materiálu) byla 21 kg. Metoda WAAM dosáhla poměru BTF 1,2:1. Při výrobě stejné součásti pomocí konvenční metody obrábění byla výsledná hmotnost součásti opět 21 kg. Vstupní materiál měl však celkovou hmotnost 240 kg. To znamená, že poměr BTF pro konvenční metodu obrábění byl 11,6:1. [1][6]



Obr. 7 – Část podvozku Bombardier aerospace ze slitiny Ti6Al4V [6]

Druhým příkladem srovnání je hliníkové žebro křídla o délce 2,5 m. To je obráběno z masivního kusu materiálu o hmotnosti 325 kg. Výsledná váha žebra je 18 kg. To znamená, že žebro bylo vyrobeno v BTF poměru 18,1:1. Metoda WAAM pro výrobu totožného dílu dosáhla poměru 12:1. [6]



Obr. 8 – Hliníkové žebro křídla s dvěma roboty a otočným stolem [6]

Zejména druhý příklad demonstruje ještě další výhodu, kterou je v podstatě neomezená velikost pracovního prostoru (oproti klasickým metodám 3D tisku kovových materiálů), při vhodné konfiguraci robotů, příp. jejich lineárních pojezdů apod.

Stejně jako každá metoda či technologie, i metoda WAAM má své nevýhody a omezení. Zřejmě největší nevýhodou je nižší tvarová složitost tištěných (navářovaných) výrobků. Dalšími nevýhodami jsou možné problémy s tvorbou vad, obdobně jako tomu je při standardních svařovacích, resp. navařovacích procesech, stabilita geometrie návarů, nutnost odstranění podkladové desky a samozřejmě také finální obrobení návarů obzvláště pokud je požadována vysoká přesnost či kvalita povrchu. Poslední nevýhodou je množství vneseného tepla do výrobku. Především u kontinuálního navařování je toto množství velké a může způsobovat to, že se navařené stěny mohou začít bortit nebo deformovat. Tuto skutečnost řeší v experimentu i tato diplomová práce.

3. Obecná charakteristika svařování

Svařování je technologický proces, jehož cílem je vytvořit trvalý, nerozebíratelný a pevný spoj dvou či více strojních součástí či konstrukcí. Svařováním je vhodné spojovat kovové, ale i nekovové materiály, které mají většinou podobné, ale mohou mít i různé vlastnosti jak mechanické, tak fyzikálně chemické. [7]

3.1 Historie svařování

Historie spojování materiálů sahá hluboko do minulosti. První zmínky pochází již ze starověku z doby zhruba 3 tisíce let před naším letopočtem. V této době vzniklo kovářské svařování. Tato metoda svařování byla až do konce 19. století jedinou známou metodou. [8]

V roce 1801 objevil anglický chemik Humprey Davy elektrický oblouk. Tento objev byl základním kamenem pro svařování tak jak ho známe dnes. Pravděpodobně první pokus o svařování proběhl v roce 1881, kdy se francouzský vědec Auguste DeMeritens pokusil svařovat olověné desky uhlíkovými elektrodami. Jeho žáci později rozvinuli tuto metodu pro svařování ocelových plechů, vyladili schéma zapojení a nechali si svůj vynález v roce 1885 patentovat. Po přelomu století se technologie svařování začala rozvíjet a vylepšovat. Velkým impulzem byla první světová válka, kdy vznikla náhlá potřeba velkých transportních lodí. V roce 1920 v Británii vyplula loď Fuglar, která byla celosvařovaná – po této události se svařování elektrickým obloukem stalo akceptovatelnou metodou pro výrobu lodí. Taktéž se začali objevovat nové metody svařování. Tento rozvoj trvá neustále až do současnosti, kdy se stále objevují nové způsoby, jak svařování využít. [7][8][9]

3.2 Základní pojmy

Pro správné vytvoření svarového spoje je potřeba znát základní pojmy této technologie.

Svařování

Jedná se o metalurgický proces, který slouží k vytvoření trvalého, nerozebíratelného spoje dvou a více součástí. Obecným požadavkem na proces svařování je vytvoření takových termodynamických podmínek, při kterých je umožněn vznik nových meziatomárních vazeb. K tomu je nutné působit buď tlakem nebo teplem, popř. oběma způsoby najednou. [10]

Navarování

Jde o metalurgický proces, při kterém dochází k nanášení roztaveného kovu na povrch základního materiálu. Nejedná se tedy o spojování více materiálů, ale pouze o rozšíření (zvětšení objemu) jednoho základního materiálu. [7]

Základní materiál

Je ta část materiálu, která je spojována, popřípadě ta část materiálu u navarování, na kterou je přidáván nový materiál.

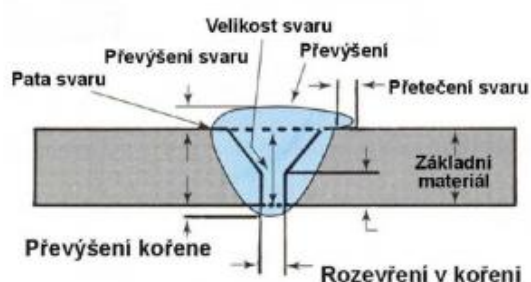
Přídavný materiál

Je ta část materiálu, pomocí které je spojován základní materiál, popřípadě ta část u navarování, kterou je vytvářen návar na základním materiálu.

Teplota interpass

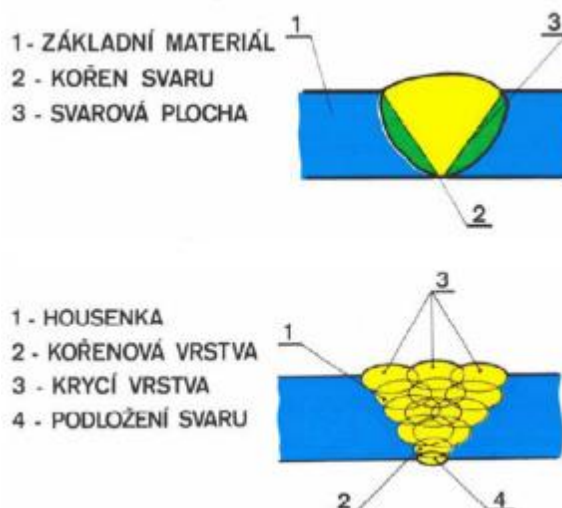
Je taková teplota, která odpovídá teplotě materiálu na začátku pokládání další svarové nebo návarové housenky při vícevrstvěm svařování či navarování.

Další důležité pojmy souvisí s geometrií svarového spoje: velikost svaru, kořen svaru, převýšení svaru, přetečení apod. (viz obr. 9).



Obr. 9 – Popis svarového spoje [7]

Dalším důležitým pojmem je, zda se jedná o jednovrstvý nebo vícevrstvý spoj. Jednovrstvý svár se používá tam, kde je požadovaná tloušťka dostatečně malá na to, aby jedna housenka pokryla celou požadovanou tloušťku sváru. Je-li požadovaná větší tloušťka, je nutno přistoupit k vícevrstvému svarovému spoji. V tomto případě se housenky skládají na sebe tak, aby pokryly celou plochu spoje (obr. 10).



Obr. 10 – Jednovrstvý a vícevrstvý svarový spoj [7]

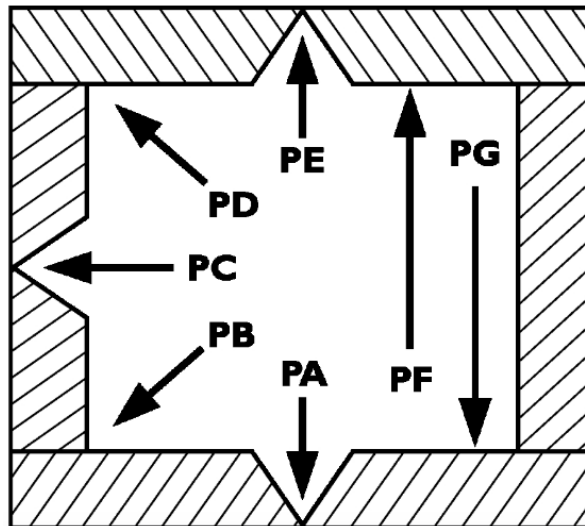
U svarového spoje je také nutno definovat, jaký typ svaru je použit. Základní jednoduché rozdělení lze stanovit dvěma základními typy: svary tupé a koutové. U tupých svarů je nutno svařovaný materiál před svařováním vhodně upravit do určitého tvaru. Podle tvaru lze pak rozlišovat různé druhy tupého svaru. Typickým příkladem je svar tvaru I, svar tvaru Y, svar tvaru V a svar tvaru X. [9]

Koutové svary se obvykle používají tam, kde svařované díly spolu svírají určitý úhel, typicky pravý. Mohou být jednostranné či oboustranné. Koutový svar vyžaduje méně přípravy než svar tupý a má obvykle téměř trojúhelníkový průřez. [9]

Svar	Zobrazení	Značka	Svar	Zobrazení	Značka	Svar	Zobrazení	Značka
I			W		W	švový		
V		V	U		U	bodový		
1/2 V		V	1/2 U		U	děrový		
Y		Y	lemový		JL	oblý V		
1/2 Y		Y	koutový			oblý 1/2 V		

Obr. 11 – Popis a značky svarů [11]

V neposlední řadě se u svarů určuje poloha svařování. Ta se označuje dvoupísmenným kódem, kde první písmenko je P a druhé písmenko označuje danou polohu (obr. 12). Toto značení vychází z normy ČSN EN ISO 6947.

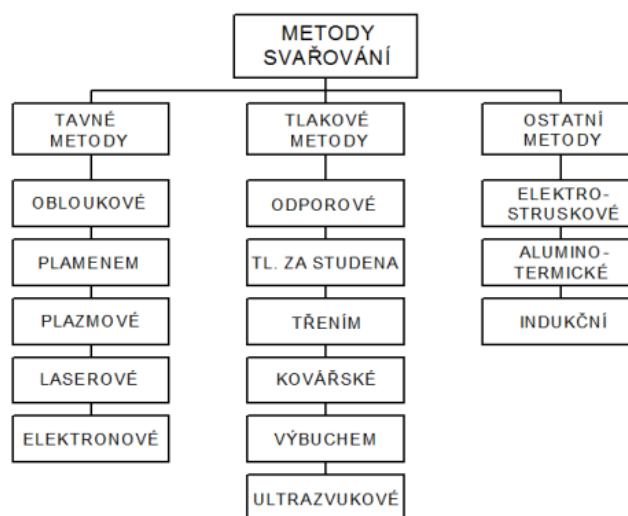


Obr. 12 – Hlavní polohy svařování [12]

3.3 Přehled metod svařování

Existuje mnoho metod svařování, přičemž každá z nich může být vhodná pro jiný typ materiálu či způsobu použití. Základním rozdělením je, zda se svarový spoj vzniká působením teple nebo tlaku, popřípadě působením současně. Toto rozdělení se pak samostatně dělí na několik dalších podskupin, které jsou přehledně zobrazené v následujícím přehledu (obr. 13).

[13]



Obr. 13 – Rozdělení metod svařování [14]

4. Technologie MIG – CMT

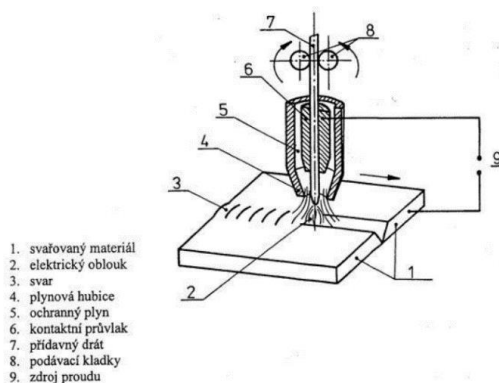
Pro výzkum v rámci řešení této diplomové práce bude použita metoda MIG, jakožto nejpoužívanější průmyslová varianta svařování, která je dobře použitelná i pro aditivní technologii WAAM. Z tohoto důvodu se další bližší popis metod svařování (a navařování) bude zaměřovat především na tuto metodu.

4.1 MIG svařování

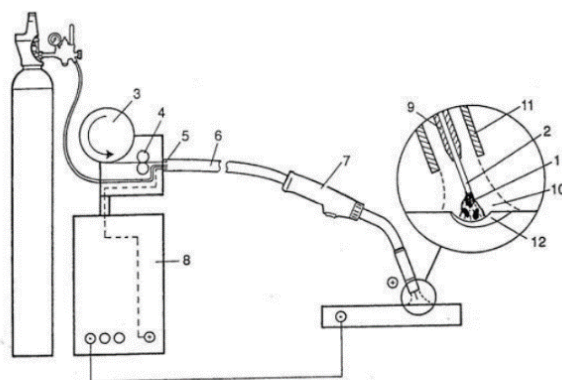
Zkratka MIG pochází z anglického Metal Inert Gas, tedy svařování v ochranné atmosféře inertního plynu, to znamená, že ochranný plyn, se žádným způsobem nepodílí na procesech probíhajících ve svarové lázni, je k ní chemicky netečný. Jedná se o metodu svařování, která je velice efektivní a její hlavní výhodou je možnost automatizace procesu a také možnost svařovat ve všech polohách.

4.1.1 Princip metody

Svařování probíhá pomocí elektrického oblouku, který hoří mezi základním materiálem a tavící se (nekonečnou) elektrodou, která je zde zastoupena pomocí svařovacího drátu (ta přestupuje pomocí kapek roztaveného kovu postupně do svarové lázně a tvoří tak přídatný svařovací materiál). Drát je do svarové lázně přiváděn automatickým kladkovým podavačem konstantní rychlostí a v ústí hořáku je pomocí třecího kontaktu napájen elektrickým proudem. Délka drátu, která je zatížena elektrickým proudem (tzv. výlet elektrody) je, pokud možno, co nejkratší. Pomocí hubice je přiveden také ochranný plyn. Ten je hnán do okolí svarové lázně a vytváří okolo ní plynovou „obálku“, která lázeň chrání před okolní atmosférou a jejími nežádoucími účinky. [16][29]



Obr. 14 – Detailní schéma hořáku – princip MIG svařování [17]



- | | |
|----------------------------------|-------------------------------|
| 1 – elektrický oblouk, | 2 – drátová elektroda, |
| 3 – zásobník drátu, | 4 – podávací kladky, |
| 5 – rychloupínací spojka, | 6 – hořákový kabel, |
| 7 – svařovací hořák, | 8 – zdroj svařovacího proudu, |
| 9 – kontaktní svařovací průvlak, | 10 – ochranný plyn, |
| 11 – plynová tryska, | 12 – svarová lázeň |

Obr. 15 – Schéma zařízení pro MIG svařování [18]

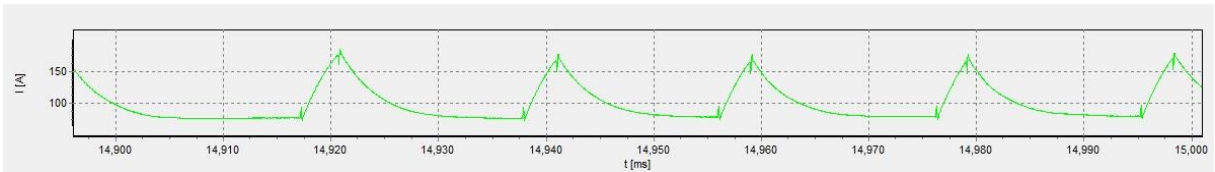
Metodou MIG je obecně vhodné používat pro svařování a navařování neželezných kovů a jejich slitin a lehkých kovů jako je hliník a jeho slitiny, slitiny mědi (bronzы) nebo titanu. [18]

4.1.2 Přenos svarového kovu

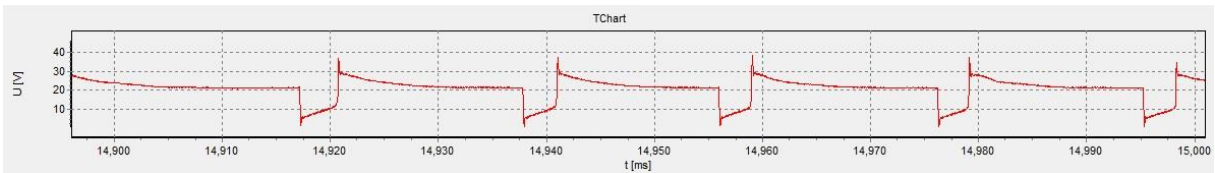
Přenos svarového kovu u metod využívajících tavící se elektrody, je důležitý pro výslednou kvalitu svaru, proto zde budou uvedeny základní typy přenosu kovu do tavné lázně – zkratový přenos, sprchový přenos a impulzní přenos. [19]

Charakteristickým rysem zkratového přenosu je praskavý zvuk, který je způsoben neustálým zhasínáním a znovu zapalováním elektrického oblouku. Typické parametry svařování jsou: svařovací proud zhruba do 180 A a hodnota napětí mezi 14 a 22 V. [19]

Při zkratovém přenosu se odtavuje kapka, která následně vyplní mezeru mezi elektrodou a svarovou lázní. To způsobí zánik (zhasnutí) elektrického oblouku – tzv. zkrat. Napětí je v tomto bodě nulové a hodnota proudu je naopak velmi vysoká (viz průběh proudu a napětí v závislosti na čase na obr. 17). To má za následek zkrat. Poté dochází k efektu, kterému se říká pinch efekt, kdy působením magnetického pole vznikne tlak v radiálním směru, který zaškrtní a vymrští oddělenou kapku z elektrody do svarové lázně. V tento moment vzroste napětí a dojde k zapálení elektrického oblouku a celý proces se opakuje. [19]



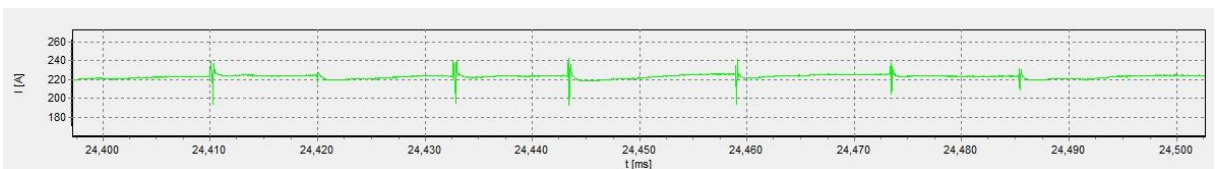
Obr. 16 – Průběh proudu v závislosti na čase u zkratového přenosu



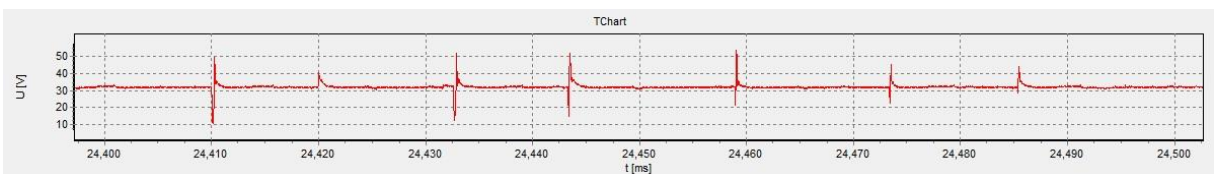
Obr. 17 – Průběh napětí v závislosti na čase u zkratového přenosu

Dalším typem je sprchový přenos. Typickými parametry je vyšší proud než u zkratového přenosu, který má hodnoty 200 až 500 A a napětí je také vyšší, zhruba 28 až 40 V. [19]

Během odloučení kapky, díky vyšším hodnotám napětí, a tedy i větší délce oblouku nedojde k jeho přerušení (bezzkratový proces), což má za následek větší přenos tepla do základního materiálu (způsobuje velký závar a širší svarovou housenku). Při vysokém proudu se nestačí vytvářet větší kapky, ale jelikož zde působí větší elektromagnetické síly, tvoří se zde jen drobné kapky s vysokou frekvencí odtavování – sprcha. [19]



Obr. 18 – Průběh proudu v závislosti na čase u sprchového přenosu

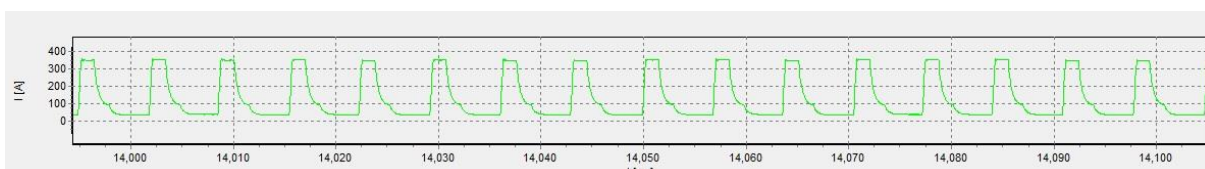


Obr. 19 – Průběh napětí v závislosti na čase u sprchového přenosu

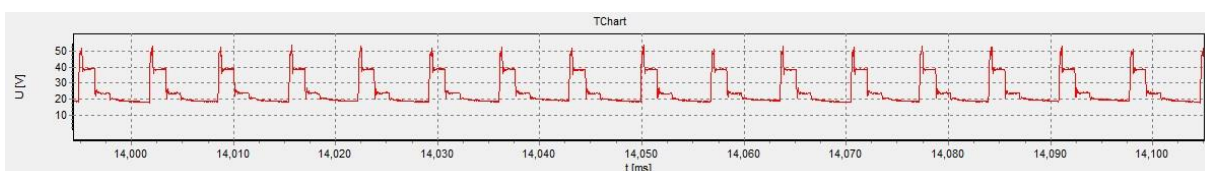
Impulzní přenos má své parametry v překrývajících se hodnotách zkratového a sprchového typu přenosu. Tento typ přenosu je řízen elektronicky, což má za následek velmi pravidelný průběh. Důležitými parametry jsou zde frekvence a amplituda svařovacího proudu a napětí. Charakteristické jsou dvě hladiny proudu, první z nich je nejnižší, tedy základní proud. Druhá hladina je hladina maximální, která vzniká impulzem proudu a nazývá se tedy impulzní.

Při správném nastavení parametrů přenosu je výsledek takový, že za jeden impuls se oddělí právě jedna kapka tekutého kovu z elektrody do svarové lázně, tím lze poměrně dobře ovlivňovat množství odtaveného kovu a množství vneseného tepla. Pro tuto metodu však nelze použít libovolný svařovací zdroj, neboť ten pro to musí být uzpůsoben. [19]

Největší výhodou impulzního přenosu je vysoká kvalita svarové housenky, malý rozstřík a malé množství vneseného tepla. [19]



Obr. 20 – Průběh proudu v závislosti na čase u impulzního přenosu



Obr. 21 – Průběh napětí v závislosti na čase u impulzního přenosu

4.1.3 Ochranné plyny

Pro MIG svařování jsou používány výhradně inertní plyny (nebo jejich směsi), které se pro svařování používají jen dva, tak jak uvádí norma ČSN EN ISO 14 175. Jedním z nich je argon, a tím druhým je helium.

Argon

Argon je vzácný plyn, který tvoří zhruba 0,93 procent zemské atmosféry. Jedná se o bezbarvý plyn, bez zápachu, je nehořlavý, netoxický a nekorozivní. Má větší hustotu než vzduch, takže při svařování v základních polohách klesá směrem dolů a dobře pokrývá svarovou lázeň a chrání svar. Z hlediska svařování jde o nejpoužívanější plyn, především díky tomu, že se dá použít jak samostatně, tak je obvykle používán i jako základní složka většiny směsných plynů. Argon podporuje stabilní oblouk (má nízkou ionizační energii) a kvůli své špatné tepelné vodivosti vytváří široký závar na povrchu svarové housenky. Často se používá ve směsi s héliem. [20][21]

Helium

Helium je jednoatomový, bezbarvý a velice lehký plyn. Je netečný a díky své složité výrobě i velmi drahý. Oproti argonu má helium mnohem horší ionizační vlastnosti, takže hůře zapaluje oblouk a hoří méně stabilně. Oproti vzduchu je lehčí, a proto má tendenci unikat z hubice vzhůru, to znamená, že pro stejný stupeň ochrany, u běžných poloh svařování, musí být nastaven větší průtok plynu než u argonu. Z tohoto důvodu se používá čisté helium jen velmi málo, při svařování metodou MIG tam, kde je potřeba vysoká energie. [21][22]

V případě použití helia jako ochranného plynu, má oblouk při stejných parametrech vyšší teplotu než při použití argonu. To je způsobeno tím, že helium má mnohem vyšší tepelnou vodivost. Díky této vyšší teplotě snižuje porezitu, protože zvýšené teplo napomáhá odstranění vodíku, který je příčinou pórů. [21][22]

4.2 Technologie CMT

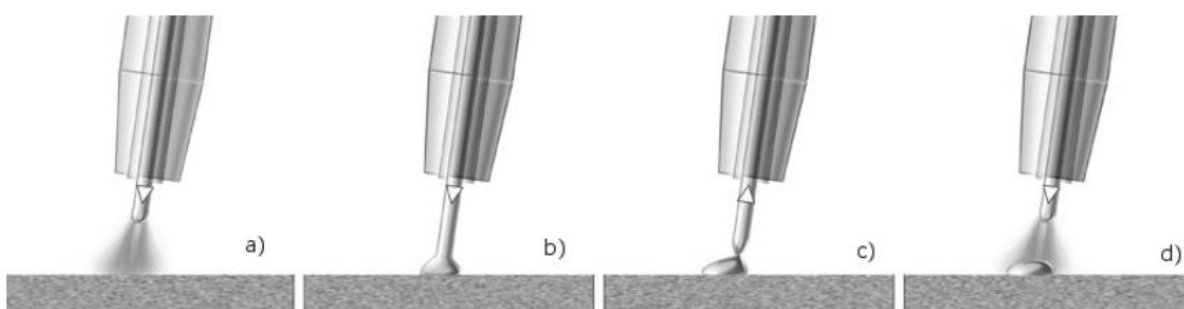
Technologie MIG svařování patří k velmi rozšířeným. Z důvodu neustálého rozvoje svařovacího odvětví se postupně začaly objevovat další možnosti, jak vylepšit již známé metody, a tak vznikla i modifikace MIG metody, označovaná jako proces CMT.

CMT je zkratka ze slov Cold Metal Transfer, což v překladu znamená „přenos studeného kovu“. Jak již tedy název napovídá cílem této modifikace metody MIG svařování je vnést do svarové lázně co nejmenší množství tepla. Tuto technologii vyvinula společnost Fronius, což je firma založena již roku 1945 a v oboru technologie svařování patří k vůbec nejlepším na světě. Důvod, proč došlo k vývoji této technologie byla snaha o spojení materiálů, které se lišily svými vlastnosti, jak mechanickými, tak chemickými i fyzikálními. Dříve se takovéto spoje pojily lepením nebo mechanicky. Firmě Fronius se však povedlo tyto heterogenní materiály spojit svařováním. Konkrétně se povedlo svařit ocel a hliník. [23][24]



Obr. 22 – Logo společnosti Fronius [25]

Princip metody spočívá v tom, že svařovací drát je podáván podavačem klasicky ve směru podávání. To probíhá až do doby, kdy dojde ke kontaktu mezi drátem a svarovou lázní, v tu chvíli totiž dochází ke zkratu. V momentě zkratu se směr podávání drátu otočí a dojde k zatažení drátu směrem dovnitř. Tím, že se drát vzdálí do dostatečné vzdálenosti, dojde ke zrušení kontaktu mezi drátem a svarovou lázní a zanikne zkrat. Následuje opět otočení pohybu podavače a drát je znovu podáván ve směru podávání a celý cyklus se opakuje (obr. 23). [24][26]



Obr. 23 – Princip svařování CMT [26]

Hlavní výhodou této metody je tedy velmi nízké vnesené teplo, to je způsobeno tím, že k zániku zkratu nepřispívá vysoký zkratový proud, ale samotný zánik je řízen odtažením drátu směrem do hubice. To znamená, že není třeba mít vysoký proud během zkratu a také to, že samotný oblouk dodává teplo ve fázi hoření jen velmi krátkou dobu. [26]

Pohyb, který zde drát vykonává se nazývá jako oscilační, jehož frekvence je přibližně 70 Hz. Tato frekvence je však pouze přibližná a v čase se mění (není konstantní), to je způsobeno tím, že pohyb drátu je závislý od vzniku a zániku zkratu. Tento pohyb také napomáhá k odtržení kapky tekutého kovu z konce elektrody (svařovacího drátu). [26]

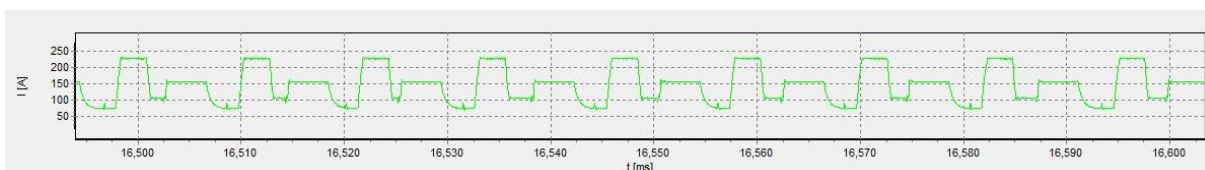
Pro tuto metodu svařování je nutno mít speciální hořák, která bude obsahovat pohon, který řídí pohyb drátu vpřed a vzad, jelikož běžná výbava pro svařování metodami MIG/MAG není schopna zajistit takovýto pohyb. Také je nutno mít software, který řídí celý proces svařování. [26]

Technologie CMT byla uvedena na trh již před téměř 20 lety. Za tuto dobu pokročil vývoj dále a dnes společnost Fronius nabízí svařovací zdroje CMT druhé generace – tzv. CMT Advanced, které jsou uzpůsobeny na ještě přesnější řízení procesu a odtavování. K tomu

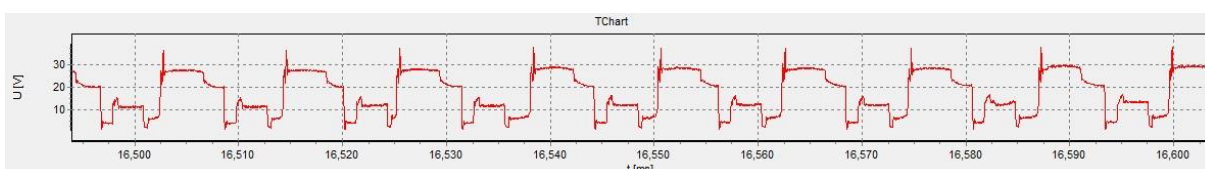
svařovací zdroje využívají speciálních kontaktních průvlaků hořáku a změnu polarity ve fázi zkratu. [24]

4.2.1 Metody svařování CMT

První metou je použití CMT bez jakýchkoliv úprav. Následující obrázky znázorňují průběh proudu a napětí u jednotlivých variant a kombinací využívající CMT proces. Průběhy proudů a napětí byly v tomto případě monitorovány pomocí systému Weldmonitor verze 4.5.

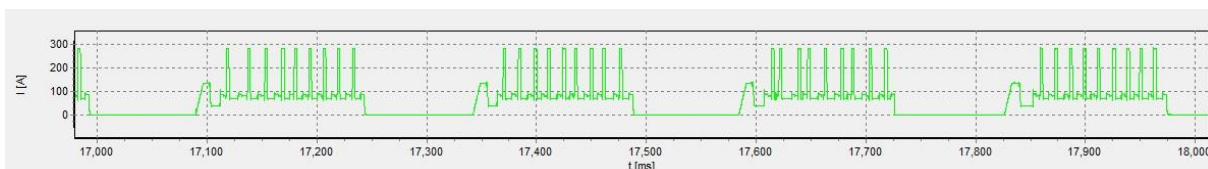


Obr. 24 – Záznam průběhu proudu na čase při CMT

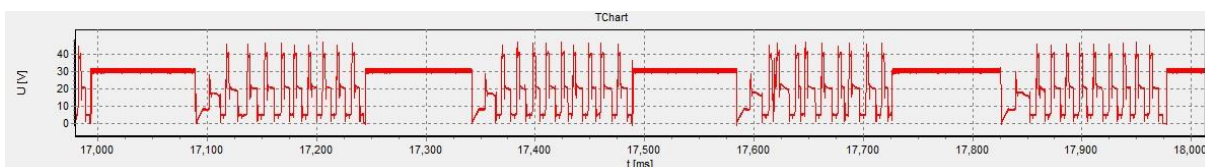


Obr. 25 – Záznam průběhu napětí na čase při CMT

Druhou variantou je tzv. CMT – cycle step. Jedná se o zdokonalení metody CMT. Během svařování totiž probíhá cyklické střídání svařování CMT a pauz s nastavitelnou dobou jejich trvání. Tím lze dosáhnout poměrně přesné definice počtu kapek na svařovací bod. Svářeč tak může vytvářet body libovolné velikosti a přesně je reprodukovat – vzniká tím tak zcela nová úroveň kontroly nad svařovacím procesem (obr. 26 a 27). Díky nastavitelným pauzám vzniká do svaru ještě menší množství vneseného tepla, a tak lze svařovat i ty nejtenčí plechy. CMT – cycle step také zajišťuje vizuálně dokonalé švy. [27]

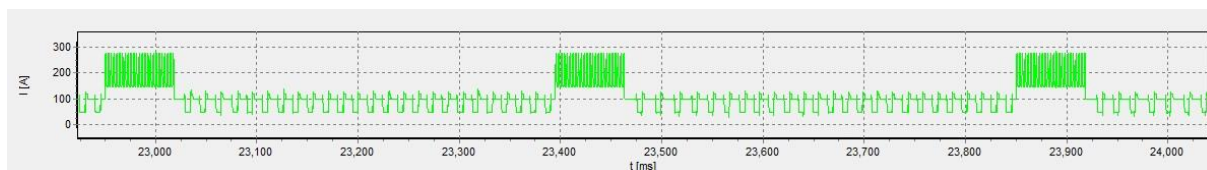


Obr. 26 – Záznam průběhu proudu na čase při CMT – Cycle step

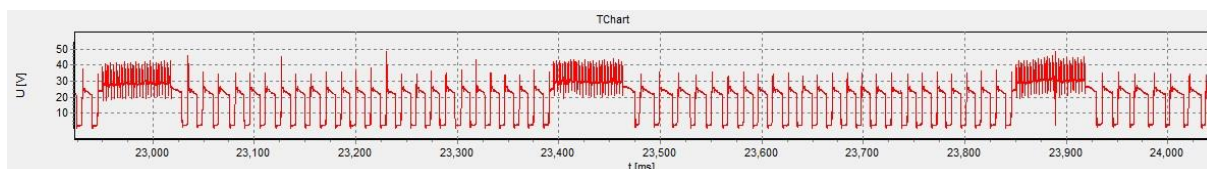


Obr. 27 – Záznam průběhu napětí na čase při CMT – Cycle step

Poslední metodou je CMT – pulz. Jak již název napovídá, jedná se o kombinaci impulzního oblouku a metody CMT. Díky tomu se výrazně zvýšilo procesní okno, to znamená, že k dispozici má svářeč velký energetický prostor. Nabízí totiž kombinaci mezi studeným „čistým CMT“ a relativně horkým pulzním obloukem. Svářeč tak může plynule volit vnos tepla v celém rozsahu CMT a pulzního oblouku, čímž dochází k tomu, že se zvedají výkonnostní hranice procesu CMT, ale zároveň se zachovávají jeho výhody. [28]



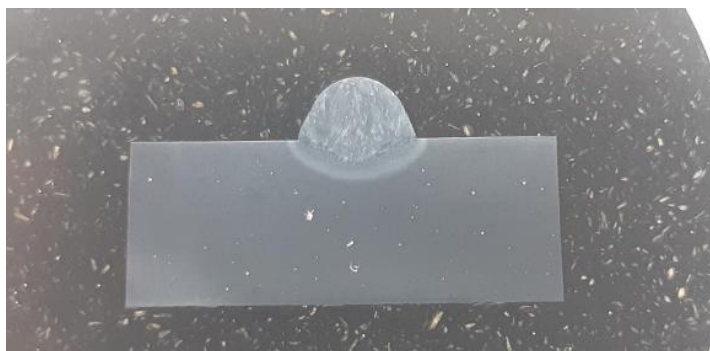
Obr. 28 – Záznam průběhu proudu na čase při CMT - pulz



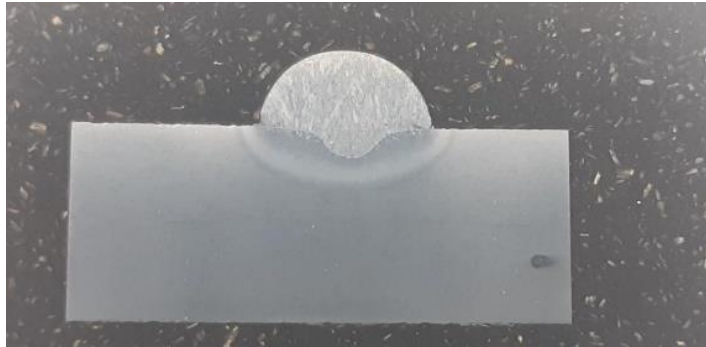
Obr. 29 – Záznam průběhu napětí na čase při CMT - pulz

4.3 Vliv přenosu kovu do lázně na tvar housenky svaru

Jednotlivé varianty přenosu kovu do svarové lázně používají různé proudy a napětí. Není proto divu, že do svarové lázně vniká různé množství tepla, a tak dochází i k vytváření různých geometrií svarových, resp. návarových housenek. Ty mají dle užití metody různý tvar, vzniká i různě velká tepelně ovlivněná oblast či jiná hloubka závaru. Na následujících obrázcích (obr. 30–35) jsou uvedeny tvary návarových housenek při použití různých metod přenosu kovu.



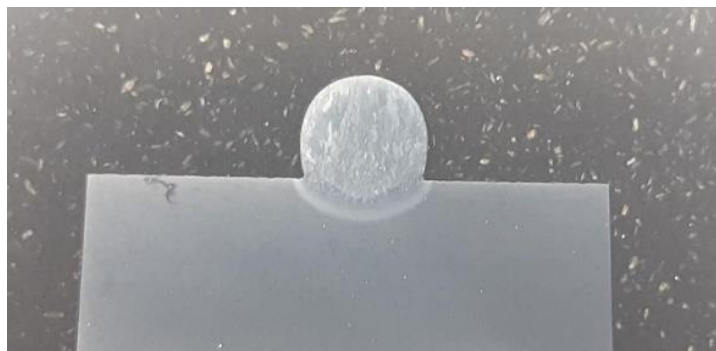
Obr. 30 – Tvar housenky – zkratový přenos



Obr. 31 – Tvar housenky – impulzní přenos



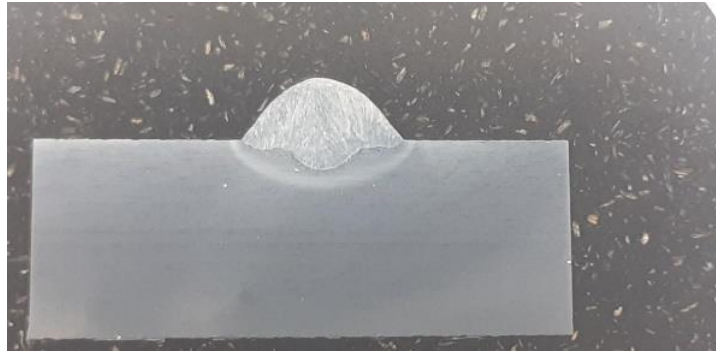
Obr. 32 – Tvar housenky – sprchový přenos



Obr. 33 – Tvar housenky – CMT



Obr. 34 – Tvar housenky – CMT – Cycle step



Obr. 35 – Tvar housenky – CMT – Pulz

Z jednotlivých příčných řezů housenek vyplývá, že metoda CMT (díky malému vnesenému teplu) vytváří poměrně vysoký návar bez velkého tepelného ovlivnění základního materiálu. Právě toto je důvod, proč je tato technologie velmi často používána pro navařování metodou WAAM, a proto byla jedna z jejich variant (CMT – Cycle step) použita v experimentální části diplomové práce.

5. Hliník a jeho slitiny

Kovových materiálů pro zpracování pomocí aditivních technologií je spousta. Rozvoj zaznamenávají samozřejmě ocelové materiály (zejména korozivzdorné), ale postupně se začínají používat i neželezné kovy a jejich slitiny, nikl nebo titan. Jelikož hliník patří obecně mezi nejvíce používané neželezné kovy, je logické, že se vývoj zaměřuje i na tento materiál. I toto byl důvod, proč byl právě hliník vybrán pro experimentální část diplomové práce. Avšak čistý hliník se v technické praxi příliš nepoužívá, neboť má poměrně nízké mechanické vlastnosti, byla pro experimentální část vybrána jedna z jeho slitin. Proto následující kapitola přiblíží vlastnosti hliníku a jeho slitin.

5.1 Vlastnosti hliníku

Hliník je kov stříbřité barvy, který se široce používá v elektrotechnice a ve formě slitin v leteckém a automobilovém průmyslu. Jeho chemická značka je Al z latinského aluminium. Čistý hliník se uplatňuje v podobě tvarových plechů jako velmi odolná krytina nebo ve formě obalových materiálů v potravinářském průmyslu, nicméně se vyrábí i další typy polotovarů jako jsou tyče a trubky. A jelikož má hliník dobrou tvářitelnost, tak se vyrábí i různé typy extrudovaných (vytlačенých) profilů. [29]

Hliník se vyrábí z rudy, jejíž jméno je bauxit. Z něho se hliník dostává elektrolytickou redukcí Al_2O_3 z tekuté soli do tekutého kovu, a to o čistotě 99,3 – 99,8 %. Několikanásobnou elektrolýzou lze získat hliník o čistotě až 99,99 % a pomocí speciální metody rafinace dokonce až 99,9999 %. Tento proces je však spojen s velmi vysokými náklady, a proto se hliník v této formě vyrábí pouze pro potřebu laboratoří či jiné speciální účely. Hlavními nečistotami, které se v hliníku nachází, jsou železo a křemík. [29][30]

Nejširší uplatnění má hliník ve formě slitin, mezi nejznámější patří slitina s mědí a hořčíkem, která je známá jako dural. Tato slitina má v porovnání s čistým hliníkem větší tvrdost i pevnost, ale zároveň si zachovává nízkou hustotu a dobrou odolnost proti atmosférickým vlivům. Nicméně svařitelnost duralu je díky vyššímu obsahu mědi ve slitině obtížná. Mimo duralu se používá i spousta dalších slitin, například s hořčíkem či křemíkem. Tyto slitiny mají své uplatnění pro stavbu lodí, strojů či letadel. [29]

Díky své hustotě $2\,700\text{ kg/m}^3$ se jedná se o velmi lehký nemagnetický kov. Čistý hliník krystaluje v kubické soustavě s plošně středěnou mřížkou, což má za následek velmi dobrou

tvářitelnost za studena. Teplota tavení je 660 °C. Mezi jeho další vlastnosti patří dobrá vodivost elektrického proudu a tepelná vodivost, z tohoto důvodu se hliník používá již ve zmíněné elektrotechnice a používá se tzv. technický hliník, jehož čistota je přibližně 99,5 %. Pevnost technického hliníku v tahu je minimálně 65 a maximálně 95 MPa, což jsou poměrně nízké hodnoty, nicméně vhodným legováním se dají výrazně zvýšit. Důležitou vlastností je odolnost proti korozi. Její příčinou je vytváření tenké (zhruba jen 0,01 μm silné) oxidické vrstvy Al₂O₃ na povrchu hliníku, ta se vytváří samovolně pomocí tzv. pasivace. Tato vrstva má zcela odlišné vlastnosti oproti hliníku pod ní. Její teplota tání je 2 054 °C a její hustota dosahuje hodnot 3 960 kg/m³. Má výbornou odolnost proti korozi. Speciální povrchovou úpravou tzv. eloxováním lze získat několikanásobně silnější vrstvu Al₂O₃ jejíž tloušťka může být až 25 μm, a tím získat odolnější povlak. Nevýhodou této vrstvy je fakt, že je hlavním problémem při svařování hliníku, stejně tak jako dobrá tepelná vodivost, která je z pohledu svařování také nežádoucí. [29][31]

5.2 Značení a rozdělení hliníku

Značení hliníku vychází z normy ČSN EN 1706+A1 – hliník a slitiny hliníku. Základní předpis pro označení je ve tvaru EN Ax – XXXX. Písmeno A znamená aluminium a odkazuje tedy na hliníkový materiál. Druhé písmeno „x“ značí jednu ze 4 skupin, pro kterou je daný materiál vhodný – W (tvářené výrobky), B (nelegované či slitinové ingoty), C (odlitky) a M (předslitiny). [15][33]

Čtyři písmena X za pomlčkou představují číselné označení hliníku a jeho slitin. První číslice udává skupinu slitin dle hlavního slitinového prvku a nabývá hodnot 1-8. Tyto skupiny se též označují jako řady. První řada označuje hliník s minimálním obsahem 99 % a více. Řada 2 jsou slitiny hliníku a mědi, 3 – mangan, 4 – křemík, 5 – hořčík, 6 – hořčík a křemík, 7 – zinek a poslední osmá řada označuje slitiny hliníku s jinými různými prvky. [32]

Druhá číslice ve značení X1XX nabývá hodnot 1–9 a v řadách 2–9 se vztahuje ke změně legování ve vztahu k původnímu legování. U řady 1 je tato číslice vždy 0. Poslední dvě číslice v základním označení nemají žádný zvláštní význam. Slouží pouze k identifikaci různých druhů legování. [32][33]

Jako příklad lze uvést materiál EN AW-1050, kde se jedná o nelegovaný hliník s normální hladinou znečištění, s minimálním obsahem 99,50 %. Druhým příkladem může být materiál EN AW-5754. U tohoto materiálu je hlavním legujícím prvkem hořčík (řada 5), a má

zvýšený obsah zinku až na 0,25 % (x7xx). Jedná se o materiál vhodný pro plechy válcované za tepla i za studena, popřípadě pro výrobu tyčí a trubek. [32]

5.3 Označení stavu hliníku

Ve většině případů nestačí pouze číselné označení, které je uvedeno v předchozí podkapitole, ale přidává se ještě označení stavu daného materiálu. Za základní značení se tedy přidává další písmeno, popřípadě zdali je to nutné ještě jedna nebo více číslic, které označuje úpravy nebo tepelné zpracování. Písmena, která tento stav označují, jsou F, O, H a T. Toto značení vychází z normy ČSN EN 515. [32][35]

Písmeno F označuje stav z výroby. Jedná se o výrobky vzniklé fabričními procesy. U těchto materiálů nejsou žádné požadavky na mechanické vlastnosti a nebyla u nich provedena žádná kontrola teplotních podmínek. [32]

Druhá skupina je značena písmenem O. To označuje materiál, který byl žíhán naměkko. U skupiny materiálů žíhaných naměkko mohou za písmenem O následovat další číslice. Žíhání při vysoké teplotě a pomalu chlazené se označuje O1. O2 říká, že materiál byl tepelně upraven při mechanickém zpracování. V případě, že se jedná o materiál, který byl homogenizován, pak je označen jako O3. [32]

Další skupinou je úprava tvrzením, kterou uvádí písmeno H. Jde o skupinu materiálů, které nebyly tvrzeny legováním, to znamená, že pevnosti bylo dosaženo jen tvrzením v kombinaci s žíháním nebo bez něj. Za písmenem H následují minimálně další 2 popřípadě 3 číslice. První z nich označuje způsob, kterým byla tvrdost dosažena a nabývá hodnot 1–4. Číslice 1 znamená, že materiál byl pouze tvrzen, 2 – tvrzeno na vyšší než je požadovaný stupeň tvrdosti a následně upraveno žíháním na požadovanou tvrdost, 3 – tvrzeno a stabilizováno a 4 – tvrzeno a lakováno nebo natřeno a poté smaltováno. Druhá číslice za písmenem H označuje stupeň vytvrzení a případná třetí číslice značí zvláštní výrobní postup. [32]

Poslední skupina je označena písmenem T. Tvrdosti v této skupině bylo dosaženo pomocí tepelného zpracování. Za písmenem T následuje číslice, která označuje přesný postup tepelného zpracování. Nabývá hodnot 1–9 a uvádí, zda byl materiál kalen, přirozeně, či uměle zestárnut nebo byl upraven rozpouštěcím žíháním, popřípadě vytvrzen. [32]

Zejména tvářené slitiny lze ještě rozdělit na vytvrditelné a nevytvrditelné (tedy zda je lze pomocí tepelného zpracování zpevnit či nikoli). Vytvrzování je kombinace tepelného

zpracování, kterým lze optimalizovat mechanické vlastnosti. V první fázi je provedeno rozpouštěcího žíhání, po kterém přichází prudké ochlazení a následuje přirozené stárnutí. [36]

5.4 Svařitelnost hliníku a jeho slitin

Svařitelností se rozumí komplexní charakteristika daného kovu, která říká, zda je vhodný ke svařování, či nikoli. To je důležité pro to, aby svařenec mohl být vytvořen v požadované kvalitě a měl požadované vlastnosti. V případě, že se jedná o těžko svařitelný kov, může být velmi obtížné až nemožné vytvořit svár požadovaných vlastností. Obdobné tvrzení platí i pro zpracování pomocí navařování. [37]

Svařitelnost čistého hliníku, tedy hliníku, který obsahuje alespoň 99,5 % Al je dobrá a svařování probíhá obvykle hladce bez obtíží. Nicméně je nutné k procesu svařování přistupovat jiným způsobem než u nejběžněji zpracovávaných železných slitin. [37]

U svařování hliníkových slitin je to obtížnější. Tyto slitiny se dají rozdělit do tří skupin: dobře svařitelné, obtížně svařitelné a nesvařitelné. [37]

Největší problém obecně představuje vrstva oxidu Al_2O_3 , která vzniká na povrchu a brání natavení svarových ploch. Menší problém představuje velmi dobrá teplotní vodivost hliníku. V případě hliníkových slitin nelze provést žádný přepočít, tak jako tomu je v případě ocelí, kde lze využít vzorec pro uhlíkový ekvivalent (vzorec 1). Při určování svařitelnosti hliníkových slitin je zásadní znát legující prvky, jejich kombinaci a také poměrné zastoupení v dané slitině. [37]

$$C_e = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{15}$$

(1) [38]

Obecně platí, že materiály na bázi hořčíku a křemíku, tedy slitiny řady 4 a 5, jsou dobře svařitelné. Slitiny řady 6, která je tvořena kombinací křemíku a hořčíku, jsou hůře svařitelné. Slitiny na bázi zinku a mědi jsou svařitelné jen velmi obtížně a některé jsou nesvařitelné. Obecně je vhodné znát složení dané slitiny a v případě svařování dbát doporučení výrobce, zda jsou tyto materiály svařitelné, popřípadě za jakých podmínek je vhodné je svařovat. [37]

5.5 Popis vybraných materiálů

Čistý hliník má poměrně malou pevnost, a proto se používají další prvky pro zlepšení jeho vlastností a vznikají tak slitiny hliníku. Jak již bylo uvedeno v předchozí podkapitole, tak hlavními legujícími prvky jsou: hořčík, měď, mangan, křemík (slitiny známé jako siluminy) a zinek. Z celkové produkce hliníku, se spotřebuje asi 37 % na polotovary čistého hliníku, 15 % na výrobu tvářených slitin, 47 % na slévárenské slitiny a 1 % na zvláštní výrobky. [39]

Pro vlastní experiment této diplomové práce byla vybrána slitina EN AW 5083 jako základní materiál pro navařování metodou WAAM, z důvodu jejího poměrně velkého rozsahu použití a dobré svařitelnosti.

Vlastní návar stěny byl poté vytvořen z materiálu EN AW 5087. Proto se následující podkapitoly budou blíže věnovat právě těmito dvěma vybraným materiálům.

5.5.1 Materiál EN AW 5083

Slitina hliníku EN AW 5083 (AlMg4,5Mn) je známá pro svůj velmi dobrý výkon v extrémních prostředích. Je vysoce odolná proti korozi v průmyslovém prostředí, ale i přímořských oblastech. Její velkou výhodou je, že si zachovává výjimečnou pevnost po svařování. Má nejvyšší pevnost slitin, které nejsou tepelně nezpracovatelné. Obrobitelnost tohoto materiálu je dobrá, až velmi dobrá a jeho schopnost tváření za studena je také poměrně dobrá. Používá se všude tam, kde je očekávána kvalita z hlediska pevnosti a korozní odolnosti jako je stavba lodí, sváření konstrukcí, tlakové nádoby, korby sklápěčů, důlní kontejnery a klece, výroba přístrojů, výroba vozidel, ale má i další využití v oboru strojírenství. [40][41][42]

Tab. 1 - Typické chemické složení materiálu EN AW 5083 [42]

Typické chemické složení materiálu EN AW-5083								
Mn	Si	Cr	Al	Cu	Ti	Zn	Fe	Mg
0.4 - 1.0	0.4	0.05 -0.25	Rem	0.1	0.15	0.25	0.4	4.0 - 4.9

5.5.2 Materiál EN AW 5087

Materiál EN AW 5087 se používá jako svařovací drát hliníkových slitin. Jak vyplývá z jeho chemického značení AlMg4,5MnZr má vysoký obsah hořčíku, a to až do 5 %, i když

typickým obsahem je 4,7 %. Hořčík ve slitině zvyšuje její pevnost. Také je legován zirkoniem, které zlepšuje odolnost proti trhlinám za tepla a při tuhnutí svarového kovu a také vytváří jemnozrnnou strukturu materiálu. Používá se pro stavbu lodí a jiných vysoce pevných konstrukcí, v železničním průmyslu a pro stavbu kryogenních nádrží. [43][44]

Pro experimentální část byl tento materiál dodán ve formě svařovacího drátu od firmy ESAB s označením OK Autrod 5087 o průměru 1,2 mm.

Tab. 2 – Typické chemické složení materiálu EN AW-5087 [45]

Typické chemické složení materiálu EN AW-5087									
Mn	Si	Cr	Al	Cu	Ti	Zn	Zr	Fe	Mg
0.8	0.04	0.08	Rem	0.01	0.08	0.01	0.11	0.12	4.7

6. Termální analýza

Termální analýza je moderní, produktivní způsob hodnocení kvality, který může za určitých okolností nahradit standartní nedestruktivní zkoušky materiálu a stát se tak jejich alternativou. Termografické systémy lze také použít k mapování a měření teplotního ovlivnění. U svarových spojů, tak bude možné přibližně určit i mechanické a strukturní vlastnosti tepelně ovlivněné oblasti. [46]

Termální analýzu lze provádět pomocí infračervené termografie. K ní se používají termokamery a speciální softwary. Jejím výstupem je termogram, který zaznamenává teplotní pole. [46]



Obr. 36 – Ukázka termogramu panelového domu [47]

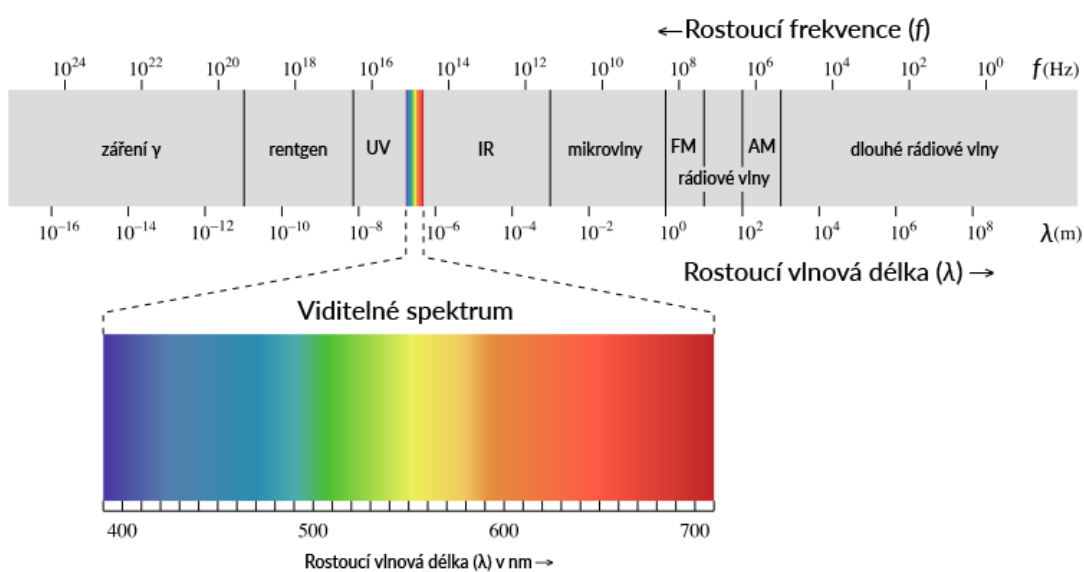
Termální analýza nemusí být prováděna pouze pomocí termografie, ale může být prováděna i dotykovým měřením, ke kterému se obvykle používají termočláanky. Termočlánek není schopen vyhodnotit teplotní pole, tak jako to zvládne termokamera, ale snímá teplotní cykly. Tedy změnu teploty v určitém bodě (ke kterému je připojen). Výstupem záznamu termočláanky je obvykle graf, který znázorňuje změnu teploty na čase. [46]

6.1 Infračervená termografie

Pomocí infračervené termografie lze pozorovat oblast, jak již bylo řečeno, která se nazývá teplotní pole. Jedná se o bezkontaktní měření povrchu tělesa. Termografie obecně pracuje na základě faktu, že každé reálné těleso vyzařuje tepelnou energii v podobě elektromagnetického záření. K detekci toho záření se používají termokamery, které umožňují

zobrazení povrchových teplot. Pomocí této metody lze odhalit plošné i objemové vady, které leží na povrchu či pod povrchem – podobný detekční rozsah má například magnetická zkouška nebo metoda vířivých proudů. Předmět může teplo nerovnoměrně přenášet v místech, které mohou vykazovat vadu (například vměstky či dutiny) nebo tam, kde je materiál porušen. [46]

Pro měření se používá termokamera (IR kamera). Jde o přístroj, který vytváří obraz z infračerveného záření. Na stejném principu pracují i běžné kamery, ty ovšem pracují s oblastí viditelného spektra záření (tedy vlnové délky v rozsahu 390–790 nm). Termokamery (nebo také infračervené kamery) pracují jen v jisté části infračervené oblasti elektromagnetického záření. Pomocí termokamer lze pozorovat teplotní rozsah od -40 do 3000 °C. [46]



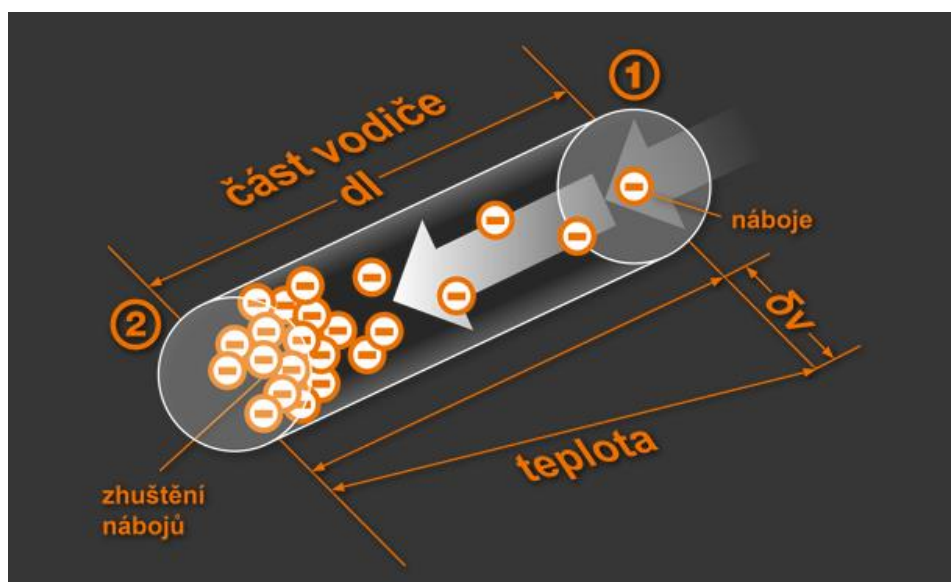
Obr. 37 – Spektrum elektromagnetické vlnění [48]

Toto měření lze využít i v oblasti svařování. Pomocí kamer lze detekovat kvalitu vstupních polotovarů, jako je maximální teplota, tvar předmětu, a to včetně některých materiálů, které se ve viditelném spektru jeví jako průhledné. Pomocí softwarových vyhodnocení se dá pozorovat dynamika chladnutí svarových kovových i nekovových objektů. Měření teplot během procesu svařování může také sloužit jako zpětná vazba pro nastavování technologických parametrů a zároveň jako kontrola kvality prováděného svaru, nebo pro určení velikosti tepelně ovlivněné oblasti. V některých případech lze on-line monitorování využít pro správné nastavení teploty přehřevu, teploty interpass a podobně. [46]

6.2 Termočláanky

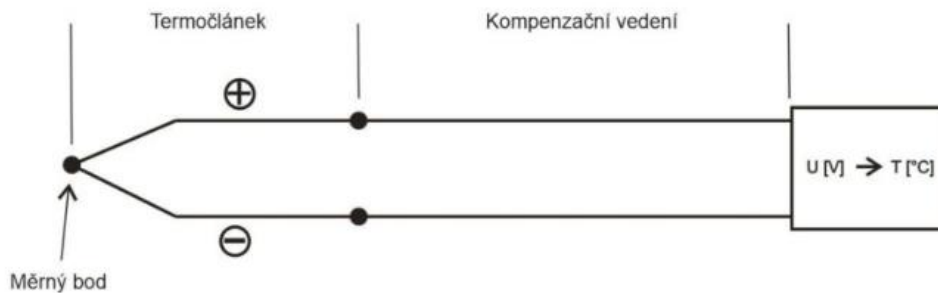
Oproti termokameře, termočlánek dokáže sledovat jen 1 bod a je podmínkou, že s tímto bodem musí být ve fyzickém kontaktu. Pomocí něho tak pozorujeme teplotní cykly daného místa. V případě použití více termočláneků, lze vytvořit něco jako teplotní pole, ovšem stále se jedná jen o měření takového množství bodů, kolik je zapojených termočláneků. [48]

Již v roce 1821 objevil Thomas Johann Seebeck termoelektrický jev. Ten říká, že pokud spojíme dva dráty z různých materiálů, tak na jejich volných koncích můžeme měřit napětí, a to za předpokladu, že se teplota na spojovacím místě liší od teploty na volných koncích drátů. Pokud se změní teplota vodiče, tak dojde uvnitř k posunu elektronové hustoty. Z matematického hlediska se tato změna nazývá teplotní gradient. Na teplém konci dojde z důvodů zvyšující se kinetické energie k úbytku elektronů, na studeném konci k přírůstku elektronů. Každá část vodiče se tak stává zdrojem napětí. [48]



Obr. 38 – Termoelektrický jev [48]

Uspořádání dvou spojených drátů, které jsou na jednom konci svařeny (či zkroucený) se nazývá termočlánek. Rozdíl v součtu napětí v jednotlivých drátech udává měřitelné napětí, které je měřítkem teplotní diference mezi místem spojení obou drátů a koncovkami měřicího přístroje. Na základě termoelektrického napětí (mV) je tedy snadné určit pomocí tabulek z normy DIN EN 60584-1, přesnou teplotu. [48]



Obr. 39 – Schéma termočláňku [49]

Na dráty termočláňků se používá několik materiálů. Podle zvolených materiálů se určuje označení. Každý typ termočláňku (materiálové kombinace) má svůj určitý specifický rozsah měření. Příklad některých typů je uveden v tabulce 3. [49]

Tab. 3 – Přehled typů termočláňků [49]

Přehled typů termočláňků			
Typ	1. drát	2. drát	Rozsah [°C]
B	Pt 30 % - Rh	Pt 6% - Rh	870 - 1700
E	Ni - Cr	Cu - Ni	- 270 - 870
J	Fe	Cu - Ni	0 - 760
K	Ni- Cr	Ni - Al	-200 - 1260
N	Ni- Cr - Si	Ni - Si - Mg	0 - 1260
R	Pt 13 % - Rh	Pt	0 - 1480
S	Pt 10 % - Rh	Pt	0 - 1480
T	Cu	Cu- Ni	-200 - 370

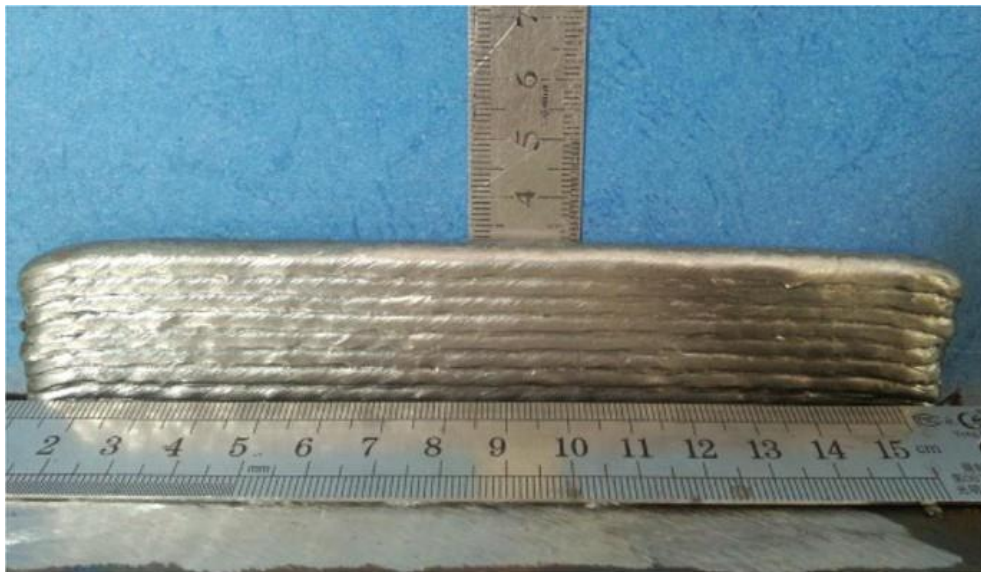
Pro experimentální část této diplomové práce byly pro měření teplot použity termočláňky typu „K“.

7. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Cílem této diplomové práce je navrhnout a zrealizovat experiment, při kterém bude probíhat navařování hliníkové slitiny EN AW 5083 metodou WAAM (MIG – CMT-Cycle step). Během procesu navařování se bude snímat teplotní pole v okolí tvorby jednoduchého návaru pomocí bezdotykového měření termokamerou, které bude „kalibrováno“ dotykovým měřením pomocí termočlánků, pomocí nichž bude zároveň probíhat také měření teplotních cyklů navařovacího procesu.

7.1 Návrh experimentu

Předpokladem experimentu bylo vytvoření navařené stěny na podkladovou desku. Stěna bude tvořena jednotlivými housenkami, které budou navařovány podélně na sebe. Celkový počet housenek použitý pro vytvoření navařené stěny bude 10.



Obr. 40 – Předpoklad vzniklého tvaru stěny během experimentu [50]

Celkový počet takto vytvořených stěn bude 5. Tento počet vychází ze zkoumání teplotních cyklů, neboť při experimentu bude používána různá časová prodleva mezi jednotlivými housenkami, aby bylo možné posoudit vliv vneseného tepla na geometrickou stabilitu a teplotní ovlivnění. Budou probíhat 3 typy měření.

První měření bude probíhat tak, že po navaření každé housenky bude následovat prodleva 1 sekundy. To znamená, že stěna se bude navařovat víceméně kontinuálně. Při

měření budou zapojeny termočlánky a termokamera. Snímání termokamerou bude probíhat shora (nad svarem – viz obr. 41 - vlevo).

Druhé a třetí měření bude probíhat obdobným způsobem jako měření první, s tím rozdílem, že prodleva mezi housenkami bude 60 sekund. Při druhém měření bude termokamera snímat navařování shora, při třetím bude snímat ze strany (boční pohled na svar – viz obr. 42 vpravo). Opět budou po celou dobu zapojeny termočlánky.

Čtvrté měření bude probíhat tak, že po navaření každé housenky bude následovat prodleva, která bude činit 120 sekund. Během čtvrtého měření bude termokamera snímat svar z pozice shora, při pátém měření z pozice ze strany. Celý proces bude stejně jako v předchozích případech monitorován pomocí termočlánků.



Obr. 41 a 42 – Snímání termokamerou shora (vlevo) a ze strany (vpravo)

Cílem experimentu je stanovit teplotní cykly zaznamenané jednotlivými termočlánky a zmapování teplotního pole v okolí svarů pomocí termokamery. Výsledek by měl zobrazit vliv velikosti prodlevy na výši teploty dosažené v materiálu a tím také na geometrickou stabilitu při tvorbě samotné navařené stěny.

7.2 Popis pracoviště

Pracoviště, na kterém bylo realizováno měření je Laboratoř výuky svářečských technologií na fakultě strojní, ČVUT v Praze na Ústavu strojírenské technologie.



Obr. 43 – Robotické svařovací pracoviště FS, UST

7.3 Použité měřicí přístroje a experimentální zařízení

Termokamera FLIR E95

Pro měření byla použita termokamera FLIR E95, pomocí které se měřily teplotní pole, jejichž vyhodnocení probíhalo pomocí speciálního softwaru. Podrobná specifikace kamery je uvedena v tabulce č. 4.



Obr. 44 – Termokamera FLIR E95

Tab. 4 – Charakteristika termokamery FLIR E95 [51]

Technická charakteristika kamery	
Rozlišení senzoru	464 x 348 pixelů
Teplotní rozsah	-20 až -1500 °C
Teplotní citlivost	30 mK
Frekvenční snímkování	30 Hz
Software	FLIR Tools
Přesnost	± 2°C nebo ± 2% z naměřené hodnoty
Stupeň krytí	IP 54
Akumulátor	Li-Ion (2.5 h provozu)
Digitální zoom	1 - 4x
Fotoaparát	5 Mpx
Radiometrické video	Ano
Funkce MSX	Ano
Funkce UltraMax	Ano
Bluetooth / WiFi	Ano
Obrazové poznámky	Ano
Váha	1 kg
Rozměry (D x Š x V)	278 x 116 x 113 mm
Rozsah provozních teplot	- 15 až + 50 °C

Měřicí stanice: Ahlborn Almemo 5690-2

Tato měřicí stanice disponuje velkoplošným grafickým displejem s rozlišením 128 x 128 bodů, její ovládání je velice komfortní, má velkou kapacitu paměti (umožňuje zaznamenat až 6,4 milionu hodnot), rychlost měření (2,5 až 100 měření za sekundu s velkou přesností) a malý rozměr. Taktéž má velký počet vstupů, což znamená, že umožňuje zachycovat i velké množství dat najednou. Pro programování se používá přehledné menu zobrazované na displeji, ve kterém je možné listovat a volit jednotlivé funkce a jejich parametry. [52]

Při experimentu byla použita pro ověření reálné teploty (pro následné správné stanovení emisivity u měření teplotního pole) a zároveň byly měřicí termočlánky typu K, umístěny tak, aby bylo možné snímat teplotní cykly navařovacího procesu.



Obr. 45 – Měřící stanice Ahlborn Almemo 5690-2

6-osý robot FANUC Arc Mate 100iC a Řídící jednotka R 30iA

Jedná se o univerzální šestiosý průmyslový robot s menší nosností, ale s vysokou rychlostí a přesností pohybu při svařování. Celková nosnost koncové šesté osy je maximálně 10 kg, maximální dosah tohoto robotu dosahuje 1 420 mm. [53]



Obr. 46 – 6-osý robot FANUC Arc Mate 100iC

Tab. 5 – Technická specifikace robota FANUC Arc Mate 100iC [53][54]

Technická specifikace robota FANUC Arc Mate 100iC	
Výrobce	FANUC
Hmotnost [kg]	130
Počet os	6
Maximální užitečné zatížení [kg]	12
Pojezd 1 osy [°]	340
Pojezd 2 osy [°]	250
Pojezd 3 osy [°]	447
Pojezd 4 osy [°]	380
Pojezd 5 osy [°]	280
Pojezd 6 osy [°]	540
Dosah [mm]	1420
Řídící jednotka	R 30 iA

Jednoosé polohovadlo FANUC P250

Polohovadlo FANUC P250 má jeden stupeň volnosti a slouží k otáčení pracovního stolu a tím i k polohování svařovaného, resp. navařovaného dílce. K tomuto zařízení je upnutý rám o ploše 1 600 x 1 000 mm, který slouží pro nesení pracovního stolu, který se nachází uvnitř tohoto rámu. Rozsah otáčení je 360° na obě strany. [55]

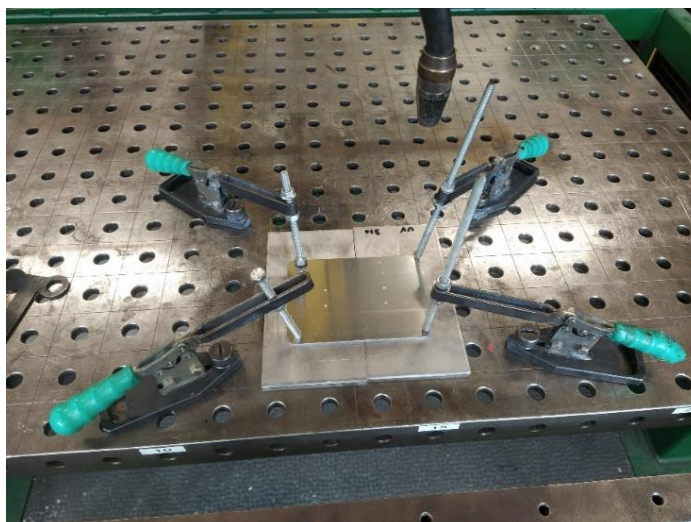
V rámci experimentu nebylo polohovadlo plně využito, protože v rámci experimentu byl navržen jednoduchý typ návaru. Univerzální pracovní stůl upnutý na polohovadle byl však použit pro sestavení navařovacího přípravku.



Obr. 47 – Jednoosé polohovadlo [56]

Stavebnicový přípravek stůl

Stůl slouží k upevnění různých přípravků, kterými je následně přichycen svařovaný dílec. Stůl má stavebnicově uspořádané díry, do kterých se pomocí kolíků přichycují držáky, dorazy, upínky apod.



Obr. 48 – Příklad přichycení hliníkové destičky

Svařovací zdroj (podavače, zásobníky drátu, lahev s ochranným plynem)

Svařovací zdroj Fronius TransPulsSynergic 3200 CMT je určen pro sváření technologiemi MIG a MAG. Pro účely diplomové práce byla použita metoda MIG – CMT (blíže popsána v kapitole 4). Použitý svařovací zdroj je vybaven pamětí, ve které dochází k ukládání předdefinovaných programů. Jeho systém nám také dle zadaných parametrů – jako je technologie svařování, průměr drátu, ochranný plyn, tloušťka svařovaného materiálu – sám doporučí odpovídající parametry svařování. Zdroj tedy obsahuje synergický systém nastavování procesních parametrů. [55]



Obr. 49 – Svařovací zdroj TPS 3200 CMT

Kondenzátorový svařovací zdroj BT – 2

Tento přístroj se používá k navařování termočlánků pro měření teploty. Přístroj funguje na principu kondenzátorového výboje. Velkou výhodou toho přístroje je to, že je akumulátorový, a tudíž lze navařování praktikovat i v místech bez elektrického proudu.



Obr. 50 – Přístroj BT – 2

Tab. 6. – Specifikace přístroje BT - 2

Technická specifikace přístroje BT-2	
Maximální průměr drátu [mm]	1,4
Přibližný počet výbojů při plném nabití	800
Nabíjecí proud [mA]	150
Napájecí napětí - AC [V]	220
Nabíjecí doba [hod]	5
Váha [kg]	2,5
Krytí	IP 23
Rozměry [mm]	130 x 140 x 175

Bezpečnostní prvky (světelná závora, koncový spínač, skener pohybu, centrální odsávání)

Svařovací robotické pracoviště je také vybaveno ochrannými a bezpečnostními prvky, jako je světelná závora bránící přístupu k pracovnímu stolu v průběhu svařování a navařování, koncový spínač, který brání vstupu osoby do operačního prostoru pracoviště během svařování. A skener, který kontroluje, zda se před započítím svařování (navářování) nenachází v pracovním prostoru lidská obsluha. Dále je na pracovišti instalováno centrální odsávání pro odtah vznikajících zplodin.

Protože pracoviště slouží nejen k výzkumným, ale i k výukovým účelům, je nutné při práci na něm používat i osobní ochranné pomůcky. Proto se v těchto prostorách také nachází ochranné svařovací helmy či brýle (vhodné pro kondenzátorové svařování) a v neposlední řadě jsou zde i ochranné závěsy.

Software

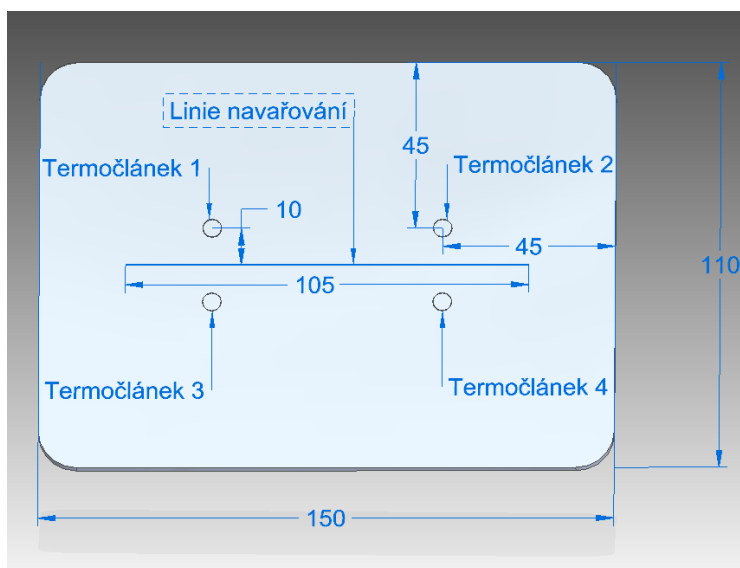
Pro monitorování a záznam hlavních svařovacích parametrů – svařovacího proudu a napětí, byl použit software WeldMonitor 4.5. Ten zaznamenává průběh napětí a proudu ve velmi malých intervalech.

Pro vyhodnocení záznamu termokamery byl použit software FLIR TOOLS, který nabízí širokou škálu možností práce s termografickým záznamem.

Výstupy měřící stanice nevyžadují použití specializovaného softwaru, a tak byly výsledky zpracovány v softwaru MS Excel.

8. Experimentální měření

Před samotným měřením bylo potřeba připravit vzorky. Nejprve byly připraveny hliníkové podkladové desky o rozměrech 150 x 110 x 3 z materiálu EN AW 5083, které byly uříznuty na přesný rozměr tak, aby při každém měření byla velikost základní desky stejná a mohl tak být pozorován vliv a velikost vneseného tepla do základního materiálu.

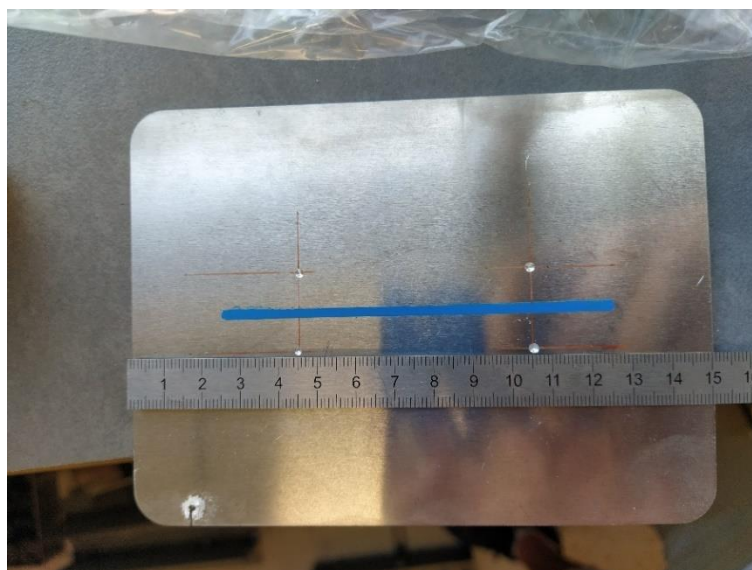


Obr. 51 – Model s rozměry základní desky

Poté bylo nutné vytvořit 4 díry pomocí navrtání. Jak vyplývá z modelu, tyto díry mají přesně danou vzdálenost od sebe a opět jsou na všech deskách umístěny stejně. Díry slouží k umístění termočláneků, a tudíž je důležité, aby jejich vzdálenost byla při každém měření shodná a snímané teploty tak byly odpovídající.

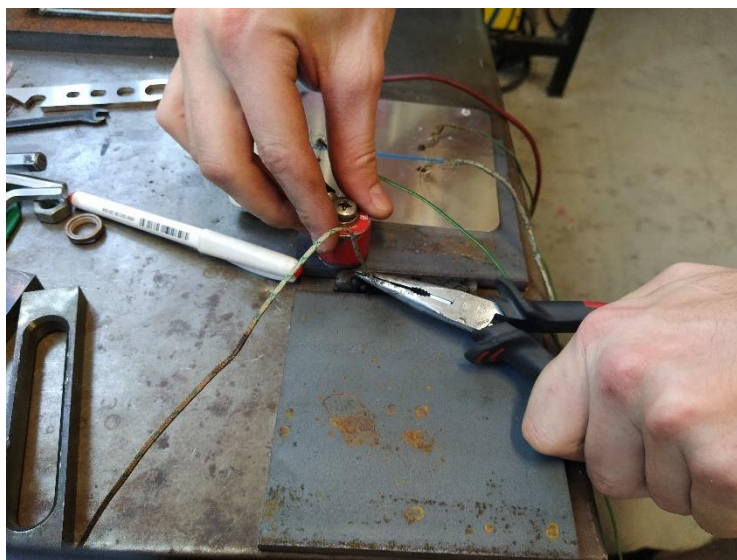
Po vyvrtání děr pro termočláanky byla na vzorku nakreslena modrá čára. Ta je zde z důvodu srovnání vzorku. Před samotným navařením, byla provedena kontrola dráhy hořáku. To je z důvodu, aby na každém vzorku probíhalo navařování ve stejných místech, a tedy i záznamy ze samotných termočláneků měl stejnou vypovídající hodnotu.

Tato nakreslená čára byla následně po kontrole dráhy svařování odstraněna pomocí hadříku s lihem. Tím došlo i k očištění plochy, na které bylo následně prováděno svařování, a tím byl povrch desky připraven.



Obr. 52 – Deska s navrtanými dírami a předkreslenou dráhou svařování

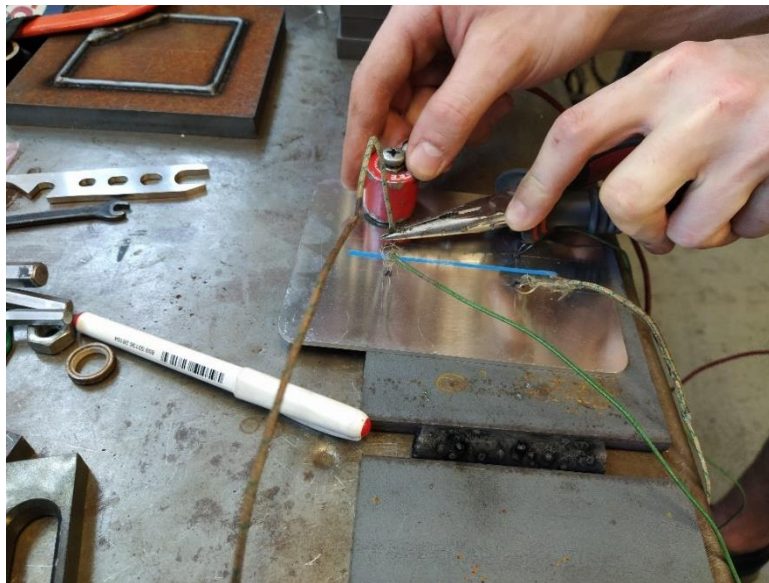
Dalším krokem před začátkem svařování bylo přivaření termočlánků k desce. To probíhalo ve dvou krocích. V prvním kroku byla provedena kontrola termočlánků, zda jsou oba drátky spojeny na svých koncích. V případě, že tomu tak nebylo, byly k sobě pomocí kondenzátorového svařovacího zdroje BT-2 přivařeny.



Obr. 53 – Proces svařování drátků termočlánku

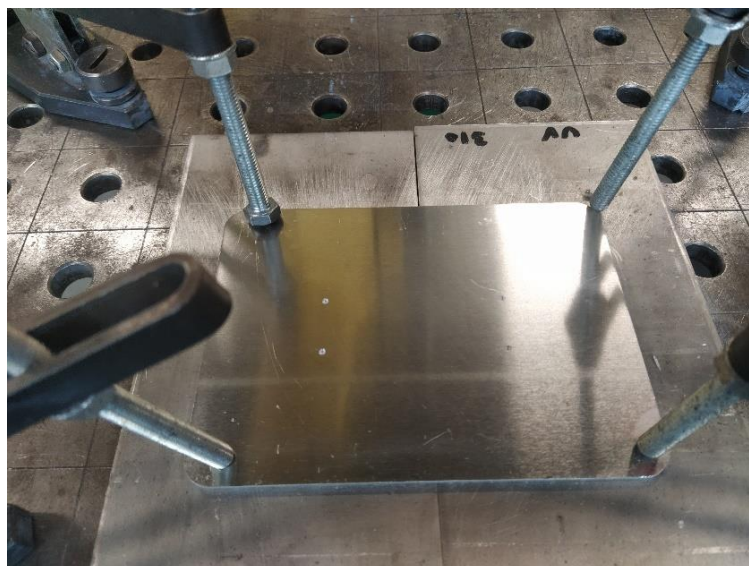
Druhým krokem bylo samotné přivaření drátků do základní desky. K tomuto procesu byl opět použit kondenzátorový svařovací zdroj BT-2. Svařené drátky na konci termočlánku byly drženy v kleštích svařovacího zdroje. Poté byly přiloženy do předvrtané dírky v desce a následně byla k desce přiložena druhá část svařovacího zdroje. Tím došlo k propojení celého

okruhu a k výboji, který přivařil termočlánky s deskou. Celý tento proces probíhal v ochranných brýlích, aby během výboje nedošlo k poškození zraku.



Obr. 54 – Svařování termočlánků a desky

Takto připravená deska byla položena na pracovní stůl. Následně došlo k vyrovnání desky pomocí modré čáry a dráhy pohybu hořáku, jak již bylo popsáno výše, a proběhlo upnutí desky ke stolu tak, aby bylo zamezeno jejímu pohybu během navařování. Upnutí bylo provedeno pomocí upínacích prostředků, tak jak je zobrazeno na obr. 55.



Obr. 55 – Upnutí desky na pracovní stůl

Na závěr byly termočlánky připojeny pomocí kompenzačních kabelů k měřicí stanici Ahlborn Almemo 5690-2, která zpracovávala údaje získané z termočlánků.

8.1 Navařování bez prodlevy (1 sekunda)

Ještě před samotným spuštěním navařování byla připravena termokamera. Ta byla umístěna na stativ a postavena na pracovní stůl. Pomocí stativu byla nastavena vzdálenost objektivu od povrchu na 1 metr a stativ byl vyrovnán tak, aby byl objektiv kolmo nad středem desky, tedy aby směřoval do místa, kde se nacházel střed budoucího návaru (obr. 56).



Obr. 56 – Umístění termokamery pro snímání shora

Vzorek byl přichystaný, vyčištěný a upnutý na pracovním stole. A tak mohlo dojít ke spuštění svařovacího zdroje. Použité svařovací parametry byly:

Proud DC 97,2 A

Napětí 15,6 V

Posuv drátu 5,5 m/min

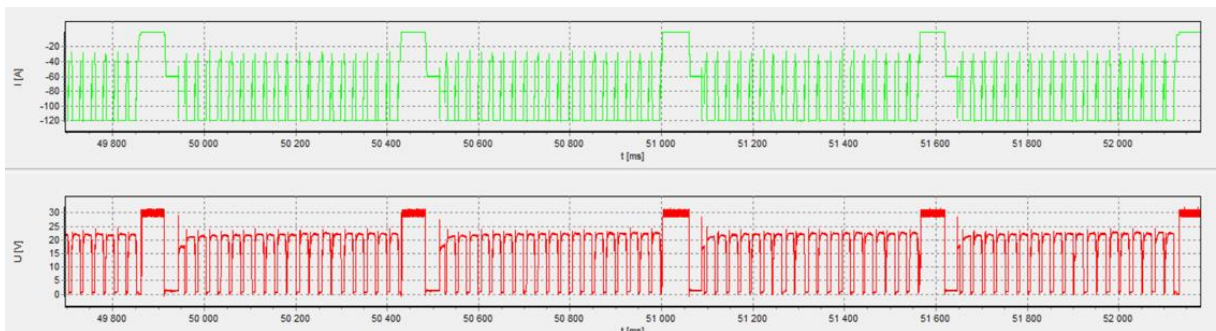
Základní materiál byla slitina EN AW 5083

Přídavný materiál byl drát o průměru 1,2 mm ze slitiny EN AW 5087

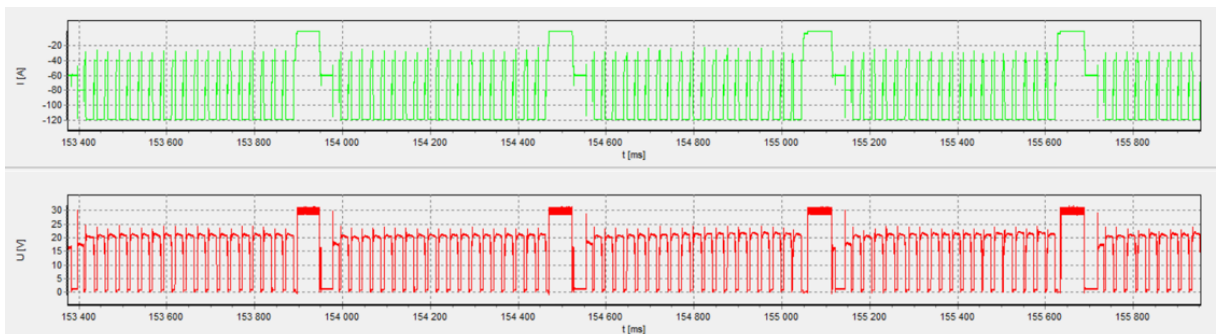
Jak již bylo řečeno, během všech měření byla použita metoda navařování MIG – CMT-Cycle Step. Pro ověření této metody byl při tomto měření zaznamenáván proud a napětí pomocí softwaru WeldMonitor 4.5. Záznam těchto svařovacích parametrů probíhal při navařování housenek číslo: 1, 3, 5, 8 a 10. Průběh jednotlivých housenek je znázorněn na následujících obrázcích (viz obr. 57–61).



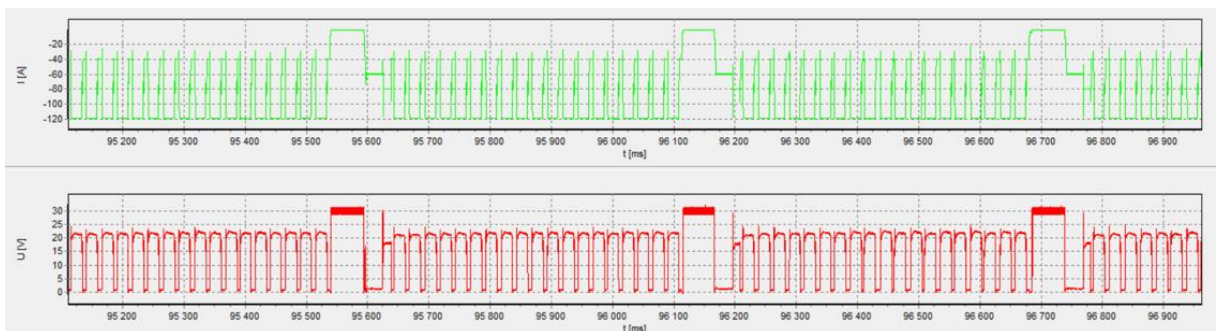
Obr. 57 – Záznam I, U – housenka č. 1



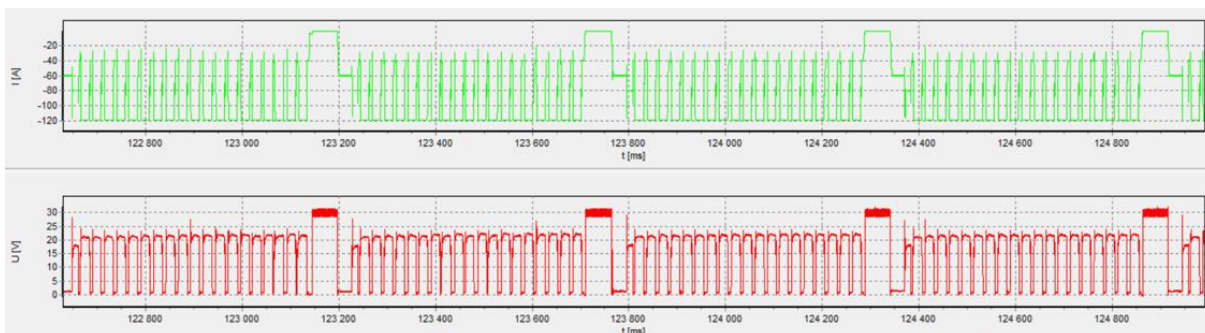
Obr. 58 – Záznam I, U – housenka č. 3



Obr. 59 – Záznam I, U – housenka č. 5



Obr. 60 – Záznam I, U – housenka č.8



Obr. 61 – Záznam I, U – housenka č. 10

Z obrázků vyplývá, že při měření byla skutečně použita metoda CMT – Cycle step, která byla nastavena na 20 cyklů, po kterých následovala prodleva.

Tyto nastavené parametry byly stejné pro všechna měření, a také byly ve všech případech dodrženy stejné podmínky.

První měření probíhalo soustavným navařováním. Při tomto měření tedy byla nastavena prodleva na hodnotu 1 sekundy a housenky na sebe byly skládány jedna na druhou. Ovšem s tím faktem, že vždy po dojetí housenky došlo k přerušení oblouku. Při tomto měření probíhalo snímání termokamerou z pozice shora.

Záznam termočláneků – teplotní cykly



Obr. 62 – Ukázka záznam teploty v závislosti na čase u termočláneků č. 1

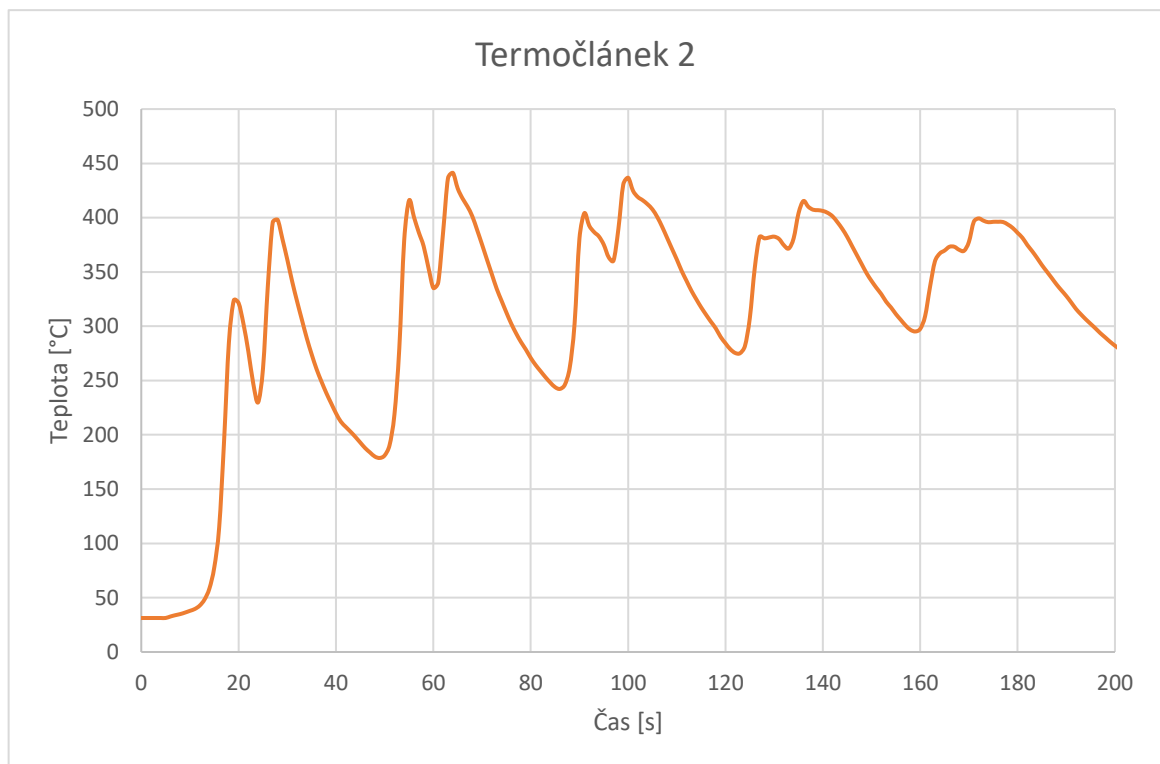
Graf na obr. 62 zobrazuje složený teplotní cyklus, který zaznamenal termočlánek č. 1, který je umístěn dle obr. 51. Tento teplotní cyklus vznikl při navaření 10 návarových housenek, z nichž každá měla délku 105 mm. Směr navařování byl střídavý, to znamená, že první housenka byla navařována směrem zleva doprava a druhá byla navařena v opačném směru. To má za následek zobrazení peaků (maximálních teplot) v této podobě. První peak ukazuje začátek první housenky, jelikož druhá housenka začínala na opačné straně, je mezera mezi peaky velká. Druhý peak ukazuje dokončení druhé návarové housenky, poté přichází krátká prodleva (pokles v grafu) a následuje třetí peak, tedy začátek třetí housenky.

Jelikož měření teploty probíhalo pořád na základové desce (ke které byly připojeny termočlánky), docházelo ke vzdalování bodu navařování od bodu snímání teploty. To způsobuje snižování velikosti jednotlivých peaků i přesto, že maximální teplota v místě navařování by měla být pořád stejná. Na druhou stranu však, minimální prodlevy mezi jednotlivými vrstvy návaru způsobily, postupně se zvětšující minima teplot mezi jednotlivými návary (kumulace tepla v podkladové desce, která se nestihla dostatečně ochladit). Velikost peaků (maximálních teplot) a minimálních teplot mezi jednotlivými návary zobrazuje tabulka 7.

Tab. 7 – Tabulka hodnot termočlánu č. 1

Hodnoty termočlánu 1			
Housenka	Max [°C]	Min [°C]	Pokles [°C]
1	302,4	113,1	189,3
2	381,9	302,0	79,9
3	447,9	209,6	238,3
4	381,5	343,4	38,1
5	452,2	248,1	204,1
6	376,5	353,7	22,8
7	431,8	269,6	162,2
8	367,5	355,3	12,2
9	400,4	282,2	118,2
10	354,8	x	x

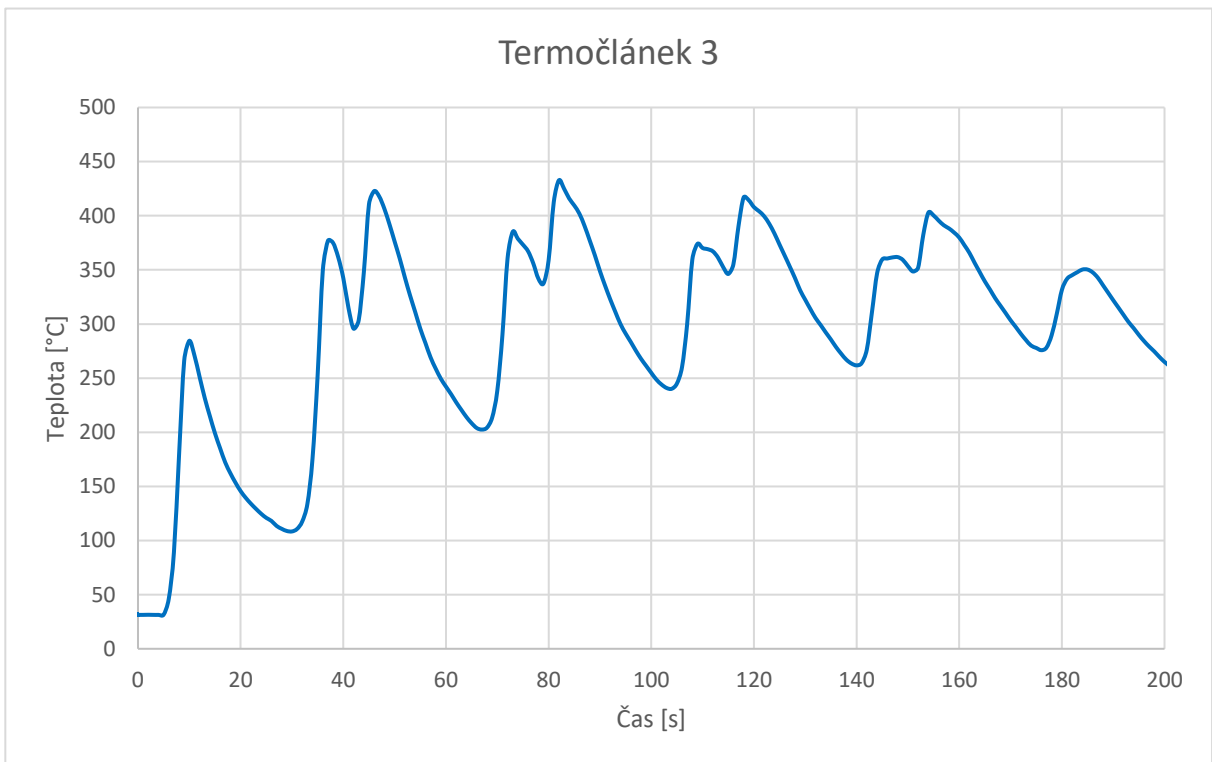
U ostatních termočlánu proběhlo měření obdobným způsobem (jako je popsáno u termočlánu č. 1). Výstupy ve formě průběhů teplotních cyklů jsou uvedeny na obr. 63–65 a hodnoty teplotních extrémů v tabulce 8.



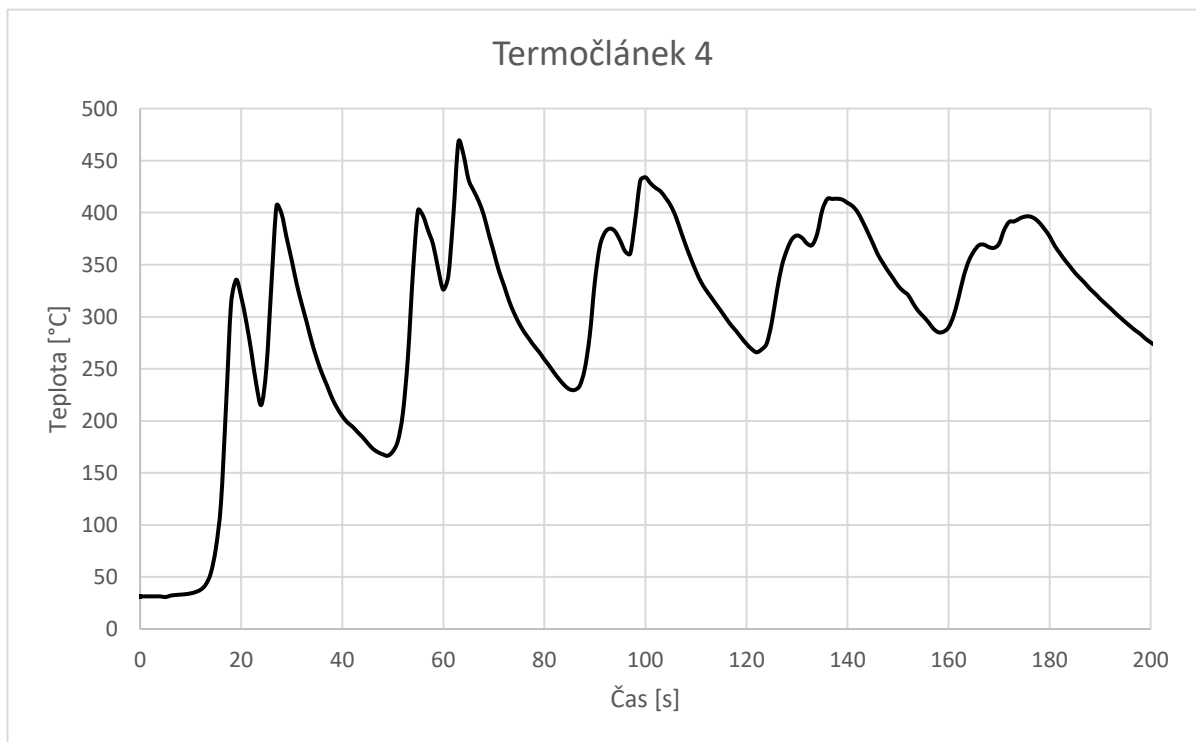
Obr. 63 – Ukázka záznam teploty v závislosti na čase u termočláňku č. 2

Tab. 8 – Tabulka hodnot termočláňku č. 2

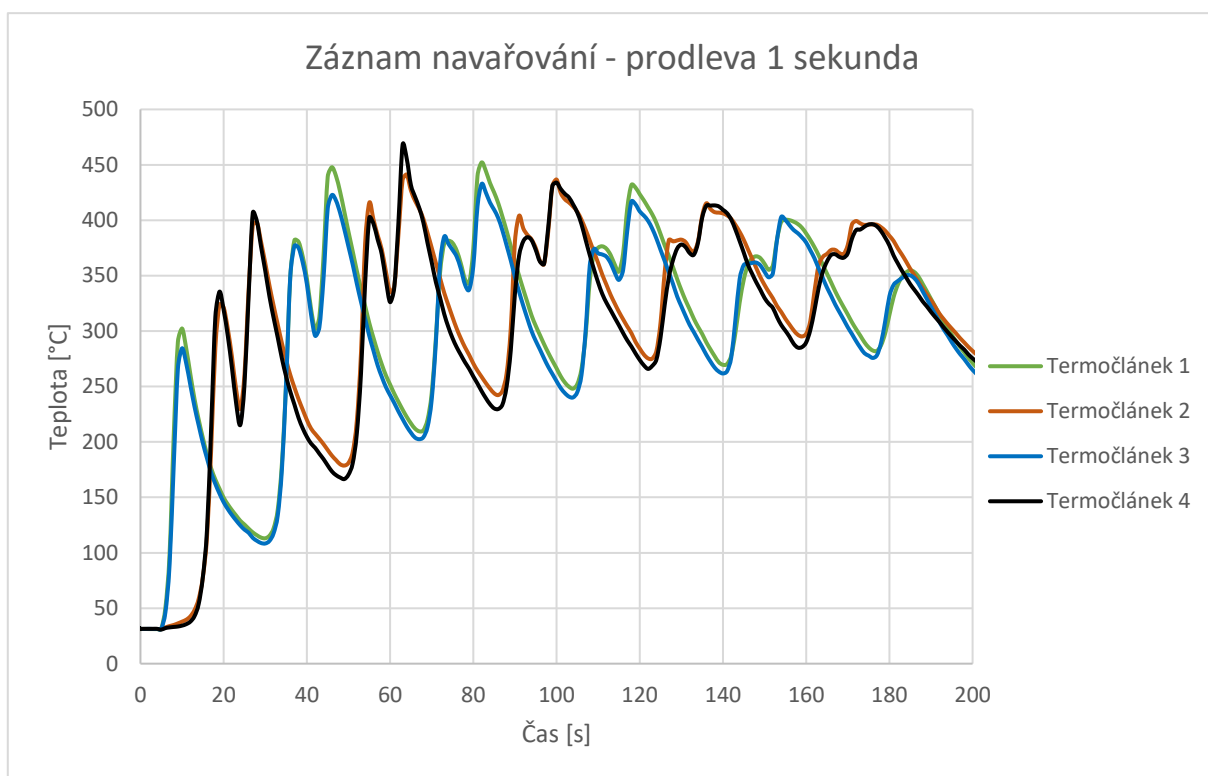
Hodnoty termočláňku 2			
Housenka	Max [°C]	Min [°C]	Pokles [°C]
1	323,8	229,9	93,9
2	398,1	178,7	219,4
3	415,8	335,2	80,6
4	441,3	242,3	199,0
5	404,1	360,5	43,6
6	436,8	275,2	161,6
7	382,5	371,6	10,9
8	415,3	295,2	120,1
9	373,2	369,5	3,7
10	399,3	x	x



Obr. 64 – Ukázka záznam teploty v závislosti na čase u termočláneku č. 3

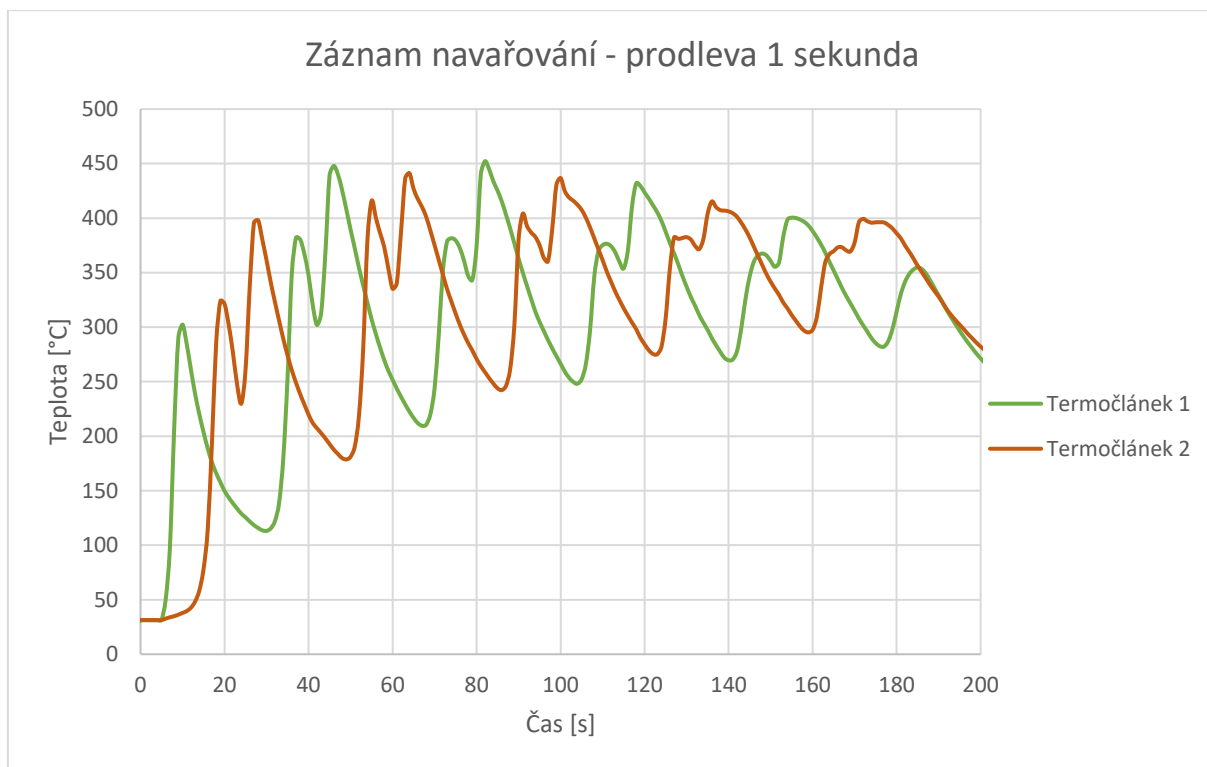


Obr. 65 – Ukázka záznam teploty v závislosti na čase u termočláneku č. 3



Obr. 66 – Záznam termočláneků 1, 2, 3 a 4 při navařování – prodleva 1 sekunda

Na obr. 66 je vidět záznam všech čtyřech termočláneků použitých při měření. Z průběhu je vidět, že termočlánek 1 a 3 a termočlánek 2 a 4 mají prakticky shodný průběh, a tak lze říci, že odvod tepla je symetrický. Pro přehlednější zobrazení budou u dalších grafů v této práci znázorněny tedy pouze termočlánek 1 a 2, tak jako je ukázáno na obr. 67.



Obr. 67 – Záznam termočláneků 1 a 2 při navařování – prodleva 1 sekunda

Záznam termokamery – teplotní pole

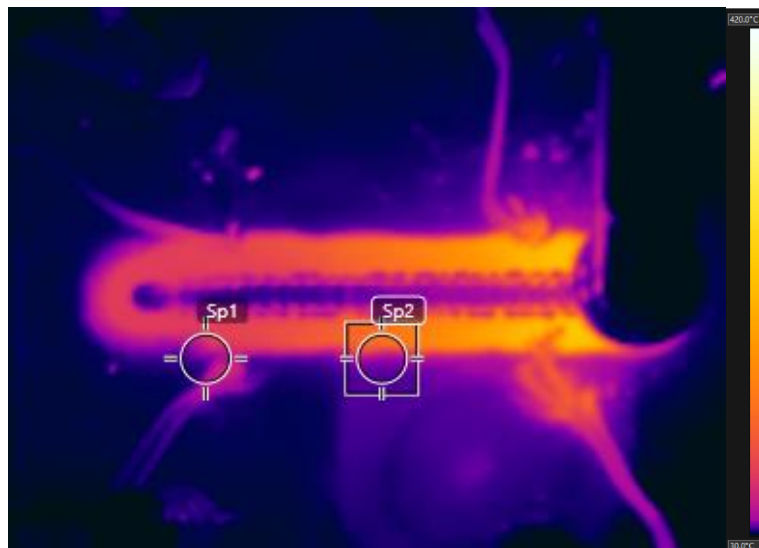
Jelikož do procesu navařování, vstoupily produkty oxidace, které vznikají u AlMg slitin při styku oblouku s oxidickou Al_2O_3 vrstvou, probíhalo vyhodnocení teplotních polí následovně. Nejprve byla pomocí termočláneku provedena kalibrace.

Kalibrace probíhala v několika krocích. Nejprve se termokamera zaměřila na bod, ve kterém byl umístěn termočlánek (sp1). Jelikož teplota v místě termočláneku je pro daný čas známá, lze pomocí softwaru termokamery měnit hodnotu emisivity do té doby, dokud se teplota naměřená termokamerou v patřičném bodě, nebude shodovat s teplotou naměřenou termočlánekem. Tím byla získána hodnota emisivity pro bod, ve kterém se nachází termočlánek. Výsledná emisivita pro měření byla (kvůli černým produktům oxidace) 0,97.

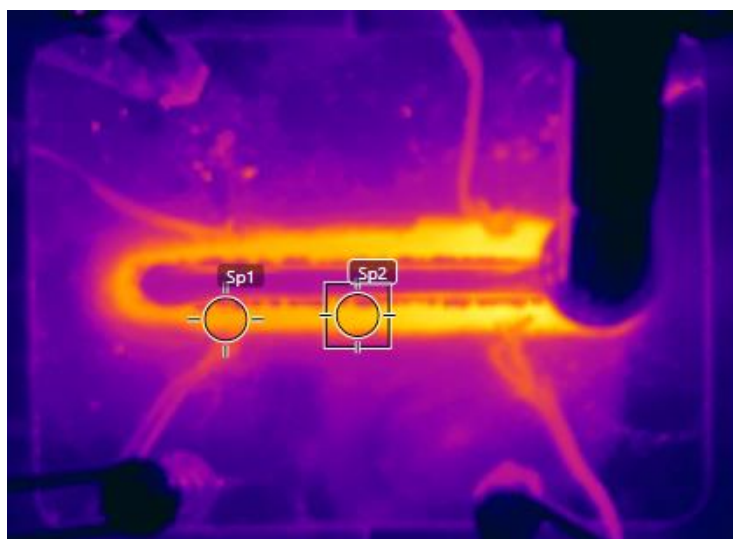
Následně byl nastaven pevný teplotní rozsah vyhodnocovacího softwaru (30–420 °C), a poté byly zkoumány změny v základním materiálu. V těsném okolí návaru, jsou již zmíněné produkty oxidace (nejedná se tedy o tepelně ovlivněnou oblast), v tomto místě došlo uprostřed navařované stěny k vyhodnocení bodu (sp2), pro porovnání teplot po první a po desáté housence.

Poté bylo zkoumáno teplotní pole, za hranicí této zčernané oblasti. Bohužel, jelikož v této oblasti nejsou přítomny žádné termočláneky, nemohlo v těchto místech dojít k přesné

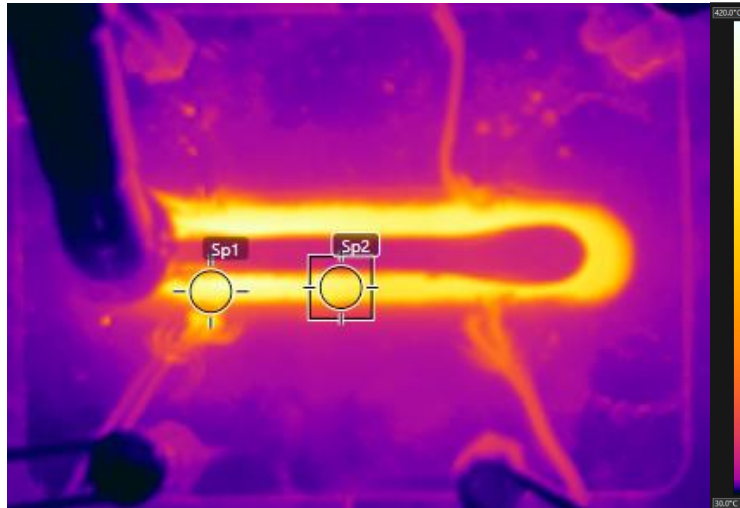
kalibraci, a tudíž nelze s přesností určit, jaké teploty se v této oblasti nacházeli. Jelikož, ale byl při celém měření nastaven stejný teplotní rozsah softwaru, lze alespoň pozorovat rozdíly ve velikosti této oblasti.



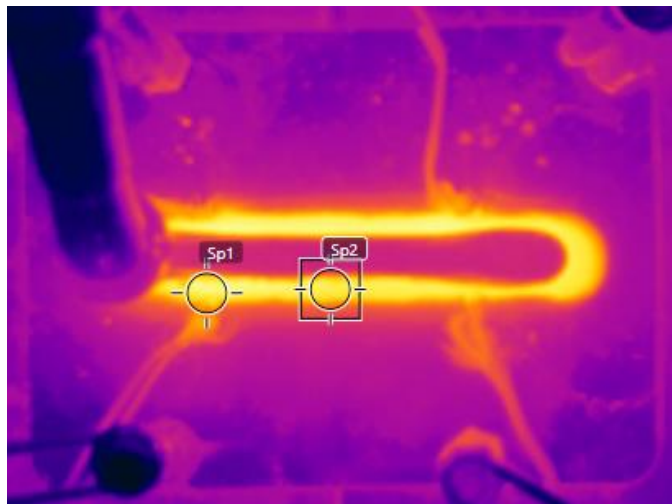
Obr. 68 – Teplotní pole po navařené 1. housence



Obr. 69 – Teplotní pole po navařené 3. housence



Obr. 70 – Teplotní pole po navařené 6. housence



Obr. 71 – Teplotní pole po navařené 10. housence

Teplota v bodě sp2 po první navařené housence dosahovala hodnoty 174,2 °C, zatímco po desáté housence to bylo 338 °C. Z tohoto je tedy jasné, že základní materiál neměl dostatečný čas na odvedení tepla a byl tak držen dlouhou dobu na vysokých teplotách.

Šířka teplotního pole byla (v místě bodu sp2) po třetí housence 48 mm, po šesté housence 57 mm a po poslední desáté housence dokonce 68 mm. I zde je zřejmé, že se teplotní pole s přibývajícimi návarovými housenkami zvětšovalo.

8.2 Navařování s prodlevou 60 sekund

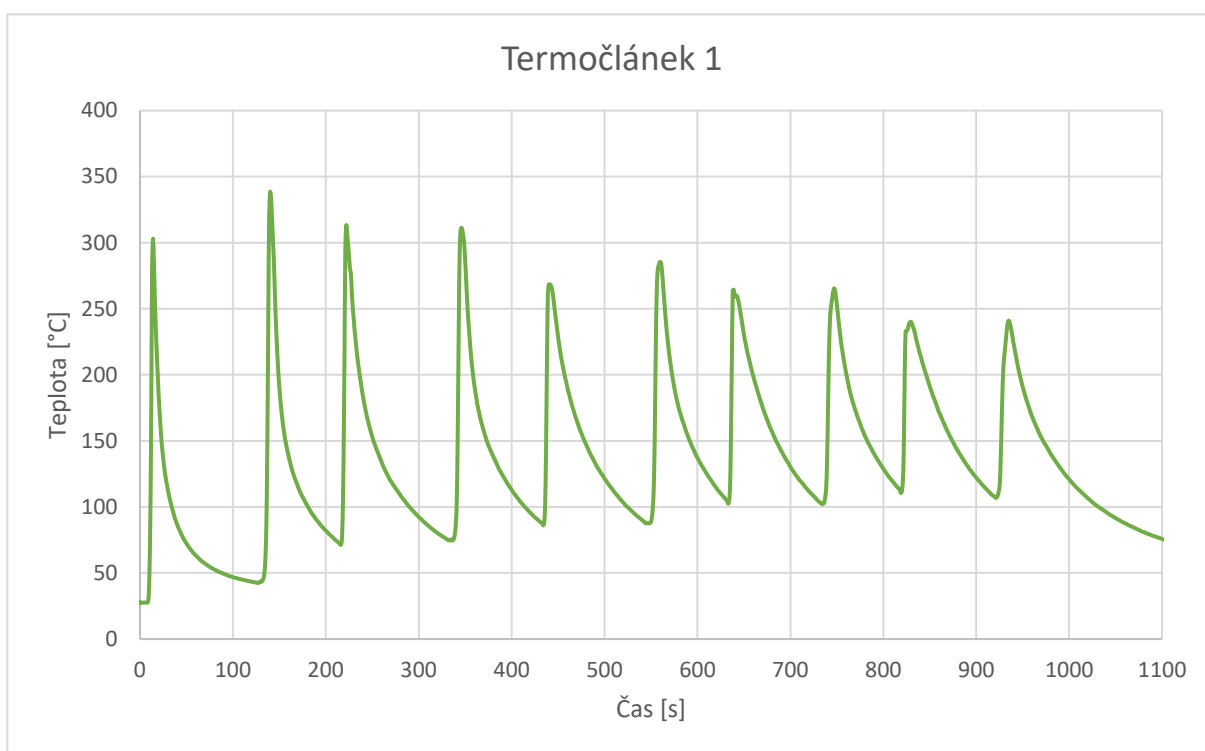
Jak již bylo řečeno výše, v následujících měřeních byl upraven program svařování tak, že po každé housence následovala časová prodleva 60 sekund.

8.2.1 Snímání teplotního pole shora

První měření s prodlevou 60 sekund opět proběhlo pomocí snímání termokamery shora a celý proces byl monitorován termočláanky, které byly umístěny ve stejné vzdálenosti jako u předchozího měření.

Záznam termočláanky – teplotní cykly

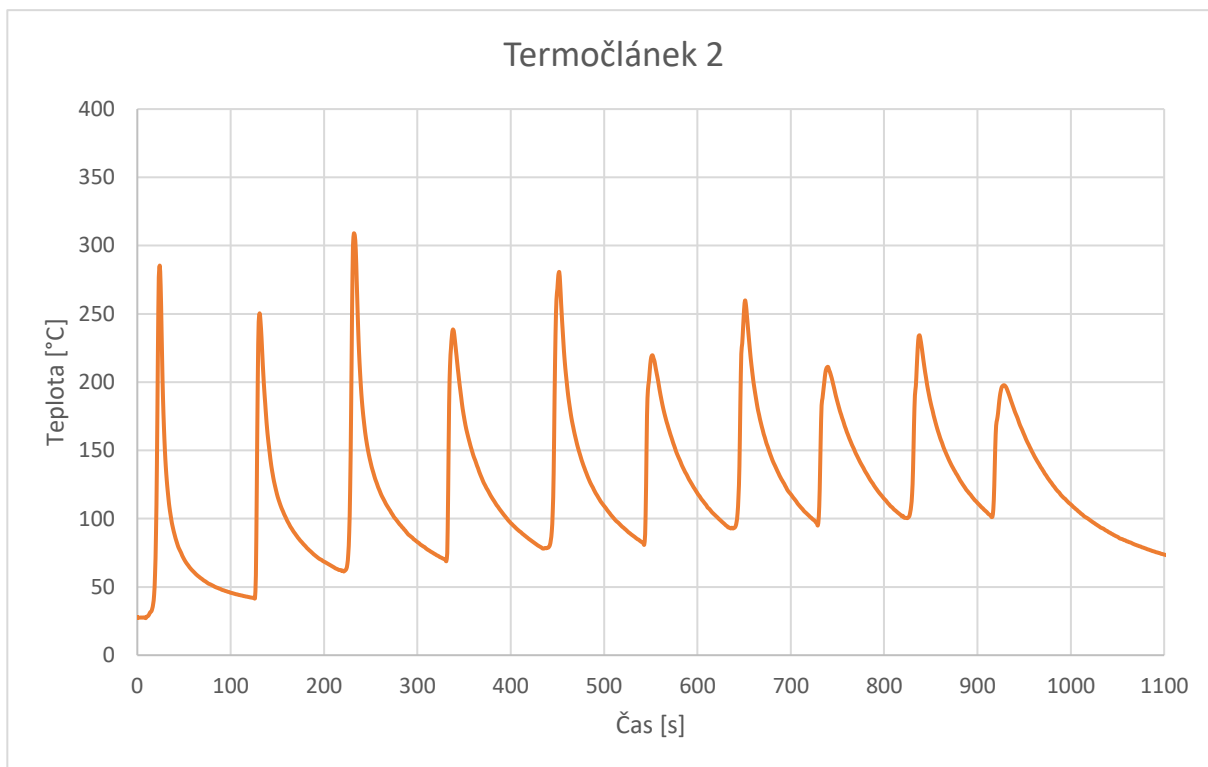
Níže jsou opět uvedeny grafy (obr. 72 a 73), které byly vytvořeny z hodnot naměřených pomocí termočláanky během měření.



Obr. 72 – Ukázka záznam teploty v závislosti na čase u termočláanky č. 1

Tab. 9 – Tabulka hodnot termočláanky č. 1

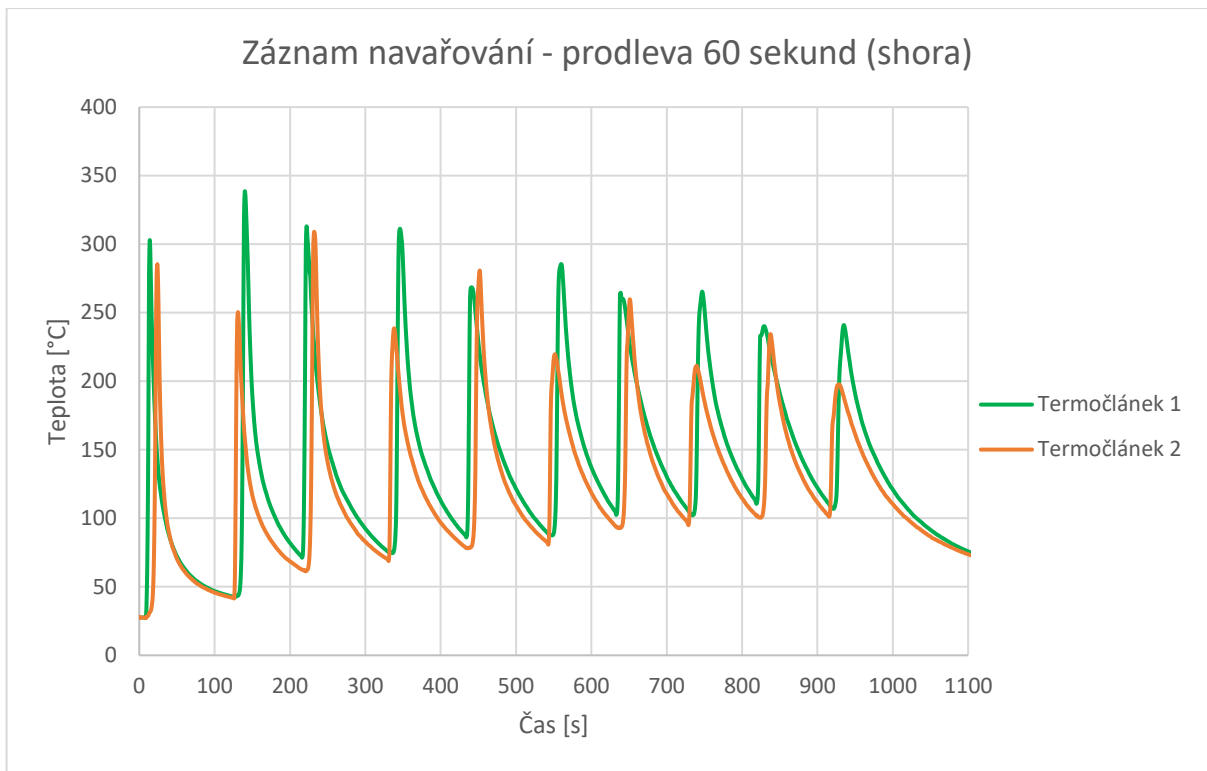
Hodnoty termočláanky 1			
Housenka	Max [°C]	Min [°C]	Pokles za 60 s [°C]
1	303,0	42,3	260,7
2	338,2	71,2	267,0
3	313,0	74,6	238,4
4	311,3	86,0	225,3
5	268,5	87,5	181,0
6	285,5	102,4	183,1
7	264,5	102,1	162,4
8	265,4	110,5	154,9
9	240,0	106,8	133,2
10	241,0	125,2	115,8



Obr. 73 – Ukázka záznam teploty v závislosti na čase u termočláneku č. 2

Tab. 10 – Tabulka hodnot termočláneku č. 2

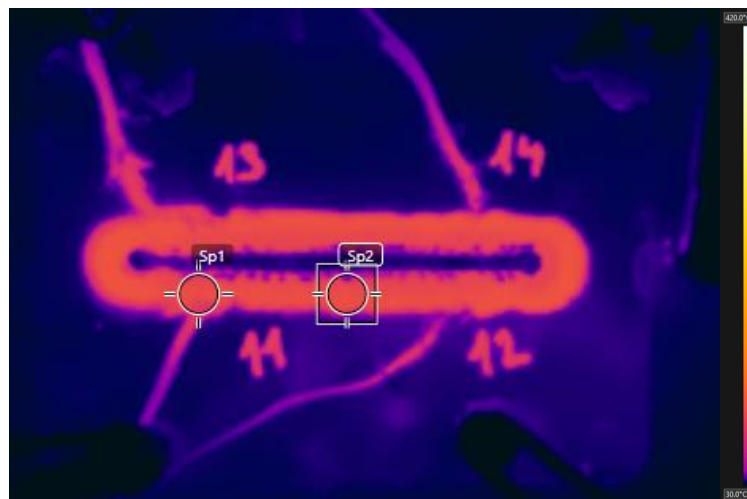
Hodnoty termočláneku 2			
Housenka	Max [°C]	Min [°C]	Pokles za 60 s [°C]
1	285,4	41,5	243,9
2	250,4	61,3	189,1
3	308,9	68,9	240,0
4	238,5	78,1	160,4
5	280,6	80,9	199,7
6	219,6	92,8	126,8
7	259,8	95,1	164,7
8	211,1	100,4	110,7
9	234,3	101,2	133,1
10	197,7	111,0	86,7



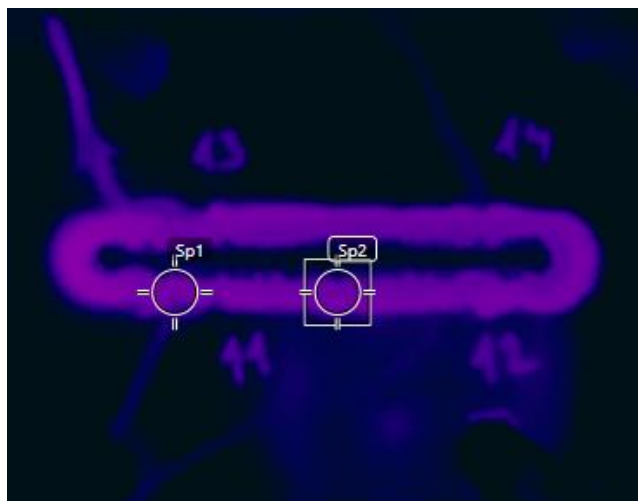
Obr. 74 – Záznam termočláneků navařování – prodleva 60 sekund (shora)

Záznam termokamery – teplotní pole

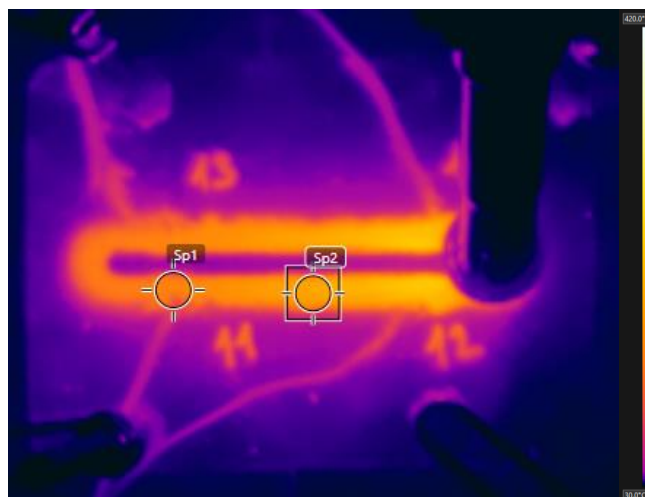
Měření teplotních polí zde probíhalo obdobným způsobem, jako tomu bylo v předchozím případě.



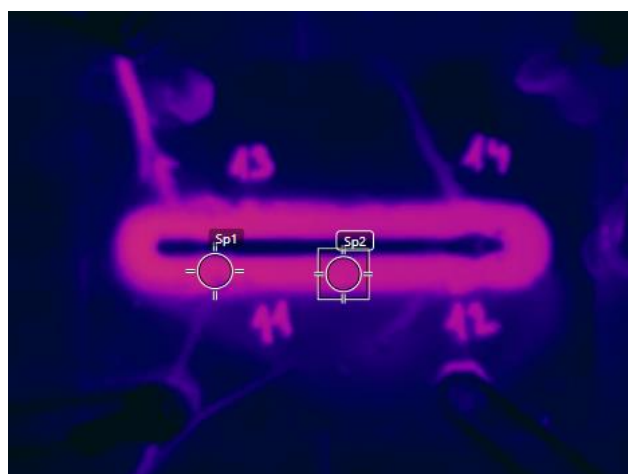
Obr. 75 – Teplotní pole po navařené 1. housence



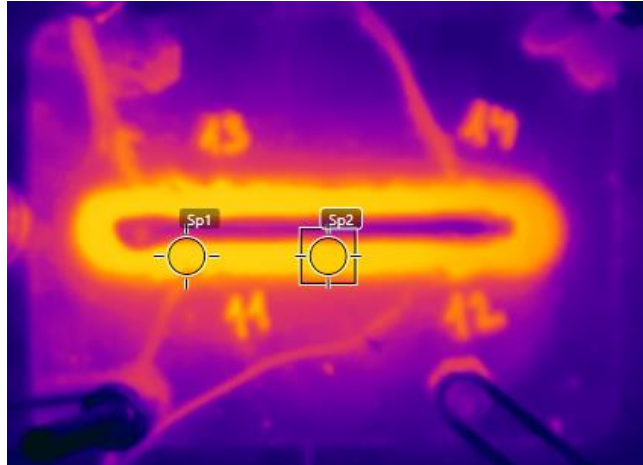
Obr. 76 – Teplotní pole před navařením 2. housenky



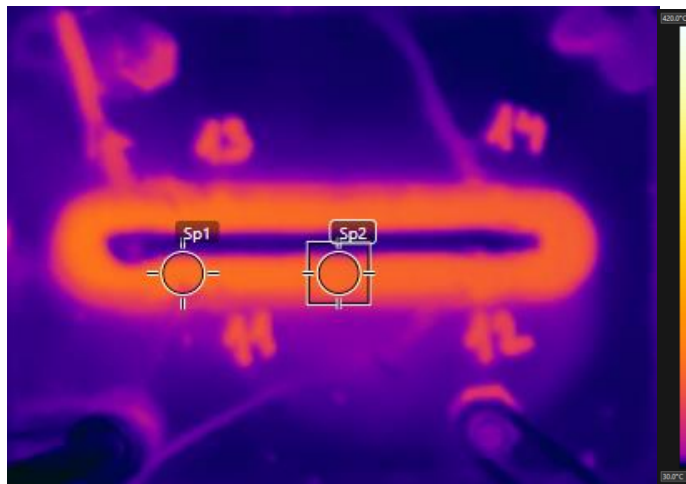
Obr. 77 – Teplotní pole po navařené 3. housence



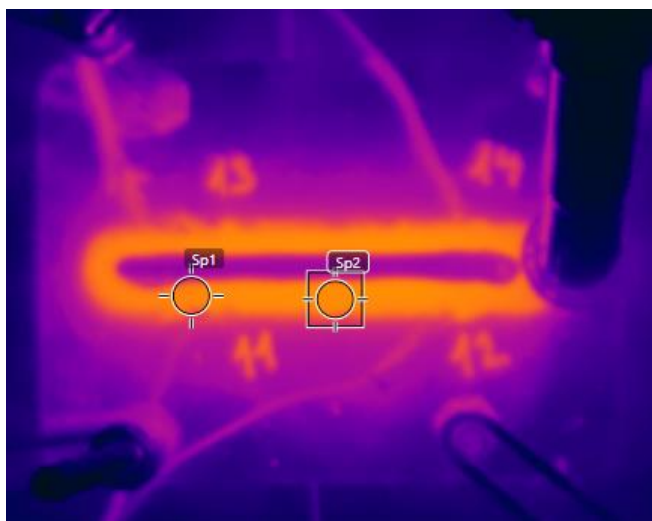
Obr. 78 – Teplotní pole před navařením 4. housenky



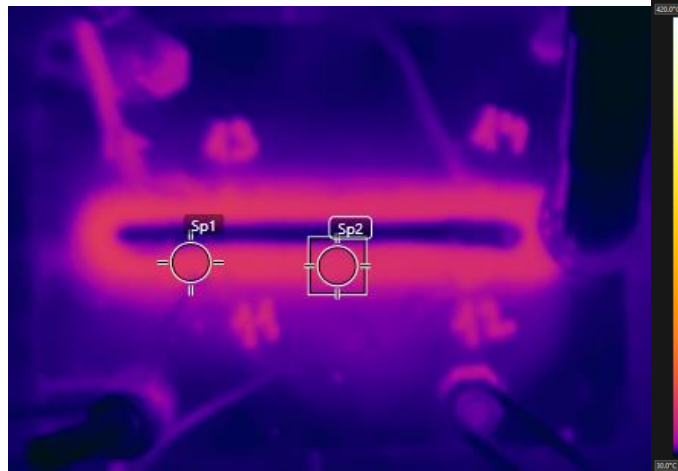
Obr. 79 – Teplotní pole po navažené 6. housence



Obr. 80 – Teplotní pole před navažením 7. housenky



Obr. 81 – Teplotní pole po navažené 9. housence



Obr. 82 – Teplotní pole před navařením 10. housenky

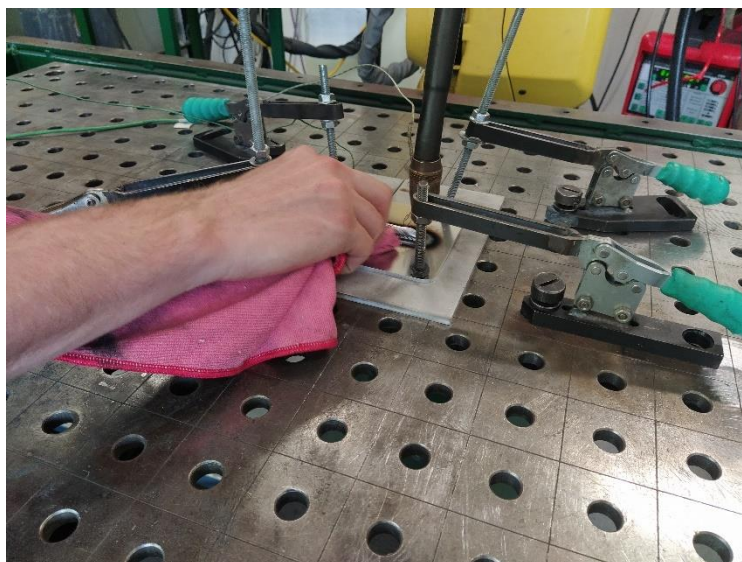
Teplota v bodě sp2 byla měřena opět po první (před druhou) a po deváté (před desátou) housenkou. Po první byla její hodnota 124,6 °C a po prodlevě klesla na 66,4 °C a. Po deváté byla teplota 207,4 °C a během prodlevy klesla na 104,9 °C. To znamená, že s přibývajícimi návary se teplota v oblasti okolo navařované stěny zvedala, z čehož vyplývá, že časová prodleva nebyla zcela dostatečná.

Šířka teplotního pole byla po navaření třetí housenky 46 mm, během 60sekundové prodlevy se její šířka zmenšila na hodnotu 24 mm. Během navařování deváté housenky dosáhla šířka teplotního pole 52 mm a po prodlevě klesla na 34 mm.

8.2.2 Snímání teplotního pole ze strany

Měření probíhalo obdobně jako měření předchozí, pouze termokamera byla umístěna z pozice ze strany.

Při tomto měření došlo k jistým úpravám během měření. Jelikož vzniklá vrstva produktů styku s oxidační vrstvou, která se usazovala na vytvářející se stěně, měla velký vliv na pozorování pomocí termokamery, byla tato vrstva po každé housence očištěna pomocí hadříku.

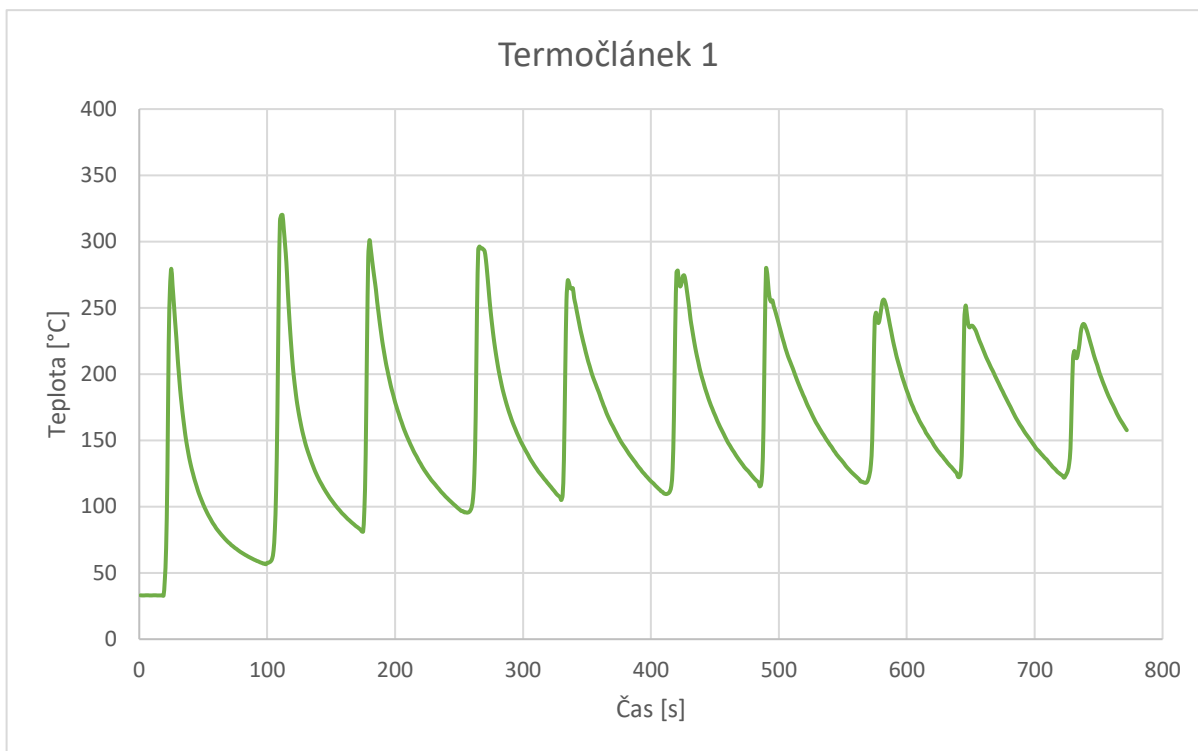


Obr. 83 – Proces odstranění vrstvy černého prachu mezi housenkami

Aby mohl být celý proces čištění přístupný, bylo rozhodnuto, že termočlánky, které byly umístěny na straně, odkud pohlížela termokamera, budou pro toto měření odstraněny. Z tohoto důvodu tedy byly pro měření použity jen 2 termočlánky (konkrétně termočlánky č. 1 a 2).

Záznam termočlánků – teplotní cykly

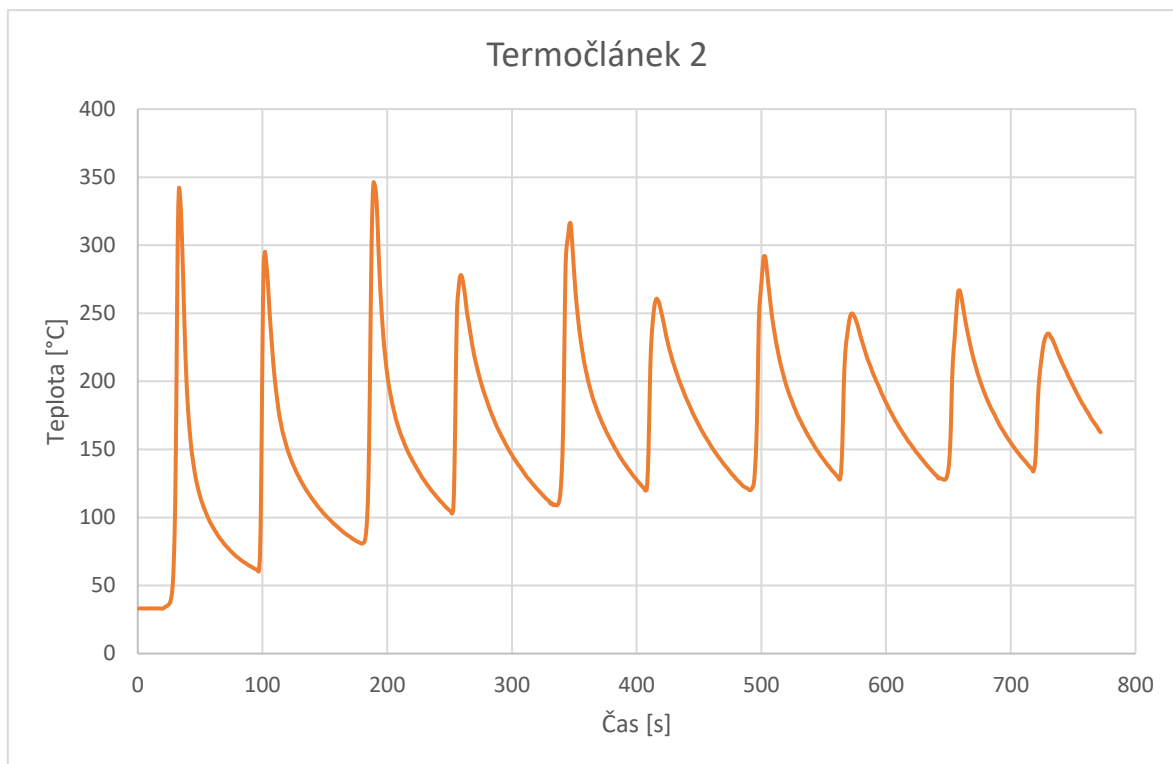
Zde jsou uvedeny grafy (obr. 84 a 85), které byly vytvořeny na základě hodnot získaných termočlánky během měření. Z technických důvodů, byly termočlánky vypnuty po provedení 10. housenky, a tak není u toho měření záznam chladnutí. Je však zřejmé, že proces chladnutí by probíhal obdobně, jako tomu bylo u předchozího měření.



Obr. 84 – Ukázka záznam teploty v závislosti na čase u termočláneku č. 1

Tab. 11 – Tabulka hodnot termočláneku č. 1

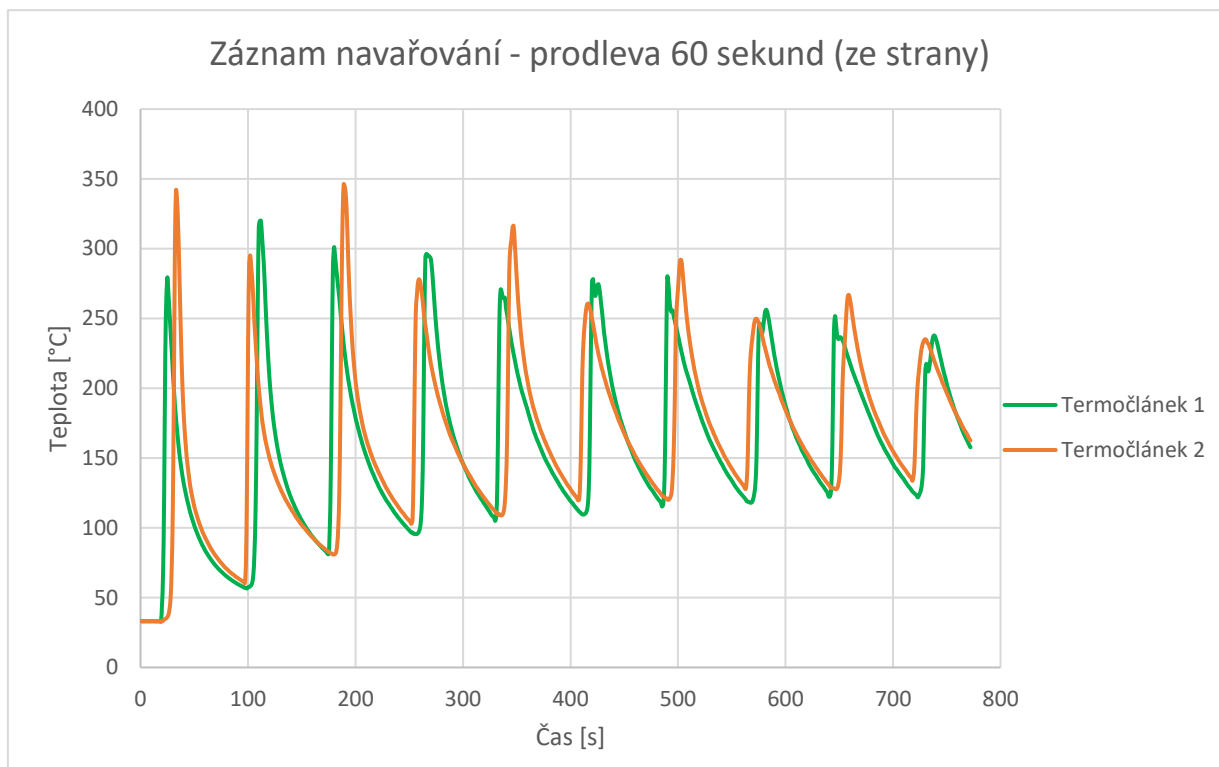
Hodnoty termočláneku 1			
Housenka	Max [°C]	Min [°C]	Pokles za 60 s [°C]
1	279,5	56,5	223,0
2	320,0	81,2	238,8
3	301,0	95,5	205,5
4	296,3	105,0	191,3
5	270,7	109,5	161,2
6	278,2	115,3	162,9
7	279,7	118,0	161,7
8	256,3	122,3	134,0
9	251,7	121,8	129,9
10	237,8	x	x



Obr. 85 – Ukázka záznam teploty v závislosti na čase u termočláneku č. 2

Tab. 12 – Tabulka hodnot termočláneku č. 2

Hodnoty termočláneku 2			
Housenka	Max [°C]	Min [°C]	Pokles za 60 s [°C]
1	341,3	60,4	280,9
2	295,2	80,9	214,3
3	346,1	102,9	243,2
4	278,1	108,9	169,2
5	316,3	119,7	196,6
6	260,7	120,0	140,7
7	291,8	127,9	163,9
8	249,8	127,7	122,1
9	266,8	133,7	133,1
10	235,1	x	x

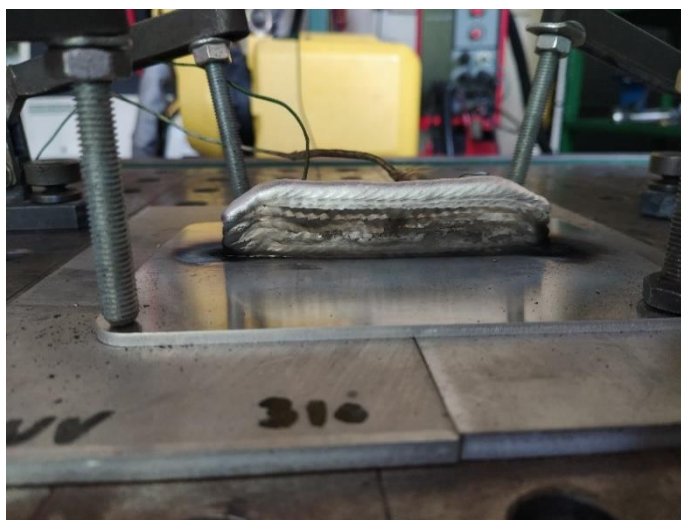


Obr. 86 – Záznam termočláneků navařování – prodleva 60 sekund (ze strany)

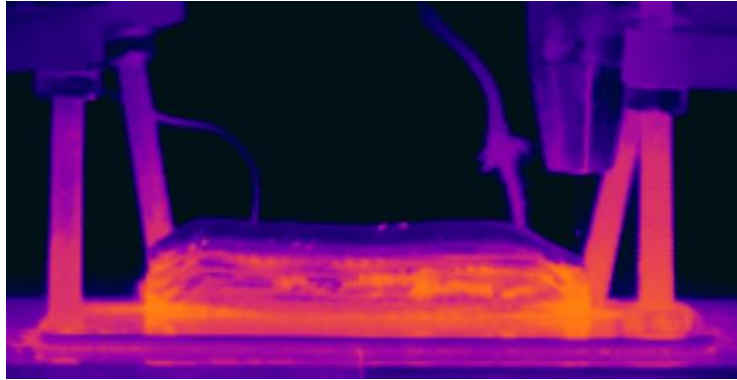
Záznam termokamery – teplotní pole

U tohoto měření, jak již bylo řečeno, byly zapojeny jen 2 termočláanky. Jelikož se jednalo o termočláanky, které byly umístěny za navařovanou stěnou, nemohla být provedena kalibrace v softwaru FLIR Tools, a proto zde nemohlo být provedeno vyhodnocení.

Bohužel, ani pokus o utírání vzniklé vrstvy nepřinesl kýžený efekt, neboť i tak byl povrch navařené stěny různě barevný, a tudíž emisivita v různých místech byla jiná a nemohlo tak dojít k přesnému vyhodnocení.



Obr. 87 – Výsledná navařená stěna po procesu čištění po každé housence



Obr. 88 – Ukázka navařené stěny po deváté housence

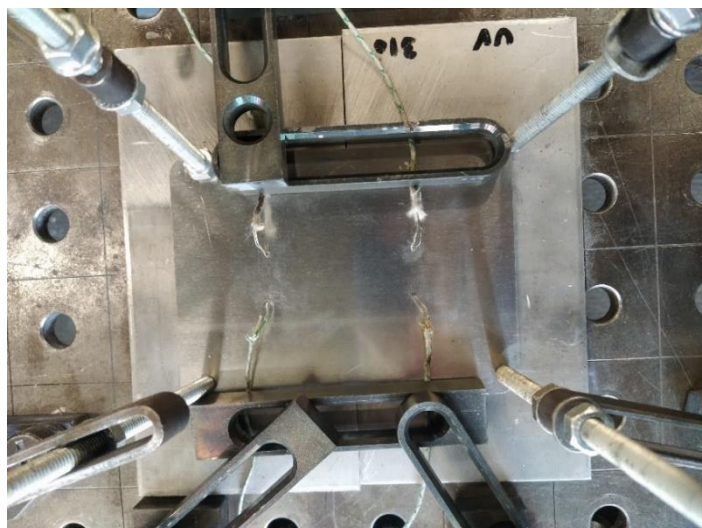
Z obrázku 88 nelze vyhodnotit přesné hodnoty, ale lze alespoň konstatovat, že odvod tepla byl souvislý a vedl směrem dolů k základnímu materiálu. Více se tomuto bude věnovat kapitola 8.3.2.

8.3 Navařování s prodlevou 120 sekund

Poslední měření probíhalo s prodlevou 120 sekund. I zde proběhla 2 měření, s tím, že při prvním z nich bylo snímáno termokamerou shora a při druhém bylo snímáno ze strany.

8.3.1 Snímání teplotního pole – shora

Při tomto měření bohužel nastal problém s kondenzátorovým svařovacím zdrojem BT-2 a tudíž nemohly být drátky termočlánků přivařeny k desce. Tento problém byl vyřešen pomocí upínáků. Koncové drátky termočlánků byly vtlačeny do předvrtaných děr a následně byly dráty pomocí upínáků přichyceny tak, aby nemohlo dojít k jejich pohybu a termočlánky tak mohly snímat celý průběh navařovacího procesu. Termočlánky tedy nebyly přivařeny, ale přesto byl zaručen pevný a trvalý kontakt s podkladovou deskou (obr. 89).



Obr. 89 – Upnutí termočlánků pomocí upínáků

Proces navařování stěny probíhal tak, že poté, co byla provedena 1. návarová housenka, následovala 120 sekund trvající prodleva a po uplynutí této doby probíhalo bylo spuštěno navařování další, tedy 2. housenky, tentokrát opačným směrem. Proces se tímto způsobem opakoval, až do navaření 10. housenky.

Během tohoto měření byla také provedena fotodokumentace celého procesu navařování. Průběh a růst stěny zobrazují následující obrázky 90–93.



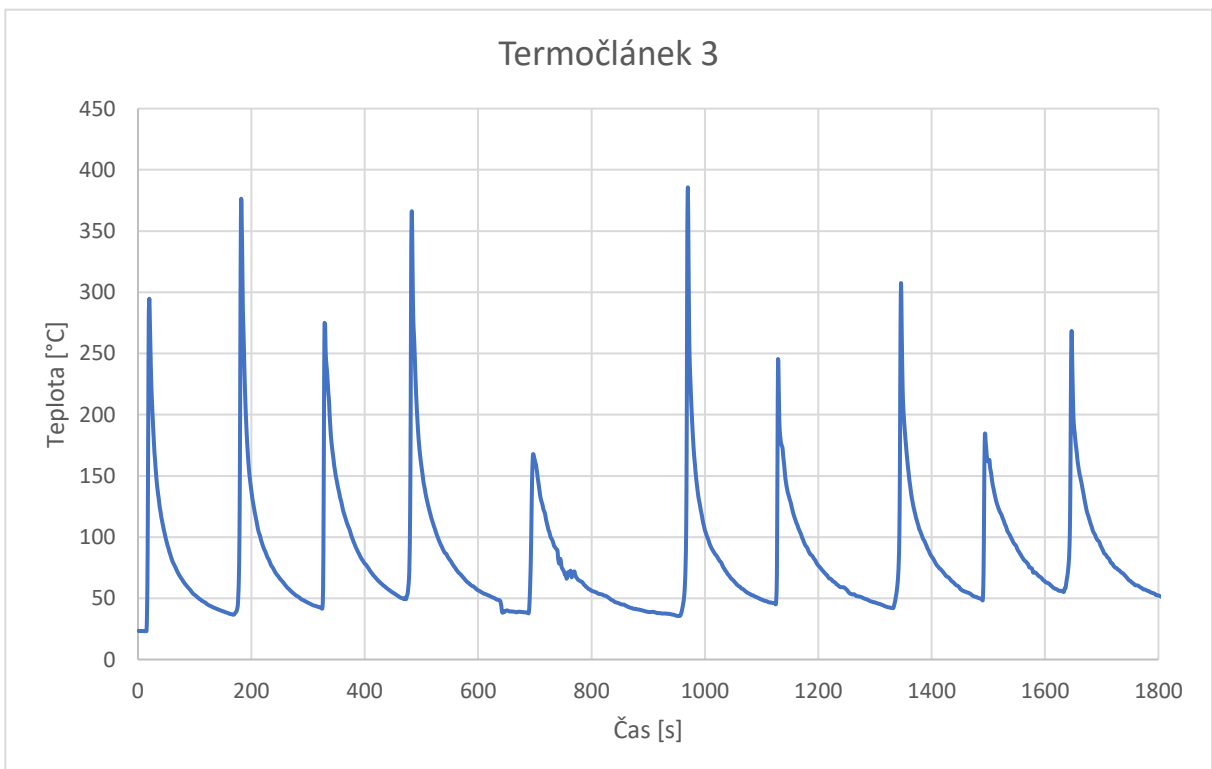
Obr. 90 a 91 – Navařená stěna po 1. housence (vlevo) a 3. housence (vpravo)



Obr. 92 a 93 – Navařená stěna po 7. housence (vlevo) a 10. housence (vpravo)

Záznam termočlánků – teplotní cykly

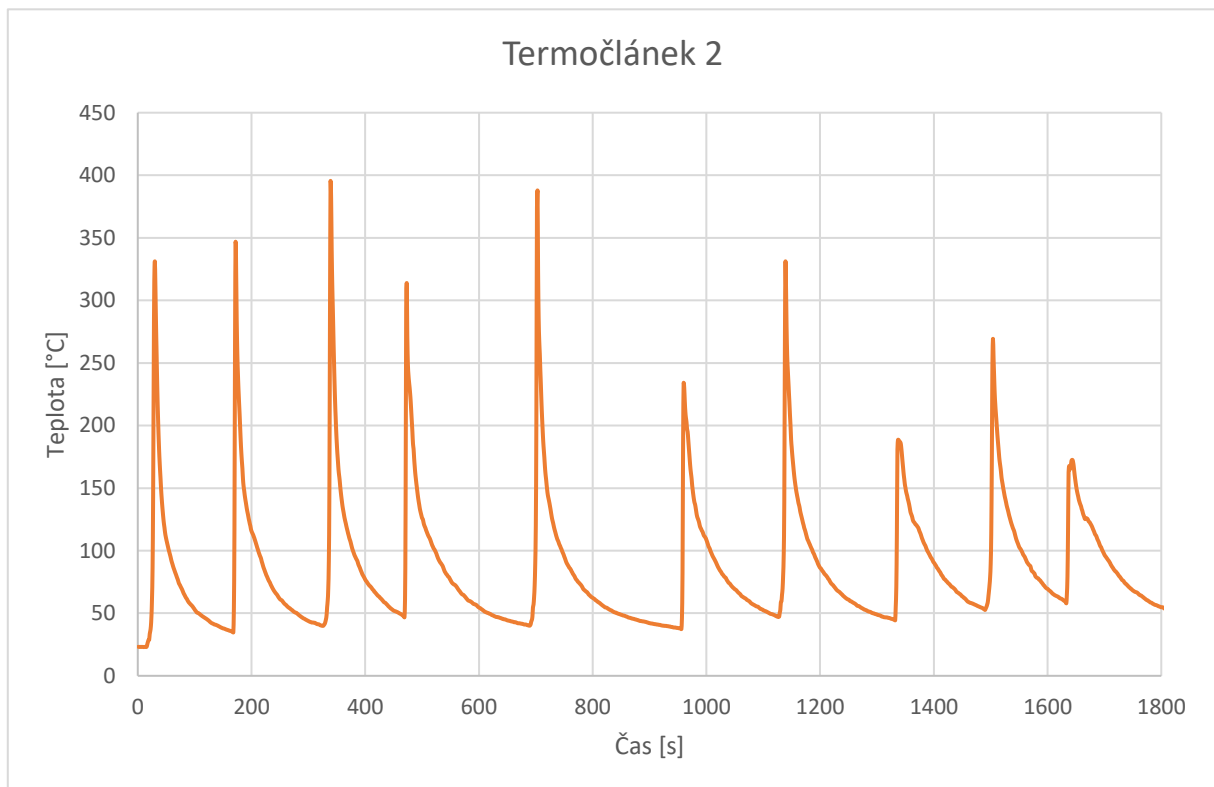
Následující grafy (obr 94 a 95) znázorňují hodnotu teploty zaznamenanou pomocí termočlánků. Po navaření poslední 10. housenky, byly termočlánky ponechány zapnuté po dobu 8–9 minut, pro záznam chladnutí celého svařence. Zde byl namísto termočlánku č. 1 vybrán termočlánek č. 3, který má lépe zdokumentované hodnoty.



Obr. 94 – Ukázka záznam teploty v závislosti na čase u termočlánku č. 3

Tab. 13 – Tabulka hodnot termočlánku č. 3

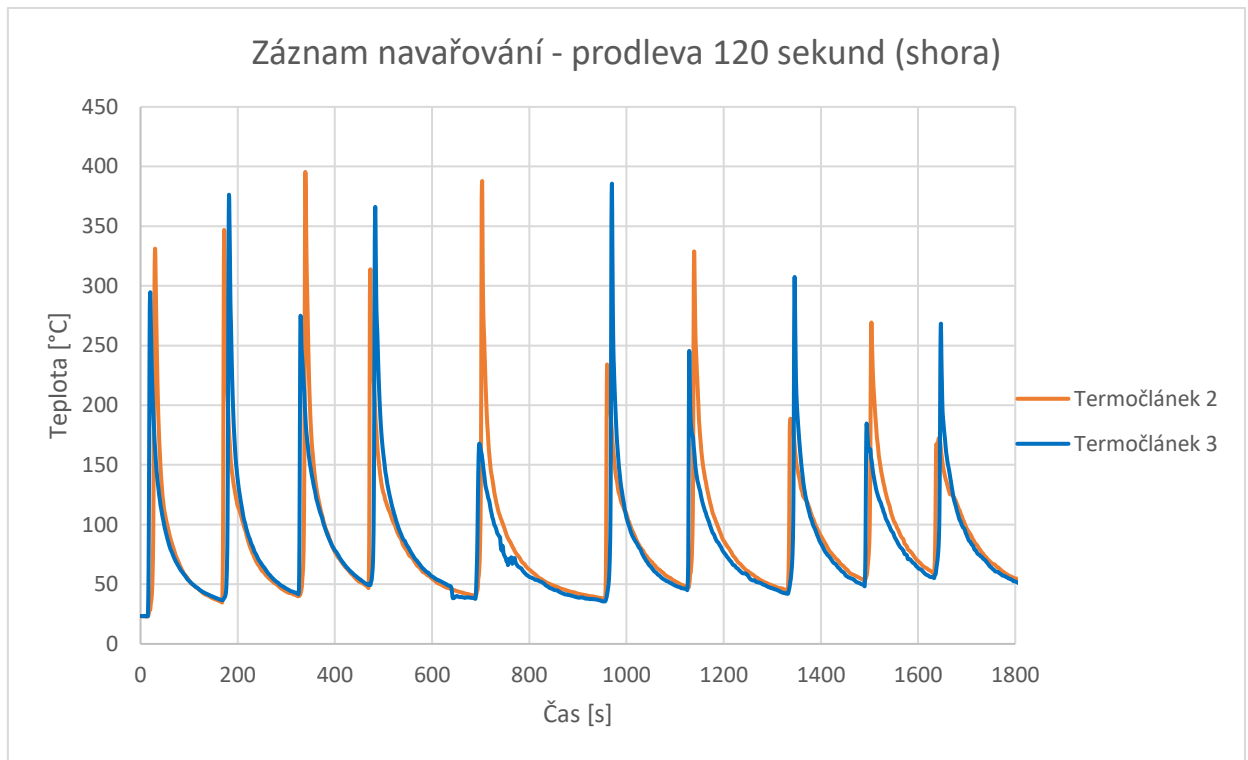
Hodnoty termočlánku 3			
Housenka	Max [°C]	Min [°C]	Pokles za 120 s [°C]
1	294,7	36,6	258,1
2	376,4	41,5	334,9
3	275,0	49,3	225,7
4	366,2	37,7	328,5
5	167,8	35,6	132,2
6	385,7	45,0	340,7
7	245,5	41,9	203,6
8	307,5	48,2	259,3
9	184,7	55,1	129,6
10	268,4	60,6	207,8



Obr. 95 – Ukázka záznam teploty v závislosti na čase u termočlánku č. 2

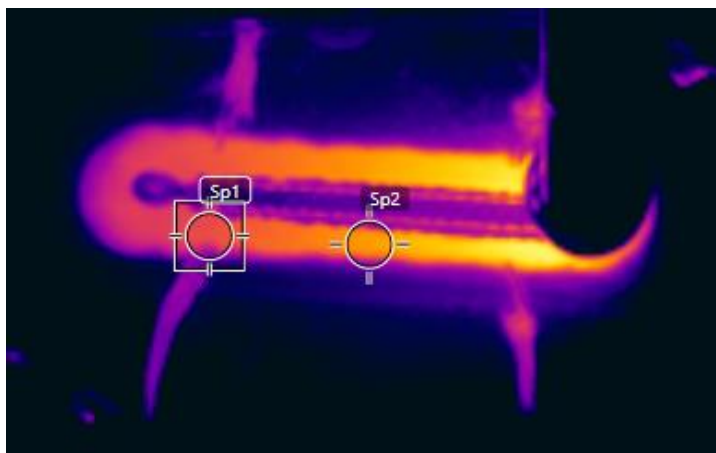
Tab. 14 – Tabulka hodnot termočlánku č. 2

Hodnoty termočlánku 2			
Housenka	Max [°C]	Min [°C]	Pokles za 120 s [°C]
1	331,2	34,6	296,6
2	346,9	39,9	307,0
3	395,5	46,7	348,8
4	313,9	40,0	273,9
5	387,9	37,3	350,6
6	234,2	47,2	187,0
7	328,9	44,3	284,6
8	188,6	52,6	136,0
9	269,3	57,9	211,4
10	172,5	60,1	112,4

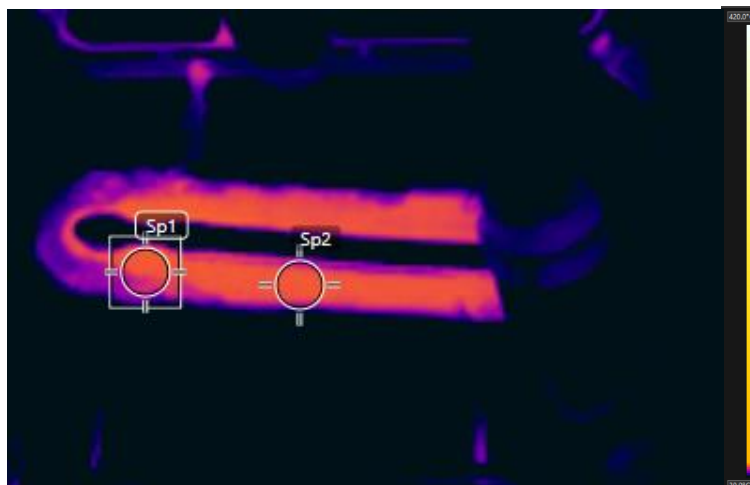


Obr. 96 – Záznam termočlánků navařování – prodleva 120 sekund (shora)

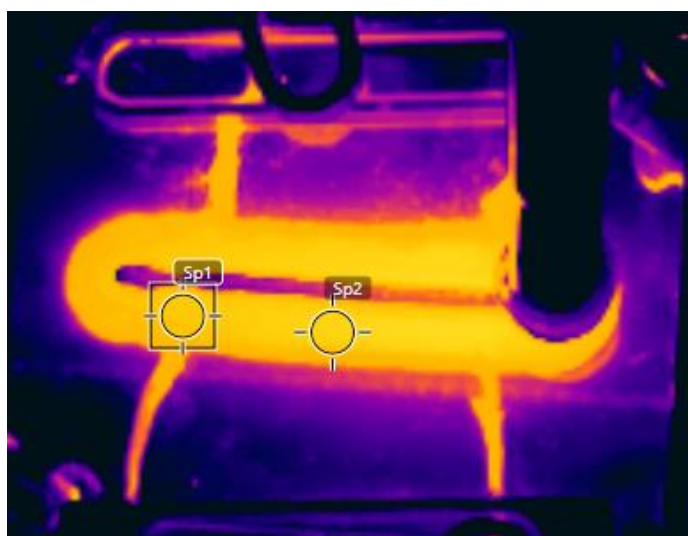
Záznam termokamery – teplotní pole



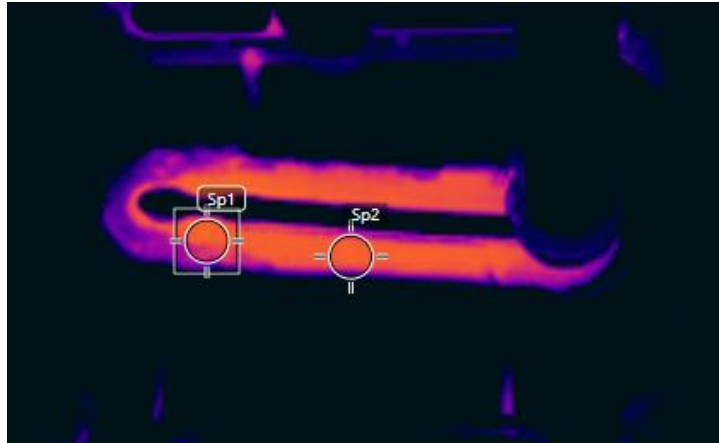
Obr. 97 – Teplotní pole po navařené 1. housence



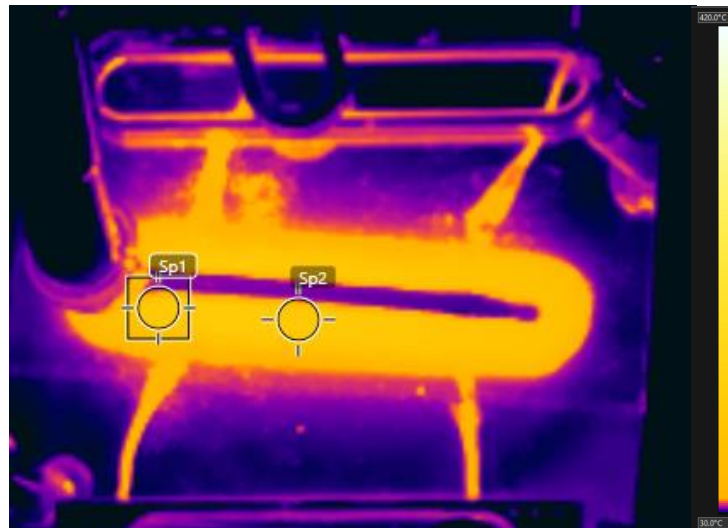
Obr. 98 – Teplotní pole před navařením 2. housenky



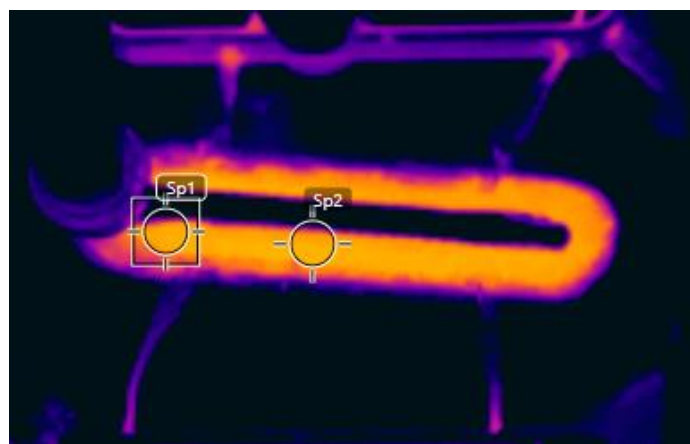
Obr. 99 – Teplotní pole po navařené 3. housence



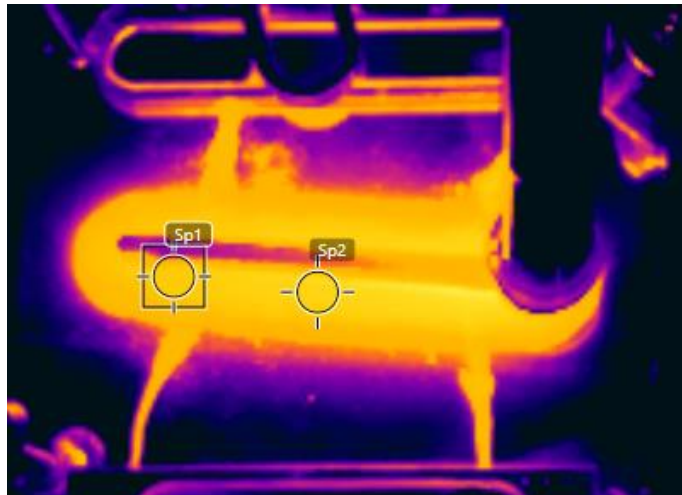
Obr. 100 – Teplotní pole před navařením 4. housenky



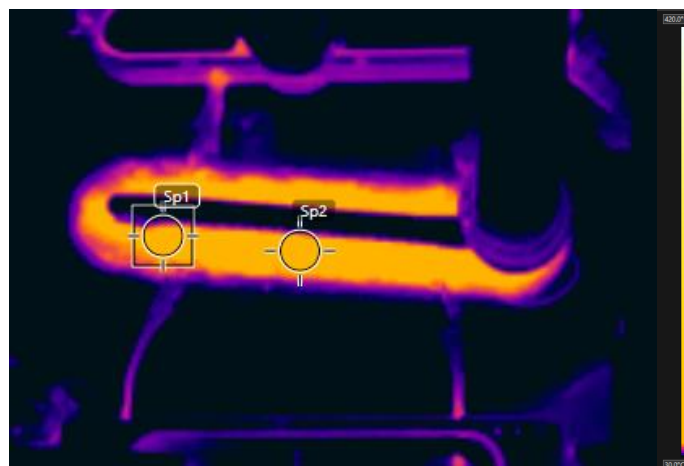
Obr. 101 – Teplotní pole po navaření 6. housenky



Obr. 102 – Teplotní pole před navařením 7. housenky



Obr. 103 – Teplotní pole po navaření 9. housenky



Obr. 104 – Teplotní pole před navařením 10. housenky

Měřená teplota v bodě sp2 byla opět sledována, stejně jako v předchozím měření, po první (před druhou) a po deváté (před desátou) housence. Teplota po první housence zaznamenaná v bodě sp2 byla 158,1 °C a během 120sekundové prodlevy klesla na 39,7 °C. Po deváté housence byla teplota 173,8 °C a po prodlevě klesla na 61,5 °C. Z toho vyplývá, že prodleva 120 sekund byla poměrně dostačující na to, aby materiál zvládl odvést dostatečné množství tepla.

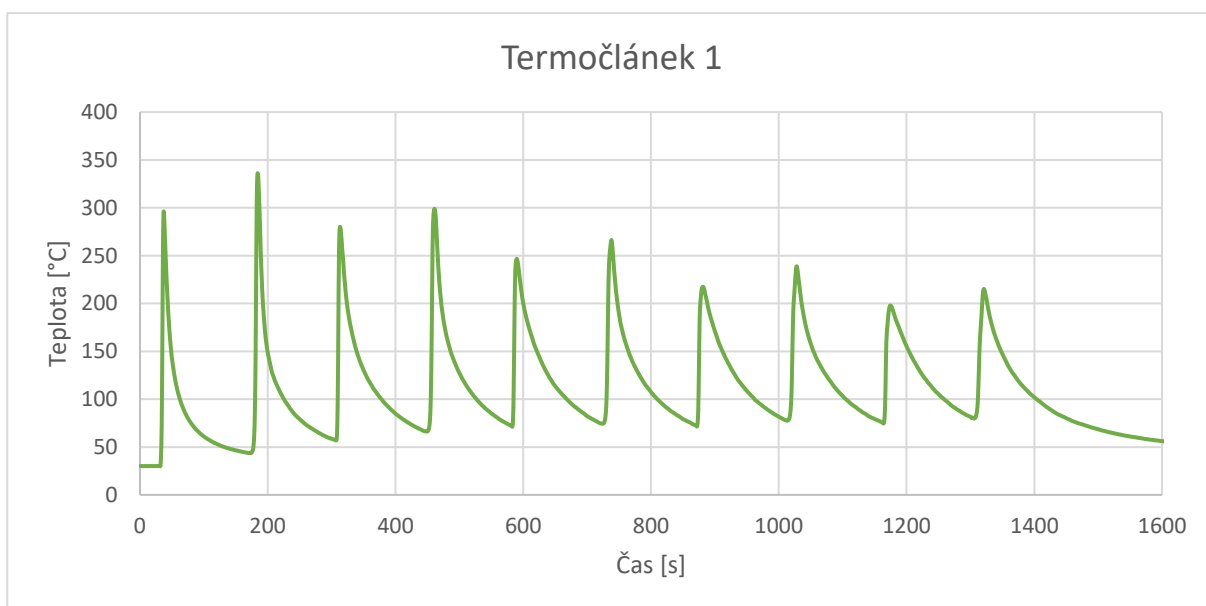
Teplotní pole bylo po navaření třetí housenky široké 47 mm, po prodlevě byla šířka menší než část, kam zasahují produkty oxidace (tudíž nelze přesně určit hodnotu), tedy menší než 22 mm. Při navařování deváté housenky byla šířka teplotního pole 50 mm a poté klesla na hodnotu menší než 22 mm před desátou housenkou.

8.3.2 Snímání teplotního pole ze strany

Měření probíhalo za stejných podmínek, jako tomu bylo u měření předchozího. Jediný rozdíl byl v umístění termokamery, která se tentokrát nenacházela nad svarem, ale byla na svar zaměřena z pozice ze strany. Průběh byl opět monitorován termočládky a termokamerou.

Záznam termočládků – teplotní cykly

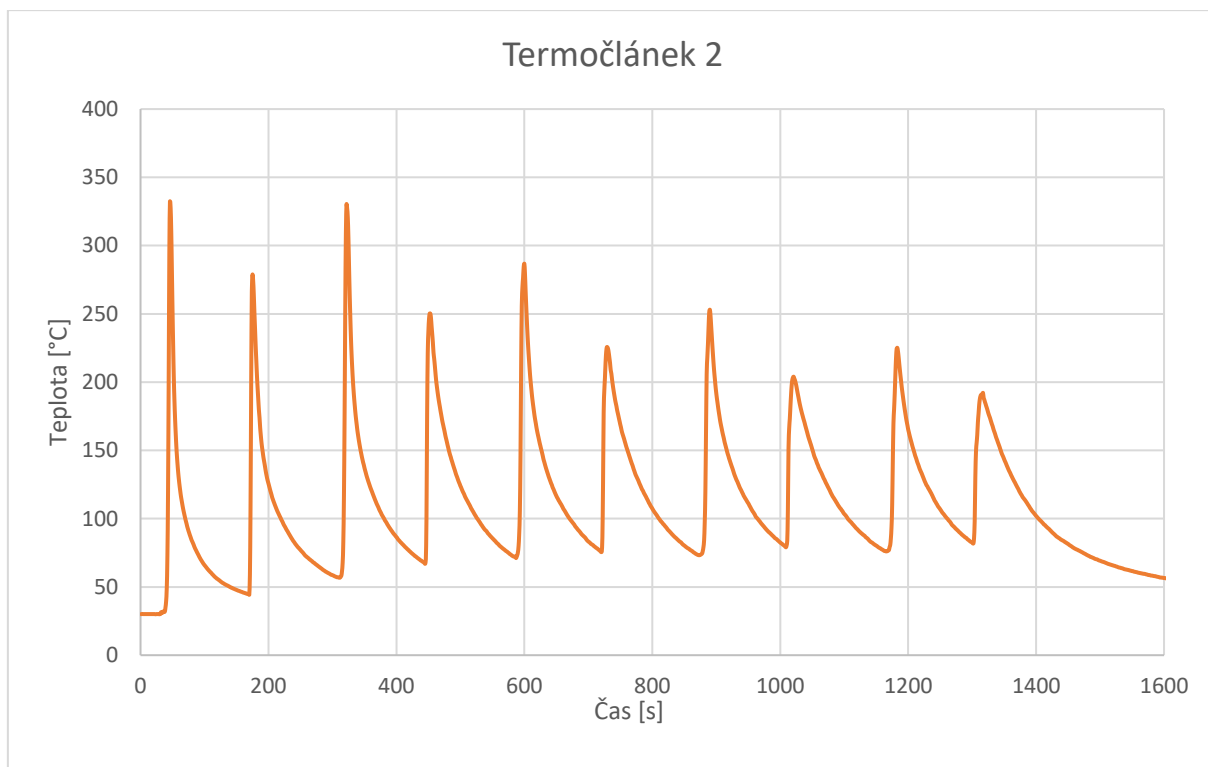
V následujících grafech (obr. 105 a 106) je vyobrazen průběh teplot zaznamenaný pomocí termočládků při tomto měření.



Obr. 105 – Ukázka záznam teploty v závislosti na čase u termočládku č. 1

Tab. 15 – Tabulka hodnot termočládku č. 1

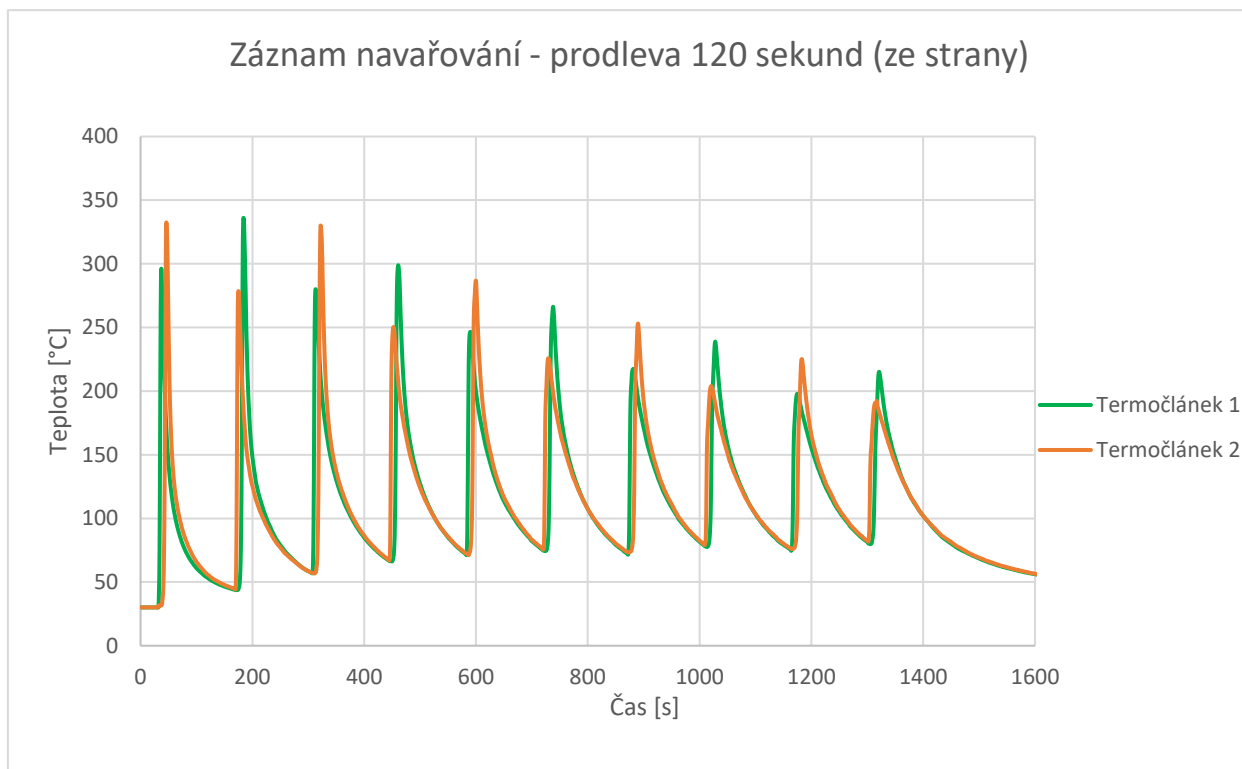
Hodnoty termočládku 1			
Housenka	Max [°C]	Min [°C]	Pokles za 120 s [°C]
1	295,2	43,7	251,5
2	335,8	56,8	279,0
3	279,9	66,2	213,7
4	298,9	71,1	227,8
5	246,6	74,3	172,3
6	266,3	71,5	194,8
7	217,4	77,5	139,9
8	238,9	74,5	164,4
9	197,8	79,8	118,0
10	215,2	83,1	132,1



Obr. 106 – Ukázka záznam teploty v závislosti na čase u termočláneku č. 2

Tab. 16 – Tabulka hodnot termočláneku č. 2

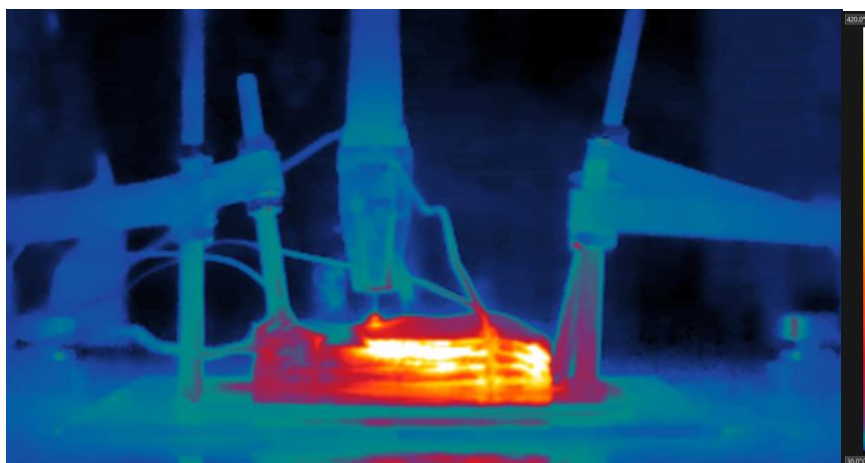
Hodnoty termočláneku 2			
Housenka	Max [°C]	Min [°C]	Pokles za 120 s [°C]
1	332,5	44,2	288,3
2	278,6	56,8	221,8
3	330,1	66,9	263,2
4	250,2	71,1	179,1
5	286,8	75,5	211,3
6	225,7	73,2	152,5
7	253,1	79,0	174,1
8	204,0	76,0	128,0
9	225,2	81,8	143,4
10	192,2	85,4	106,8



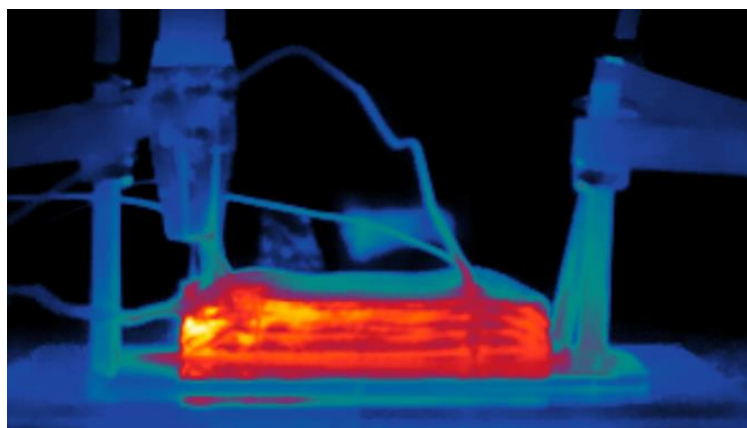
Obr. 107 – Záznam termočláneků navařování – prodleva 120 sekund (ze strany)

Záznam termokamery – teplotní pole

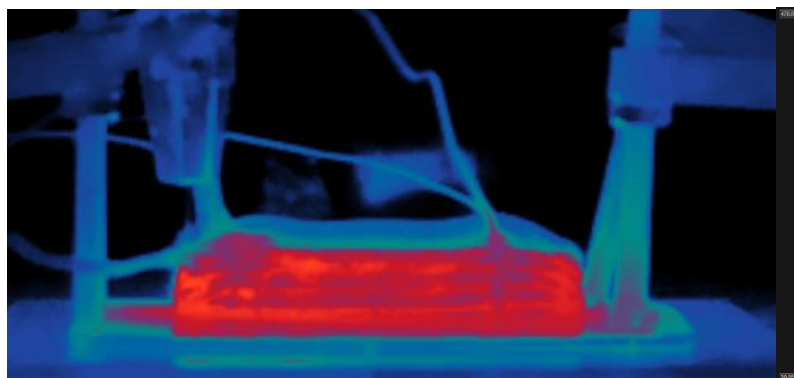
Toto měření by bylo ideální pro zkoumání odvodu tepla z navařené stěny. Bylo by zde totiž velmi dobře vidět, kde chladne samotná stěna nejrychleji. Bohužel z důvodů vzniklé vrstvy, které má více odstínů šedé až černé barvy, je prakticky nemožné provést přesné vyhodnocení. Bylo by totiž potřeba znát hodnotu v některém z bodů na stěně (ta by mohla být ověřena například dotykovým teploměrem). Nicméně i tak lze provést částečné vyhodnocení. Následné obrázky ukazují chladnutí po navaření poslední desáté housenky.



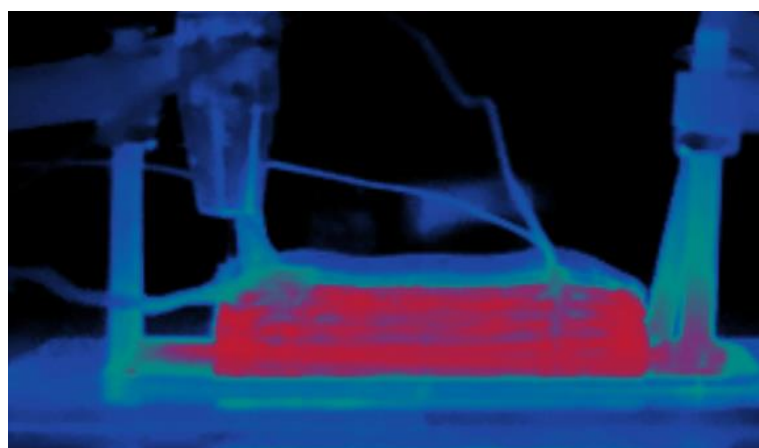
Obr. 108 – Záznam tvorby 10. housenky pomocí softwaru FLIR Tools



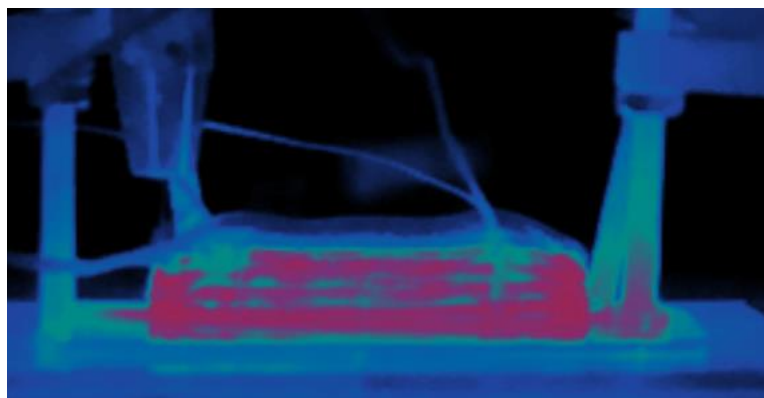
Obr. 109 – Termogram po navaření 10. housenky



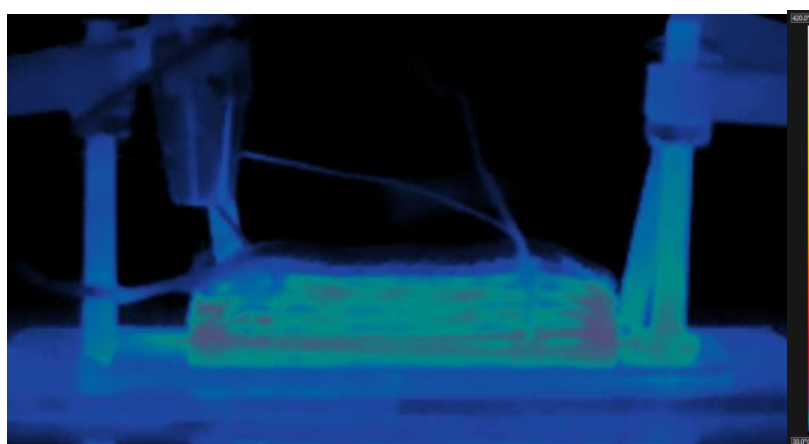
Obr. 110 – Termogram pořízený po 10 sekundách po navaření 10. housenky



Obr. 111 – Termogram po 30 sekundách po navaření 10. housenky



Obr. 112 – Termogram po 60 sekundách po navaření 10. housenky



Obr. 113 – Termogram po 120 sekundách po navaření 10. housenky



Obr. 114 – Výsledek po navaření 10. housenky

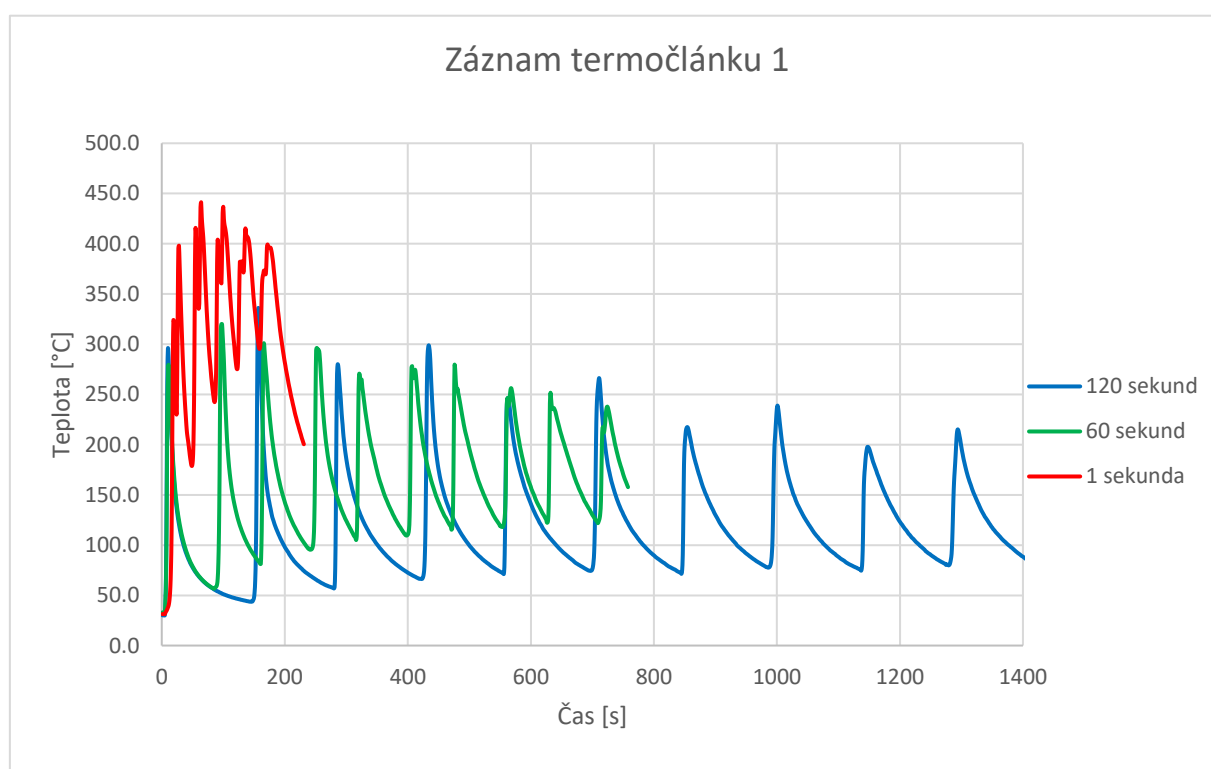
Termogramy na obrázcích 108-113 ukazují, že odvod tepla z navařené stěny je konstantní (z pohledu šířky) a také probíhal směrem dolů k základnímu materiálu. Během 120 sekund došlo k odvodu téměř veškerého tepla.

9. Vyhodnocení výsledků

V této kapitole je vyobrazeno porovnání jednotlivých měření, které byly během experimentu provedeny. Vyhodnocení je rozděleno do 3 částí. První částí bude vyhodnocení záznamů termočlánků. Druhá část obsahuje vyhodnocení videozáznamů z termokamery, získaných během měření a poslední část zkoumá rozdíl v geometrii výsledné navařené stěny.

Vyhodnocení měření teplotních cyklů pomocí termočlánků

Pro vyhodnocení teplot, které byly zaznamenány pomocí termočlánků, byl vytvořen graf (viz obr. 115), který je složen z vybraných dat. Tyto data jsou: měření s prodlevou 120 sekund, měření s prodlevou 60 sekund a měření, při kterém byla prodleva 1 sekunda.



Obr. 115 – Záznam termočlánku č. 1 z vybraných měření

Velikost daného peaku (maximální teploty) je ovlivněna tím, zda navařování housenky začínalo na straně umístění termočlánku nebo zda navařování začalo na straně opačné. V případě, že navařování začínalo u termočlánku, hodnota teploty zaznamenaná termočlánkem je nižší. Naopak, když navařování končilo u termočlánku, vnesené teplo bylo větší, a tudíž byla na termočlánku zaznamenána i vyšší teplota.

Také je zřetelné, že maximální teplota s přibývajícím počtem vrstev klesala, protože měřené místo se vzdalovalo od umístění termočlánků (tím, jak se postupně zvyšoval návar).

Z obrázku 115 vyplývá, že při prodlevě 120 a 60 sekund jsou hodnoty peaků teplot u jednotlivých housenek poměrně podobné. Z toho vyplývá, že co se týče vneseného tepla, je mezi prodlevami 120 a 60 sekund jen velmi malý rozdíl. Z grafu také vyplývá, že pokud je prodleva 1 sekunda, jsou hodnoty zaznamenaných teplot výrazně vyšší. Návar nemá dostatek času na odvedení tepla a navařování tak probíhá za vyšších teplot. To může mít za následek sníženou kvalitu návaru, a může se to projevit i nepřesnou geometrií navařené stěny.

Pro výsledek experimentu jsou však důležité i minimální hodnoty teplot v jednotlivých cyklech. Ty odkazují na teplotu interpass, tedy teplotu, na jakou se materiál zchladí před navařením další vrstvy a tedy, při které začíná navařování další housenky. Tato teplota je snímána pomocí termočlánku a je tedy snímána na základní desce. Nejvyšší hodnoty u jednotlivých měření zobrazují tabulky 17 a 18.

Tab. 17 – Maximální hodnota teploty interpass na termočlánku č. 1

Maximální hodnota teploty interpass [°C]	
1 s	355,3
60 s (shora)	110,5
60 s (ze strany)	122,3
120 s (shora)	55,7
120 s (ze strany)	79,8

Tab. 18 – Maximální hodnota teploty interpass na termočlánku č. 2

Maximální hodnota teploty interpass [°C]	
1 s	369,5
60 s (shora)	101,2
60 s (ze strany)	133,7
120 s (shora)	57,9
120 s (ze strany)	81,8

Zde je vidět již výrazný rozdíl mezi jednotlivými variantami měření (tzn. s různými časovými prodlevami chladnutí mezi jednotlivými housenkami návaru). Při prodlevě 1 sekunda, byla maximální hodnota teploty interpass nad 350 °C, což je nevyhovující. Prodleva 60 sekund zaznamenala maximální hodnoty teplot interpass nad 100 °C, což znamená, že materiál stráví delší dobu na vyšších teplotách, než je tomu u prodlevy 120 sekund. To může

mít za následek strukturní změny, které mohou mít výrazný vliv na výsledné vlastnosti navařené stěny a také mohou mít za následek nedokonale vytvořenou geometrii stěny. Z tohoto hlediska se tedy jeví jako nejlepší varianta ta, jejíž hodnota teplot interpass je nejnižší, tedy varianta, kdy je prodleva nastavena na hodnotu 120 sekund. Zároveň z grafů teplotních cyklů při této prodlevě je vidět, že minima teplot jsou v podstatě téměř na konstantní úrovni – proto lze určit teplotu interpass pro provádění návaru stěny pro daný materiál, bez zásadního teplotního ovlivnění materiálu.

Vyhodnocení videozáznamu termokamery

Z pohledu teplotního pole základního materiálu, bylo na základě záznamu termokamery a vyhodnocení měření v bodě „sp2“ zjištěno, že prodleva 120 sekund je dostatečná, protože teplota klesla mezi jednotlivými návarovými housenkami na dostatečně nízkou teplotu (po první na 39,7 °C a po deváté na 61,5 °C). Pro prodlevu 60 sekund nedošlo k tak výraznému poklesu, neboť po první housence a následné prodlevě byla teplota 66,4 °C a po deváté dokonce 104,9 °C. Tato teplota není zcela vyhovující, protože materiál setrvává delší dobu na vyšších teplotách. Pro prodlevu 1 sekunda byly tyto teploty dokonce 174,2 °C a 338 °C, což je zcela nevhovující.

Z pohledu teplotního pole došlo ke zkoumání jeho šířky. Zaznamenaná šířky teplotních polí během měření ukazuje tabulka 19.

Tab. 19 – Šířka teplotního pole navařené stěny dle časové prodlevy

Šířka teplotního pole				
Prodleva	Po 3. housence	Před 4. housenkou	Po 9. housence	Před 10. housenkou
1 s	48	x	68	x
60 s	46	24	52	34
120 s	47	> 22	50	> 22

Z pohledu teplotního pole se ukazuje, že prodleva 1 sekunda je nedostatečná, neboť se hodnoty teplotního pole zvětšují. Ani prodleva 60 sekund není v tomto ohledu zcela dostatečná, neboť při desáté housence se již projevuje zvětšení teplotního pole. Pokud je prodleva 120 sekund, jeví se jako velmi dostatečná, neboť i před desátou housenkou klesla šířka pole na méně než 22 mm.

Také proběhlo zkoumání odvodu tepla (během pozorování termokamery ze strany). Zde bylo vyhodnoceno, že odvod tepla probíhal soustavně (po celé šířce) a směrem dolů k základnímu materiálu.

Bohužel celé toto vyhodnocení nelze ze získaných dat zcela přesně kvantifikovat (tedy určit přesné číselné hodnoty). Pro případné další podobné experimenty by bylo vhodné použít více termočlánků, které by byly umístěny v různých vzdálenostech od navařované stěny, tak aby bylo možné pozorovat teplotní pole pomocí nich, popřípadě termočlánky, které by posloužily pro kalibraci mimo oblast ovlivněnou produkty oxidace. Následně by se vyhodnocení teplotního pole dalo provést i pomocí termokamery.

Vyhodnocení geometrie vzorku

Velikost časové prodlevy mezi jednotlivými housenkami se ukázalo jako zásadní při zkoumání vlivu na geometrii jednotlivých vzniklých stěn návarů. Hlavním činitelem je zde nejpravděpodobněji teplota interpass (jak bylo zmíněno výše). Výsledky jednotlivých navařených stěn jsou ukázány na následujících obrázcích.



Obr. 116 – Prodleva 1 sekunda – pohled shora



Obr. 117 – Prodleva 60 sekund – pohled shora



Obr. 118 – Prodleva 120 sekund – pohled shora

Tab. 20 – Šířka navařené stěny dle časové prodlevy

Šířka stěny		
Prodleva	Min [mm]	Max [mm]
120 s	8,5	9
60 s	8	9
1 s	10	12

Měření šířky návarové housenky probíhalo ve střední části navařené stěny, neboť začátky a konce návarů nebyly odlaďovány ideálně, a tudíž by měření v těchto místech bylo neodpovídající.

Tabulka (č. 20) šířky stěn ukazuje, že stejně jako tomu bylo v případě termočlánků, i zde jsou výsledky pro prodlevu 120 sekund a 60 sekund velmi podobné. Avšak při pohledu na

obě stěny, lze konstatovat, že stěna, která měla více času na odvod tepla a tedy ta, při které jsou zaznamenané nižší teploty interpass, je geometricky přesnější a má lepší tvar.

Stěna, která byla vytvořena s prodlevou 1 sekundy, je geometricky neodpovídající. Je velmi nepravidelná a oproti ostatním stěnám velmi široká. To je způsobeno vysokou teplotou interpass.



Obr. 119 – Prodleva 120 sekund – pohled ze strany



Obr. 120 – Prodleva 60 sekund – pohled ze strany



Obr. 121 – Prodleva 0 sekund – pohled ze strany

Tab. 21 – Výška navařené stěny dle časové prodlevy

Výška stěny		
Prodleva	Min [mm]	Max [mm]
120 s	23	25
60 s	22	26
1 s	18	20

Co se týče výšky stěn, zde dopadla nejlépe stěna, která byla vytvořena s prodlevou 120 sekund, která projevuje poměrně malé rozdíly ve výšce po celé své délce. Stěna, která byla vytvořena s prodlevou 1 sekundy je také poměrně málo rozdílná ve své výšce, oproti ostatním je však výrazně nižší. Nejhůře dopadla stěna vytvořena prodlevou 60 sekund, ta je sice dobře vysoká, její výškové rozdíly po celé délce jsou však výraznější.

Celkově lze tedy říct, že časová prodleva mezi jednotlivými housenkami má velký vliv na výslednou geometrii navařené stěny. Z experimentu vyplývá, že čím delší časová prodleva je, tím geometricky lepší stěna vznikne. Z hlediska geometrie lze doporučit teplotní ovlivnění s prodlevou 120 sekund při tvorbě návaru, což odpovídá teplotě interpass základové desky 55,7 – 51,8 °C.

10. Závěr

Cílem diplomové práce bylo provést zmapování teplotního ovlivnění při aditivní výrobě pomocí hliníkové slitiny EN AW 5087 metodou WAAM. Pro tento účel byl navržen experiment, kdy bylo stanoveno, že dojde k navaření lineárních stěn tvořených 10 návarovými housenkami. Po celou dobu bude průběh navařování monitorován termočládky a snímán termokamerou. Zároveň byly vytvořeny různé varianty návarů, kdy byly postupně měněny teplotní cykly – byla zvětšována časová prodleva (1 s, 60 s, 120 s) mezi jednotlivými návarovými housenkami, tak aby se snižovalo kumulované teplo, vnášené do materiálu. Výsledky byly následně vyhodnoceny.

Vyhodnocení pomocí termočládků dospělo k závěru, že velikost vneseného tepla pro prodlevu 60 a 120 sekund je velmi podobná, avšak teplota, na kterou vychladla podkladová deska mezi jednotlivými návarů, tedy teplota interpass, byla výrazně nižší u větší prodlevy. Z toho lze tedy usuzovat, že prodleva 120 sekund se jeví, díky své teplotě interpass, jako optimální, zatímco prodleva 60 sekund nevykázala v této oblasti tak dobré výsledky. Prodleva 1 sekunda zaznamenala větší množství vneseného tepla a absolutně nevyhovující teploty interpass.

Dále probíhalo vyhodnocení pomocí termokamery, kde byla vyhodnocována teplotní pole. Zde opět jako nejlepší byla prodleva 120 sekund, ta projevila dostatečné množství času na odvod tepla, na rozdíl od prodlevy 60, která vykazovala při posledním návaru výrazně širší teplotní pole. Kontinuální navařování se opět projevilo jako nevhodné, neboť teplotní pole bylo výrazně větší.

V poslední řadě došlo k vyhodnocení geometrie navařených stěn. Velikost prodlevy se ukázala jako významná při posuzování geometrie. Pokud je prodleva větší, a tedy pokud je teplota interpass nižší, je stěna více geometricky stabilní.

Celkový závěr je tedy takový, že pro navařování metodou WAAM hliníkové slitiny EN AW 5087, se jeví kontinuální navařování jako nevhodné. Časová prodleva 60 sekund může být v některých případech dostačující, avšak není zcela optimální. Prodleva 120 sekund vykázala své výsledky jako optimální, neboť bylo dosaženo poměrně dobré geometrické stability, nenavýšovalo se teplotní ovlivnění podkladového (základního) materiálu, ani vlastního návaru a vykázala dobré výsledky ohledně měření teplot interpass. Proto lze prodlevu 120 sekund doporučit pro navařování hliníkové slitiny EN AW 5087.

Pro další výzkum lze doporučit větší množství použitých termočlánků, které by byly lépe umístěné (i s ohledem na symetričnost odvodu tepla) a pomohly by tak lépe zdokumentovat celé teplotní pole. Popřípadě použít například dotykové teploměry pro kalibraci a následné určení emisivity v určitém zkoumaném bodě, pro přesnější vyhodnocení pomocí termokamery.

Seznam použitých literárních zdrojů

- [1] KOLAŘÍK, L.; KOVANDA, K.; GURČÍK. Robotické navařování metodou WAAM jako alternativa k 3D tisku kovových materiálů. Praha 2016 [4.5.2023].
- [2] KOLAŘÍK, L.; SUCHÁNEK, J.; KOLAŘÍKOVÁ, M. Navařování metodou WAAM. Nejčtenější strojírenský časopis – MM spektrum [online]. 2018 [2.6.2023]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/navarovani-metodou-waam>
- [3] WILLIAMS, S. W., F. MARTINA, A. C. ADDISON, J. DING, G. PARDAL a P. COLEGROVE. Wire + Arc Additive Manufacturing. Materials Science and Technology [online]. 2016 [4.6.2023]. Dostupné z: <https://waammat.com/about/waam>
- [4] MARINELLI, G.; MARTINA, F.; GANGULY, S.; WILLIAMS, S. Wire + Arc Additive Manufacturing of unalloyed tantalum. Austin 2017 [30.6.2023].
- [5] ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. Waam | ČVUT Fakulta strojní. ČVUT Fakulta strojní [online]. [21.5.2023]. Dostupné z: <https://www.fs.cvut.cz/ostatni/sekce-3dtisk/3dtisk/moznosti-3dtisk/rozdeleni-technologiei-3dtisk/waam-3dtisk/>
- [6] INSIDE METAL ADDITIVE MANUFACTURING. Building large metallic parts with wire arc additive manufacturing. Inside metal additive manufacturing [online]. 2016 [21.5.2023]. Dostupné z: <https://www.insidemetaladditivemanufacturing.com/blog/building-large-metallic-parts-with-wire-arc-additive-manufacturing>
- [7] RAYNOCH, J. Svařování. Investice do rozvoje vzdělání. 2012 [17.5.2023].
- [8] LAPŠANSKÁ, H. Přehled metod svařování. Moderní technologie ve studiu aplikované fyziky. [23.5.2023].
- [9] MINAŘÍK, V. Obloukové svařování. Praha 2007 [29.6.2023] ISBN 978-80-86960-28-9
- [10] Svařování | vše o sváření | metody a historie svařování. Svarecikukla.cz [online]. 2023 [7.5.2023]. Dostupné z: <https://www.svarecikukla.cz/blog/svarovani-svareni-vse-o-svareni/>

- [11] HLUCHÝ, M.; KOLOCUH, J.; PAŇÁK, R. Strojírenská technologie 2, první díl. Praha 2011 [26.6.2023]. ISBN 80-7183-244-8
- [12] Pracovní polohy při svařování. Svářečky-elektrody.cz [online]. [14.5.2023]. Dostupné z: <https://www.svarecky-elektrody.cz/radce-svarece/pracovni-polohy-pri-svarovani/>
- [13] Svařování. Podstata, účel, použití, výhody, nevýhody a rozdělení svařování [online]. [3.6.2023]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/6977135-Svarovani-1-1-1-podstata-ucel-pouziti-vyhody-nevyhody-a-rozdeleni-svarovani.html>
- [14] ZEROSS. Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. 2001 [15.5.2023]. ISBN 80-857-7181-0
- [15] ČESKÁ TECHNICKÁ NORMA. ČSN EN 1706+A1 (421433). Technické normy ČSN. Bezpečnostní tabulky [online]. [2022] [14.6.2023]. Dostupné z: <https://www.technicke-normy-csn.cz/csn-en-1706-a1-421433-245534.html#>
- [16] FRONIUS. Co je vlastně svařování MIG/MAG ? – Základní informace. Perfect Welding [online]. 2020 [9.6.2023]. Dostupné z: <https://blog.perfectwelding.fronius.com/cs/co-je-svarovani-mig-mag/>
- [17] KUBÍČEK, J. Technologie svařování. Studijní opory pro výuku v kurzech 5TE, ETV, ETV-K, ÚST, odbor svařování a PÚ [online]. [2.7.2023]. Dostupné z: https://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/technologie_svarovani_5te_etv_etv-k_kubicek.pdf
- [18] ELUC. Svařování elektrickým obloukem v ochranných atmosférách. Elektronická učebnice – ELUC [online]. 2014 [22.6.2023]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1807>
- [19] PAVLÍK, M.; SAHUL, M.; SAHUL, M.; NOVÁK, V. Influence of CMT overlay welding mode on the microstructure and technical properties of 5087 aluminium alloy fabricated by Wire and Arc Additive Manufacturing, THE 76th IIW ANNUAL ASSEMBLY AND INTERNATIONAL CONFERENCE ON WELDING AND JOINING. 2023 [24.6.2023]

- [20] Argon | SIAD. Production of technical and industrial gases | SIAD [online]. 2020 [24.6.2023]. Dostupné z: <https://www.siad.com/cs/argon>
- [21] Mig nebo mag? Jaký je rozdíl ? Svarbazar – internetový bazar svářecí techniky. Praktické informace o svařování [online]. 2008 [1.7.2023]. Dostupné z: <http://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cisloclanku=2007101501>
- [22] Helium, chemický prvek He, popis a vlastnosti. Periodická soustava prvků [online]. 2017 [25.6.2023]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/2.html>
- [23] FRONIUS INTERNATIONAL. What we stand for – Fronius. Fronius international [online]. 2023 [3.7.2023]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/en/about-fronius/company-values>
- [24] Nový standard ve svařovací technice Proces CMT (Cold Metal Transfer). TT | Technický týdeník [online]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/novy-standard-ve-svarovaci-technice-proces-cmt-cold-metal-transfer_10667.html
- [25] Fronius logo png Transparent & svg vector. Freebie Supply [online]. 2023 [3.7.2023]. Dostupné z: <https://freebiesupply.com/logos/fronius-logo-2/>
- [26] DALTON, R. Imaging CMT Welding with a Weld Camera. Automated Inspection Blog | Xiris Automation [online]. 2022 [4.7.2023]. Dostupné z: <https://blog.xiris.com/blog/imaging-cmt-welding-with-a-weld-camera>
- [27] FRONIUS. CMT Cycle Step. Fronius International [online]. 2019 [26.5.2023]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/en/welding-technology/info-centre/magazine/2019/cmt-cycle-step>
- [28] FRONIUS. CMT Pulse – perfect combination of two technologies. Fronius International [online]. 2023 [26.5.2023]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/en/welding-technology/world-of-welding/fronius-welding-processes/cmt-pulse>
- [29] KOUTNÝ, J. Hliníkové materiály a možnosti jejich svařování. 2006 [3.6.2023]. Dostupné z: <http://www.svarbazar.cz/phprs/storage/hlinik.pdf>

- [30] ALUPA S.R.O. Hliník. Hliníkové profily, hliníkové plechy e-shop. 2023 [2.7.2023]. Dostupné z: <https://www.ehlinik.cz/hlinik>
- [31] ALUMINIUM CENTRUM. Mechanické vlastnosti AL slitin. Aluminium centrum [online]. [2.7.2023]. Dostupné z: <http://www.aluminiumcentrum.com/index.php/mechanicke-vlastnosti-al-slitin/>
- [32] ALUNET. Normování a popis hliníku a jeho slitin. Alunet.cz [online]. 2023 [4.7.2023]. Dostupné z: <http://www.alunet.cz/normovani-a-popis-hliniku-a-jeho-slitin>
- [33] Označování hliníku a slitiny hliníku podle ČSN EN. Rakeťáci [online]. 2011 [4.7.2023]. Dostupné z: https://www.raketaci.cz/media/kunena/attachments/43/oznacovani_hliniku.pdf
- [34] Information on Aluminium 5754 – thyssenkrupp Materials (UK). Materials UK [online]. 2023 [5.5.2023] Dostupné z: <https://www.thyssenkrupp-materials.co.uk/aluminium-5754.html>
- [35] ČESKÉ TECHNICKÉ NORMY. ČSN EN 515 (420053). Technické normy ČSN. Bezpečnostní tabulky [online]. 2017 [14.6.2023]. Dostupné z: <https://www.technicke-normy-csn.cz/csn-en-515-420053-202089.html#>
- [36] Rozpouštěcí žihání a stárnutí hliníkových slitin. Bodycote.com [online]. 2023 [30.6.2023]. Dostupné z: <https://www.bodycote.com/cs/sluzby/tepelne-zpracovani/rozpousteci-zihani-starnuti/rozpousteci-zihani-a-starnuti-hlinikovych-slitin/>
- [37] KOLAŘÍK, L. a kol. Konstrukce a navrhování svarových spojů. Česká svářečská společnost ANB. 2017 [5.5.2023].
- [38] Uhlíkový ekvivalent Ceqv. Kovintrade [online]. [25.6.2023]. Dostupné z: <https://www.kovintrade.cz/uhlikovy-ekvivalent/>
- [39] Hliník a jeho slitiny [online]. [5.5.2023]. Dostupné z: <http://www.kmt.tul.cz/kestaz/HLINIK-a-jeho-slitiny.pdf>

- [40] Information on Aluminium 5083 – thyssenkrupp Materials (UK). Materials UK [online]. 2023 [5.5.2023] Dostupné z: <https://www.thyssenkrupp-materials.co.uk/aluminium-5083.html>
- [41] Slitiny hliníku. Ehlinik.cz [online]. 2023 [5.5.2023]. Dostupné z: <https://www.ehlinik.cz/prilohy/zakladni-technicke-informace.pdf>
- [42] EN AW 5083. IMC Slovakia [online]. 2023 [6.5.2023]. Dostupné z: <https://www.hlinikbronz.cz/en-aw-5083/>
- [43] OMICRON. Esab ok tigrod 5087. Omicron-Marine svářecí stroje s.r.o [online]. 2023 [24.6.2023]. Dostupné z: <https://www.gamasvar.cz/45395-pridavny-material/97778-esab-ok-tigrod-5087-2-4-x-1000-mm-2-5-kg-bal/>
- [44] INDALCO. Alloy 5087 | AlMg4.5MnZr. Indalco | Superior Aluminium Welding Performance [online]. 2023 [6.5.2023]. Dostupné z: <https://www.indalco.com/wp-content/uploads/2013/10/5087.pdf>
- [45] ESAB. OK Autorod 5087. Mig/mag/tig (svářovací dráty) [online]. 2023 [25.6.2023]. Dostupné z: https://esab.com/cz/eur_cs/products-solutions/product/filler-metals/mig-mag-wires-gmaw/aluminum-wires/ok-autrod-5087/
- [46] KOLAŘÍK, L. Termovizní kontrola svarových spojů | MM Průmyslové spektrum. Mmspektrum.cz [online]. 2017 [29.7.2023]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/termovizni-kontrola-svarovych-spoju>
- [47] Termografická diagnostika budov. Centrumtermografie [online]. 2023 [29.7.2023]. Dostupné z: <https://centrumtermografie.cz/termograficka-diagnostika-budov/>
- [48] GÜNTER. Konstrukce a funkce termočlánků. Günter – Thermoelemente und Widerstandsthermometer [online]. 2019 [28.7.2023]. Dostupné z: <https://www.guenther.eu/805a74a9-7235-cdf2-2323-717e02f019e4?Edition=cz>
- [49] ARDATECH. Technické informace. Princip měření teploty termočlánkem. Ardatech.cz [online]. [26.7.2023]. Dostupné z: http://www.ardatech.cz/technicke_informace/

- [50] Xiong, J.; Li, Y-J.; Yin, Z-Q.; Chen, H. Determination of surface roughness in Wire and Arc Additive Manufacturing Based on Laser Vision Sensing - Chinese Journal of Mechanical Engineering. SpringerOpen. DOI 10.1186
- [51] W-TECHNIKA. Série Flir Exx. Termokamery flir [online]. 2023 [25.7.2023]. Dostupné z: <https://termokamery-flir.cz/termokamery-serie-exx2/>
- [52] AHLBORN. Měřící ústředna Almemo 5690-2M. Ahlborn měřící a regulační technika s.r.o. [online]. 2009 [17.7.2023]. Dostupné z: <https://www.ahlborn.cz//out/pictures/wysiwigpro/ALMEMO%205690-2M-bc.pdf>
- [53] T.I.E. Industrial | Fanuc ARC Mate 100iC. T.I.E. Industrial [online]. 2023 [12.7.2023]. Dostupné z: <https://www.robots.com/robots/fanuc-arc-mate-100ic>
- [54] GINDUMAC. Fanuc ARC Mate 100iC / 12 Robot. Gindumac [online]. 2017 [12.7.2023]. Dostupné z: https://www.gindumac.cz/produkt/fanuc-arc-mate-100ic-12_HU-ROB-FAN-2017-00001
- [55] PŘES, P. Robotizované svařování mostního zábradlí metodou MAG. ČVUT v Praze Fakulta strojní [online]. [22.7.2023]. Dostupné z: <https://stc.fs.cvut.cz/pdf13/2586.pdf>
- [56] FANUC. Servo polohovadla FANUC. FANUC | The factory automation company [online]. 2023 [26.7.2023] Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/cz/cs/roboty/p%C5%99%C3%ADslu%C5%A1enstv%C3%AD/pohyb/polohovadla>

Seznam tabulek

Tab. 1 - Typické chemické složení materiálu EN AW 5083.....	37
Tab. 2 – Typické chemické složení materiálu EN AW-5087.....	38
Tab. 3 – Přehled typů termočlánků	42
Tab. 4 – Charakteristika termokamery	46
Tab. 5 – Technická specifikace robota FANUS Arc Mate 100iC.....	48
Tab. 6. – Specifikace přístroje BT – 2.....	50
Tab. 7 – Tabulka hodnot termočlánku č. 1.....	58
Tab. 8 – Tabulka hodnot termočlánku č. 2.....	59
Tab. 9 – Tabulka hodnot termočlánku č. 1.....	65
Tab. 10 – Tabulka hodnot termočlánku č. 2.....	66
Tab. 11 – Tabulka hodnot termočlánku č. 1.....	72
Tab. 12 – Tabulka hodnot termočlánku č. 2.....	73
Tab. 13 – Tabulka hodnot termočlánku č. 3.....	78
Tab. 14 – Tabulka hodnot termočlánku č. 2.....	79
Tab. 15 – Tabulka hodnot termočlánku č. 1.....	83
Tab. 16 – Tabulka hodnot termočlánku č. 2.....	84
Tab. 17 – Maximální hodnota teploty interpass na termočlánku č. 1	89
Tab. 18 – Maximální hodnota teploty interpass na termočlánku č. 2	89
Tab. 19 – Šířka teplotního pole navařené stěny dle časové prodlevy.....	90
Tab. 20 – Šířka navařené stěny dle časové prodlevy.....	92
Tab. 21 – Výška navařené stěny dle časové prodlevy	93

Seznam obrázků

Obr. 1 – Rozdělení metod AM pro zpracování kovových materiálů	12
Obr. 2 – Schéma zařízení pro metodu SLS.....	13
Obr. 3 – Schéma zařízení pro LMD	14
Obr. 4 a 5 – Ukázka výrobků vytvořených metodou WAAM.....	15
Obr. 6 – Princip metody WAAM (s pomocí TIG navařování).....	16
Obr. 7 – Část podvozku Bombardier aerospace ze slitiny Ti6Al4V.....	17
Obr. 8 – Hliníkové žebro křídla s dvěma roboty a otočným stolem.....	17
Obr. 9 – Popis svarového spoje	20
Obr. 10 – Jednovrstvý a vícevrstvý svarový spoj	21
Obr. 11 – Popis a značky svarů	21
Obr. 12 – Hlavní polohy svařování.....	22
Obr. 13 – Rozdělení metod svařování	22
Obr. 14 – Detailní schéma hořáku – princip MIG svařování	23
Obr. 15 – Schéma zařízení pro MIG svařování	24
Obr. 16 – Průběh proudu v závislosti na čase u zkratového přenosu	25
Obr. 17 – Průběh napětí v závislosti na čase u zkratového přenosu.....	25
Obr. 18 – Průběh proudu v závislosti na čase u sprchového přenosu	25
Obr. 19 – Průběh napětí v závislosti na čase u sprchového přenosu.....	25
Obr. 20 – Průběh proudu v závislosti na čase u impulzního přenosu	26
Obr. 21 – Průběh napětí v závislosti na čase u impulzního přenosu.....	26
Obr. 22 – Logo společnosti Fronius	27
Obr. 23 – Princip svařování CMT	28
Obr. 24 – Záznam průběhu proudu na čase při CMT	29
Obr. 25 – Záznam průběhu napětí na čase při CMT	29
Obr. 26 – Záznam průběhu proudu na čase při CMT – Cycle step	29
Obr. 27 – Záznam průběhu napětí na čase při CMT – Cycle step.....	29
Obr. 28 – Záznam průběhu proudu na čase při CMT – pulz.....	30
Obr. 29 – Záznam průběhu napětí na čase při CMT – pulz	30
Obr. 30 – Tvar housenky – zkratový přenos.....	30
Obr. 31 – Tvar housenky – impulzní přenos.....	31
Obr. 32 – Tvar housenky – sprchový přenos	31

Obr. 33 –Tvar housenky – CMT	31
Obr. 34 – Tvar housenky – CMT – Cycle step	31
Obr. 35 – Tvar housenky – CMT – Pulz.....	32
Obr. 36 – Ukázka termogramu panelového domu.....	39
Obr. 37 – Spektrum elektromagnetické vlnění	40
Obr. 38 – Termoelektrický jev	41
Obr. 39 – Schéma termočlánku	42
Obr. 40 – Předpoklad vzniklého tvaru stěny během experimentu	43
Obr. 41 a 42 – Snímání termokamerou shora (vlevo) a ze strany (vpravo)	44
Obr. 43 – Robotické svařovací pracoviště FS, UST	45
Obr. 44 – Termokamera FLIR E95	45
Obr. 45 – Měřící stanice Ahlborn Almemo 5690-2.....	46
Obr. 46 – 6-osý robot FANUC Arc Mate 100iC	47
Obr. 47 – Jednoosé polohovadlo.....	48
Obr. 48 – Příklad přichycení hliníkové destičky.....	49
Obr. 49 – Svařovací zdroj TPS 3200 CMT.....	49
Obr. 50 – Přístroj BT – 2.....	50
Obr. 51 – Model s rozměry základní desky.....	52
Obr. 52 – Deska s navrtanými dírami a předkreslenou dráhou svařování.....	53
Obr. 53 – Proces svařování drátků termočlánku	53
Obr. 54 – Svařování termočlánků a desky	54
Obr. 55 – Upnutí desky na pracovní stůl	54
Obr. 56 – Umístění termokamery pro snímání shora	55
Obr. 57 – Záznam I, U – housenka č. 1	56
Obr. 58 – Záznam I, U – housenka č. 3	56
Obr. 59 – Záznam I, U – housenka č. 5	56
Obr. 60 – Záznam I, U – housenka č.8	56
Obr. 61 – Záznam I, U – housenka č. 10	57
Obr. 62 – Ukázka záznam teploty v závislosti na čase u termočlánku č. 1.....	57
Obr. 63 – Ukázka záznam teploty v závislosti na čase u termočlánku č. 2.....	59
Obr. 64 – Ukázka záznam teploty v závislosti na čase u termočlánku č. 3.....	60
Obr. 65 – Ukázka záznam teploty v závislosti na čase u termočlánku č. 3.....	60

Obr. 66 – Záznam termočlánků 1, 2, 3 a 4 při navařování – prodleva 1 sekunda.....	61
Obr. 67 – Záznam termočlánků 1 a 2 při navařování – prodleva 1 sekunda.....	62
Obr. 68 – Teplotní pole po navařené 1. housence	63
Obr. 69 – Teplotní pole po navařené 3. housence	63
Obr. 70 – Teplotní pole po navařené 6. housence	64
Obr. 71 – Teplotní pole po navařené 10. housence	64
Obr. 72 – Ukázka záznam teploty v závislosti na čase u termočlánku č. 1.....	75
Obr. 73 – Ukázka záznam teploty v závislosti na čase u termočlánku č. 2.....	66
Obr. 74 – Záznam termočlánků navařování – prodleva 60 sekund (shora)	67
Obr. 75 – Teplotní pole po navařené 1. housence	67
Obr. 76 – Teplotní pole před navařením 2. housenky.....	68
Obr. 77 – Teplotní pole po navařené 3. housence	68
Obr. 78 – Teplotní pole před navařením 4. housenky.....	68
Obr. 79 – Teplotní pole po navařené 6. housence	69
Obr. 80 – Teplotní pole před navařením 7. housenky.....	69
Obr. 81 – Teplotní pole po navařené 9. housence	69
Obr. 82 – Teplotní pole před navařením 10. housenky.....	70
Obr. 83 – Proces odstranění vrstvy černého prachu mezi housenkami.....	71
Obr. 84 – Ukázka záznam teploty v závislosti na čase u termočlánku č. 1.....	72
Obr. 85 – Ukázka záznam teploty v závislosti na čase u termočlánku č. 2.....	73
Obr. 86 – Záznam termočlánků navařování – prodleva 60 sekund (ze strany).....	74
Obr. 87 – Výsledná navařená stěna po procesu čištění po každé housence	74
Obr. 88 – Ukázka navařené stěny po deváté housence	75
Obr. 89 – Upnutí termočlánků pomocí upínáků.....	76
Obr. 90 a 91 – Navařená stěna po 1. housence (vlevo) a 3. housence (vpravo).....	76
Obr. 92 a 93 – Navařená stěna po 7. housence (vlevo) a 10. housence (vpravo).....	77
Obr. 94 – Ukázka záznam teploty v závislosti na čase u termočlánku č. 3.....	77
Obr. 95 – Ukázka záznam teploty v závislosti na čase u termočlánku č. 2.....	78
Obr. 96 – Záznam termočlánků navařování – prodleva 120 sekund (shora)	79
Obr. 97 – Teplotní pole po navařené 1. housence	80
Obr. 98 – Teplotní pole před navařením 2. housenky.....	80
Obr. 99 – Teplotní pole po navařené 3. housence	80

Obr. 100 – Teplotní pole před navařením 4. housenky.....	81
Obr. 101 – Teplotní pole po navaření 6. housenky	81
Obr. 102 – Teplotní pole před navařením 7. housenky.....	81
Obr. 103 – Teplotní pole po navaření 9. housenky	82
Obr. 104 – Teplotní pole před navařením 10. housenky.....	82
Obr. 105 – Ukázka záznam teploty v závislosti na čase u termočlánku č. 1.....	83
Obr. 106 – Ukázka záznam teploty v závislosti na čase u termočlánku č. 2.....	84
Obr. 107 – Záznam termočlánků navařování – prodleva 120 sekund (ze strany).....	85
Obr. 108 – Záznam tvorby 10. housenky pomocí softwaru FLIR Tools	85
Obr. 109 – Termogram po navaření 10. housenky.....	86
Obr. 110 – Termogram pořízený po 10 sekundách po navaření 10. housenky	86
Obr. 111 – Termogram po 30 sekundách po navaření 10. housenky	86
Obr. 112 – Termogram po 60 sekundách po navaření 10. housenky	87
Obr. 113 – Termogram po 120 sekundách po navaření 10. housenky	87
Obr. 114 – Výsledek po navaření 10. housenky	87
Obr. 115 – Záznam termočlánku č. 1 z vybraných měření.....	88
Obr. 116 – Prodleva 1 sekunda – pohled shora	91
Obr. 117 – Prodleva 60 sekund – pohled shora	92
Obr. 118 – Prodleva 120 sekund – pohled shora	92
Obr. 119 – Prodleva 120 sekund – pohled ze strany.....	93
Obr. 120 – Prodleva 60 sekund – pohled ze strany.....	93
Obr. 121 – Prodleva 0 sekund – pohled ze strany.....	93