



ČVUT
ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE

FAKULTA STROJNÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**OVĚŘENÍ VÝŠKY NAVAŘENÉ VRSTVY PROCESU WAAM POMOCÍ
SENZORICKÝCH SYSTÉMŮ**

Verification of the height of the welded layer of the
WAAM process using sensor systems

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR:

Author

Bc. Rudolf Schwarz

VEDOUCÍ PRÁCE:

Supervisor

Ing. Tomáš Gurčík

STUDIJNÍ PROGRAM:

Study programme

N0715A270001 Výrobní inženýrství

STUDIJNÍ OBOR:

Field of study

2301R000 Studijní program je bezoborový

Praha 2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Schwarz** Jméno: **Rudolf** Osobní číslo: **474989**
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:

Ověření výšky navažené vrstvy procesu WAAM pomocí senzorických systémů

Název diplomové práce anglicky:

Verification of the height of the welded layer of the WAAM process using sensor systems

Pokyny pro vypracování:

- 1) Rozbor problematiky procesu WAAM
- 2) Rozbor možností sledování navažené vrstvy
- 3) Popis senzorických systémů použitelných k této problematice
- 4) Návrh experimentu – volba procesu, parametrů svařování, metodika měření
- 5) Vyhodnocení výsledků a závěr

Seznam doporučené literatury:

- [1] Ziping Yu, Zengxi Pan, Donghong Ding et al. A practical fabrication strategy for wire arc additive manufacturing of metallic parts with wire structures, 25 February 2021, PREPRINT (Version 1) available at Research Square [<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-225836/v1>]
- [2] Rios, Sergio & Colegrove, Paul & Martina, Filomeno & Williams, Stewart. (2018). Analytical Process Model for Wire + Arc Additive Manufacture. Additive Manufacturing. 21. 10.1016/j.addma.2018.04.003.
- [3] Kissinger T, Gomis B, Ding J, et al., (2019) Measurements of wire + arc additive manufacturing layer heights during arc operation using coherent range-resolved interferometry (CO-RRI). In: Joint Special Interest Group meeting between euspen and ASPE Advancing Precision in Additive Manufacturing, 16-18 September 2019, Nantes, France

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Tomáš Gurčík ústav strojírenské technologie FS

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

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

Datum zadání diplomové práce: **21.04.2022** Termín odevzdání diplomové práce: **15.08.2022**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2022**

Ing. Tomáš Gurčík
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 Ing. Tomáše Gurčíka 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 rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Tomáši Gurčíkovi za odborné vedení, množství cenných a inspirativních rad, doporučení a připomínek a zároveň za velikou trpělivost a ochotu při konzultacích poskytnutých ke zpracování této práce. Dále bych rád poděkoval také konzultantovi mé práce doc. Ing. Ladislavu Kolaříkovi Ph.D. za jeho čas a všestrannou pomoc. Děkuji také mé rodině, která mi studium na této škole umožnila.

Anotace

Diplomová práce na téma ověření výšky navařené vrstvy v procesu WAAM pomocí senzorických systémů se zabývá stručným rozbohem aditivní metody WAAM. Je vytvořen základní přehled možnosti snímání výšky navařené vrstvy a základní metody měření výšky vrstvy jsou v teoretické části rozebrány. V další části této práce je navržen experiment včetně offline simulace, který byl později realizován. Vzorky byly navařeny metodou CMT, CMT cycle step a CMT pulse. Všechny navařené vrstvy byly proměřeny laserovým senzorem, posuvným měřítkem a svařovací kamerou. Vyhodnocovány jsou naměřené výšky každé vrstvy u všech vzorků a zkoumán je také průměrný přírůstek příslušné metody navařování.

Název diplomové práce:	Ověření výšky navařené vrstvy procesu WAAM pomocí senzorických systémů
Autor práce:	Bc. Schwarz Rudolf
Vedoucí práce:	Ing. Gurčík Tomáš
Konzultant:	doc. Ing. Kolařík Ladislav Ph.D.
Akademický rok:	2021/2022
Vysoká škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	12133 – Ústav strojírenské technologie
Vedoucí ústavu:	doc. Ing. Kolařík Ladislav Ph.D.
Rozsah práce:	65 stránek (včetně příloh), 5 tabulek, 50 obrázků
Klíčová slova:	WAAM, aditivní výroba, výška vrstvy, snímač, CMT, CMT pulse, CMT cycle step, šířka vrstvy

Annotation

The thesis on the verification of the height of the welded layer of the WAAM process using sensor systems deals with a brief analysis of the additive WAAM method. A basic overview of the possibility of sensing the height of the welded layer is made and the basic methods of measuring the layer height are discussed in the theoretical part. In the next part of this work, an experiment including offline simulation is designed and later implemented. The samples were welded by CMT, CMT cycle step and CMT pulse method. All the welded layers were verified by laser sensor, calipers and welding camera. The measured heights of each layer for all samples are evaluated and the average increment of the respective welding method is also investigated.

Title of the final thesis:	Verification of the height of the welded layer of the WAAM process using sensor systems
Author:	Bc. Schwarz Rudolf
Supervisor:	Ing. Gurčík Tomáš
Consultant:	doc. Ing. Kolařík Ladislav Ph.D.
Academic year:	2021/2022
University:	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	12133 – Department of Manufacturing Technology
Head of department:	doc. Ing. Kolařík Ladislav Ph.D.
Extent:	65 pages (including attachments), 5 tables, 50 pictures
Keywords:	WAAM, additive manufacturing, layer height, sensor, CMT, CMT pulse, CMT cycle step, layer width

Obsah

1. Úvod a cíl práce	11
2. Wire and arc additive manufacturing (WAAM)	14
2.1. Princip metody WAAM	14
2.2. Svařovací procesy v technologii WAAM	16
2.2.1. MIG/MAG	16
2.2.2. TIG.....	17
2.3. Geometrie návaru	18
2.3.1. Stanovení rozměrů	18
2.4. Geometrie jedné vrstvy	19
3. Monitorování výšky vrstvy při navařování	21
3.1. Monitorování výšky pomocí měření proudu při navařování	22
3.2. Monitorování výšky pomocí laserového snímače	25
3.3. Monitorování výšky pomocí svařovací kamery	27
4. Praktická část – EXPERIMENT.....	29
4.1. Návrh experimentu	29
4.1.1. Specifikace použitých modifikovaných svařovacích procesů	30
4.1.2. Návrh vzorků a jejich upevnění	32
4.1.3. Návrh umístění měřících systémů	35
4.1.4. Offline simulace experimentu	36
4.2. Realizace experimentu.....	38
4.2.1. Pracoviště	38
4.2.2. Příprava experimentu	39

4.2.3. Metodika odečítání výšky vrstvy	41
4.2.4. Průběh navařování a měření	44
4.3. Zpracování naměřených hodnot.....	51
5. Diskuze výsledků	52
6. Závěr.....	55
Bibliografie.....	56
Seznam tabulek	59
Seznam obrázků.....	60
Přílohy.....	62

Seznam zkratek

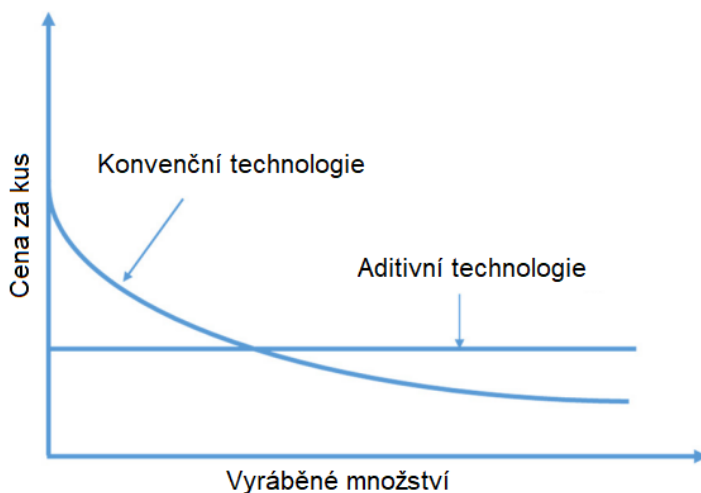
2D	2 dimension (2 rozměrný)
3D	3 dimension (3 rozměrný)
AL	Arc length (délka oblouku)
Al	Aluminium (hliník)
AM	Additive manufacturing (aditivní výroba)
aWD´	Apparent weld pool depth (zdánlivá hloubka svarové lázně)
BTF	Buy to fly (kup a leť)
CAD	Computer aided design (počítačem podporované návrhářství)
CMT	Cold Metal Transfer (přenos studeného kovu)
CO-RRI	Coherent range-resolved interferometry (koherentní interferometrie s rozlišením vzdálenosti)
CTWD	Contact tip to work distance (kontaktní hrot na pracovní vzdálenost)
ČVUT	České vysoké učení technické
EH	Effective height (efektivní výška návaru)
EWT	Effective wall thickness (efektivní tloušťka stěny)
EWV	Effective wall width (efektivní šířka stěny)
FS	Fakulta strojní
GMA	Gas metal arc (plyn kovový oblouk)
GMAW	Gas metal arc welding (Obloukové svařování plynem)
LH	Layer height (výška vrstvy)
MAG	Metal Active Gas (kov aktivní plyn)
MIG	Metal Inert Gas (kov inertní plyn)
OCT	Optical coherence tomography (optická koherentní tomografie)
R	Re-melting (přetavení)
r	Radius (poloměr)
S	Wire stickout length (délka vyčnívajícího drátu)

SHM	Sensor for height measurement (senzor pro měření výšky vrstvy)
SW	Surface waviness (vlnitost povrchu)
SWM	Sensor for width measurement (senzor pro měření šířky vrstvy)
TIG	Tungsten Inert Gas (wolfram inertní plyn)
WAAM	Wire and Arc Additive Manufacturing (drát a oblouk aditivní výroba)
WW	Wall width (šířka stěny)

1. Úvod a cíl práce

Aditivní technologie (AM) je výrobní metoda, která je založena na principu vrstvení materiálu, čímž je možné vytvářet součásti. I v dnešní době jde pořád o relativně mladou výrobní technologii. Prakticky veškeré aditivní technologie byly vyvinuty v posledních třiceti letech a každým rokem stoupá jejich potenciál. Nejprve se aditivní technologie používaly k výrobě plastových prototypů přímo z CAD modelu a to hlavně díky zkrácení času výroby. Postupem času se aditivní technologie začaly využívat nejen k tisku plastových dílů, ale i kovových součástí, což zapříčinilo značný nárůst zájmu průmyslových podniků a s tím i spojený sektor výzkumu. Každým rokem jsou objevené nové způsoby, jak zlepšit součásti vyráběné aditivními technologiemi, čímž roste i jejich využití v praxi. [1]

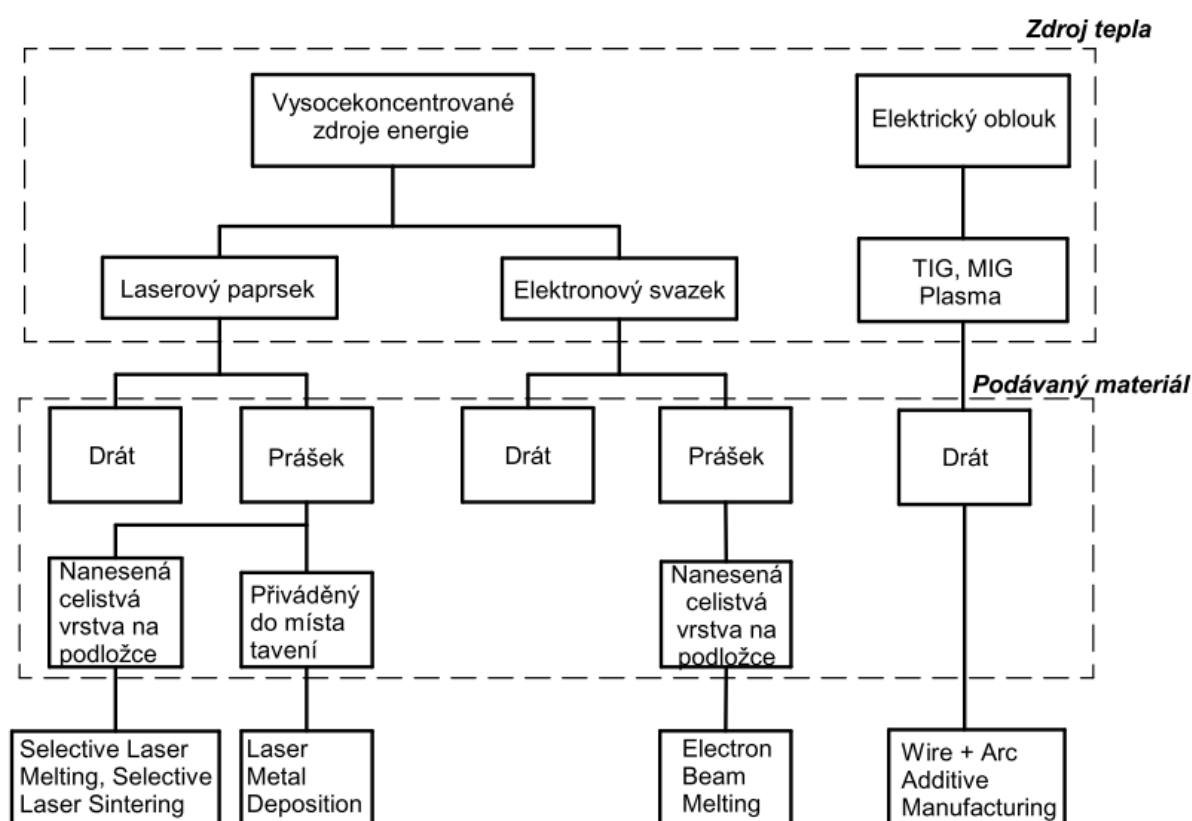
Aditivní technologie na rozdíl od ostatních způsobů vytváření součástí umožňuje vytvářet velice složité součásti, které by bylo obtížné nebo nemožné vyrobit jinými technologiemi. Další velkou výhodou je snížení plýtvání materiálem, poněvadž se pracuje s vyšší geometrickou přesností. Volba použití technologie zpravidla závisí na počtu kusů. Obecně lze říci, že přínos aditivních technologií je větší při nižších výrobních množstvích, protože náklady na kus jsou nižší ve srovnání s konvenčními technologiemi. Například technologiemi lití nebo obrábění budou velké náklady na jeden kus. To je zapříčiněno pořizovacími náklady na přípravky, poměrně dlouhými programovacími časy oproti výrobním časům a s tím spojeným nákladům. Pokud se ale budeme bavit o sériovosti, veškeré přípravky či programy jsou vytvořené, a tak s rostoucím počtem kusů klesá i cena.



Obr. 1 Porovnání nákladů na kus v závislosti na množství pro konvenční a aditivní technologie.
Upraveno dle [2]

U aditivních technologií je to ale jinak. Aditivní technologie nepotřebují žádné přípravy podobné pro konvenční technologie, čímž značně klesá cena prvního kusu. Se stoupajícím počtem vyráběných kusů se ale cena na kus téměř nemění, a proto je využití aditivních technologií vhodné do určitého množství vyráběných součástí. Závislost ceny za kus na vyráběném množství pro aditivní a konvenční technologie je graficky znázorněna na Obr. 1. [2]

Jak již bylo zmíněno, aditivní technologie umožňují vyrábět součásti jak z plastového, tak i kovového materiálu. Tyto materiály jsou natavované různými zdroji tepla, dle kterých se aditivní technologie rozdělují. Rozdělení aditivních technologií je na Obr. 2. Jednou z nich je i metoda WAAM, kterou se budu blíže v diplomové práci zabývat.



Obr. 2 Rozdělení aditivních metod. Upraveno dle [3]

Technologií WAAM jsem se zabýval již v bakalářské práci, kde se zkoumal vliv parametrů aditivního procesu WAAM na kvalitu návarů. Kromě zpracované rešerše byl součástí bakalářské práce také experiment zaměřený na zkoumání vlivu různých parametrů. Celkem byly navařeny tři vzorky s různými postupy pomocí modifikované metody CMT. Jeden vzorek byl navařen kontinuálně, druhý s teplotou interpass 50 °C a třetí s teplotou interpass

50 °C společně s upravením návarové plochy před dalším navařováním. Jednalo se o jednoduchý návar o délce 130 mm, který je tvořen 30 vrstvami. Následně byly všechny vzorky vyhodnocovány dle zadaných kritérií. Při použití různých postupů navařování dosahovaly vzorky také jiných výšek, ačkoliv všechny sestávaly ze 30 vrstev. V návaznosti na bakalářskou práci se tedy teď budu zabývat ověřením výšky navařené vrstvy procesem WAAM pomocí sensorických systémů.

Cílem teoretické části této práce je rozebrat problematiku procesu WAAM včetně možnosti využití modifikovaných svařovacích procesů, rozebrat možnosti sledování výšky navařené vrstvy, popsat sensorické systémy využitelné při sledování výšky navařené vrstvy. U praktické části proběhne návrh experimentu – volba svařovacího procesu, návrh vzorku, návrh parametrů svařování, navrhnutá bude metodika měření. Následně bude navařeno několik vzorků, které budou vyhodnoceny dle naměřených výškových rozměrů. Cílem praktické části této práce je ověřit výšky navařené vrstvy procesu WAAM pomocí sensorických systémů.

2. Wire and arc additive manufacturing (WAAM)

Jednou z mnoha aditivních metod, které jsou v dnešní době rozšířené, je metoda WAAM. Jde o aditivní technologii snižující náklady na výrobu součástí zejména vysokým využitím materiálu. V leteckém průmyslu se takový poměr nazývá buy to fly (dále jen BTF). BTF vyjadřuje poměr hmotnosti vstupního materiálu k hotovému výrobku. [4] [5]

2.1. Princip metody WAAM

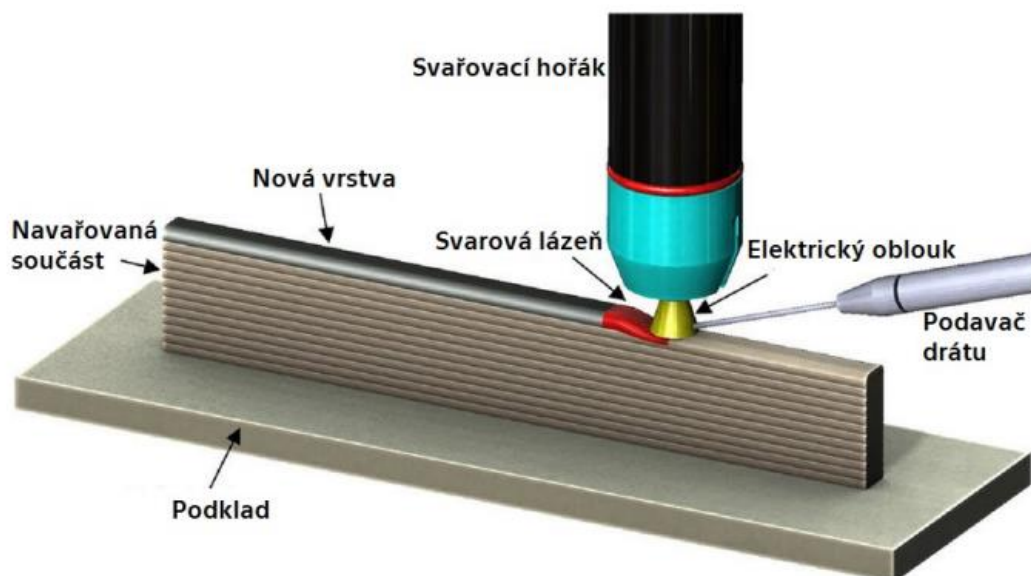
Metoda WAAM spočívá především v kombinaci elektrického oblouku jako zdroje tepla pro natavení přídavného materiálu a samotným přídavným materiálem, kterým je svařovací drát. Vzhledem k využívání elektrického oblouku se WAAM pracoviště neobejde bez standardního svařovacího zařízení jako je: svařovací zdroj, hořáky, systémy pro podávání drátu a podobné. Přesnou polohu navařování je nutné zajistit plně automatickým systémem, jako jsou především robotické systémy či numericky řízené portály. Oba je možné vidět na Obr. 3. [4]



Obr. 3 - Robotické pracoviště a numericky řízený portál [4]

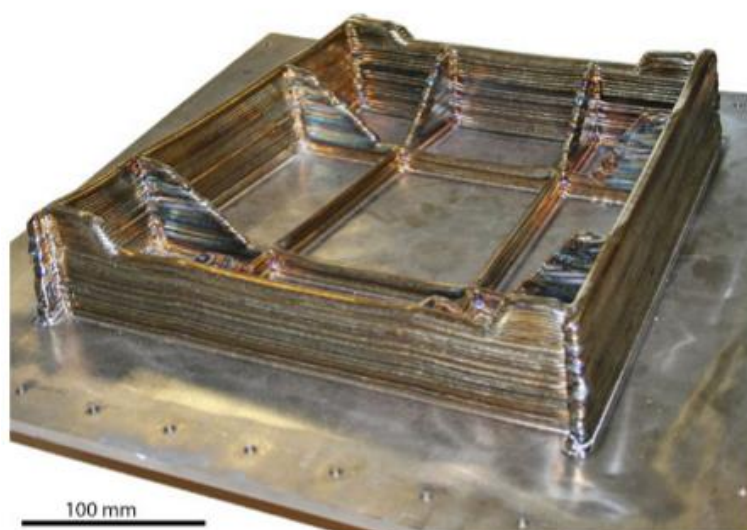
Vytváření 3D objektů podle CAD předlohy spočívá v postupném nanášení jednotlivých návarových housenek na sebe. Vždy se navařují jednotlivé vrstvy po trajektoriích budoucí součásti. Trajektorie jsou dány vždy vodorovným řezem modelu součásti v příslušné výšce a navařuje se vždy od spodní vrstvy nahoru. Výška vrstvy je zpravidla v rozsahu 1 – 2mm, čímž je dána i vysoká drsnost navařeného povrchu. Z tohoto důvodu není možné navařenou součást pokládat za hotovou a musí vždy následovat obrábění. [4] [5]

Princip navařování je znázorněn na Obr. 4. Na podklad jsou pomocí elektrického oblouku a přídavného materiálu navařovány housenky tvořící konečnou součást.



Obr. 4 Schéma navařování metodou WAAM [6]

Součást navařená technologií WAAM před dokončovacími operacemi je na Obr. 5. Kvůli vysoké drsnosti povrchu musí dojít k následnému obrobení součásti a dále je nutné součást odříznout od podložky.



Obr. 5 - Výrobek navařený metodou WAAM [4]

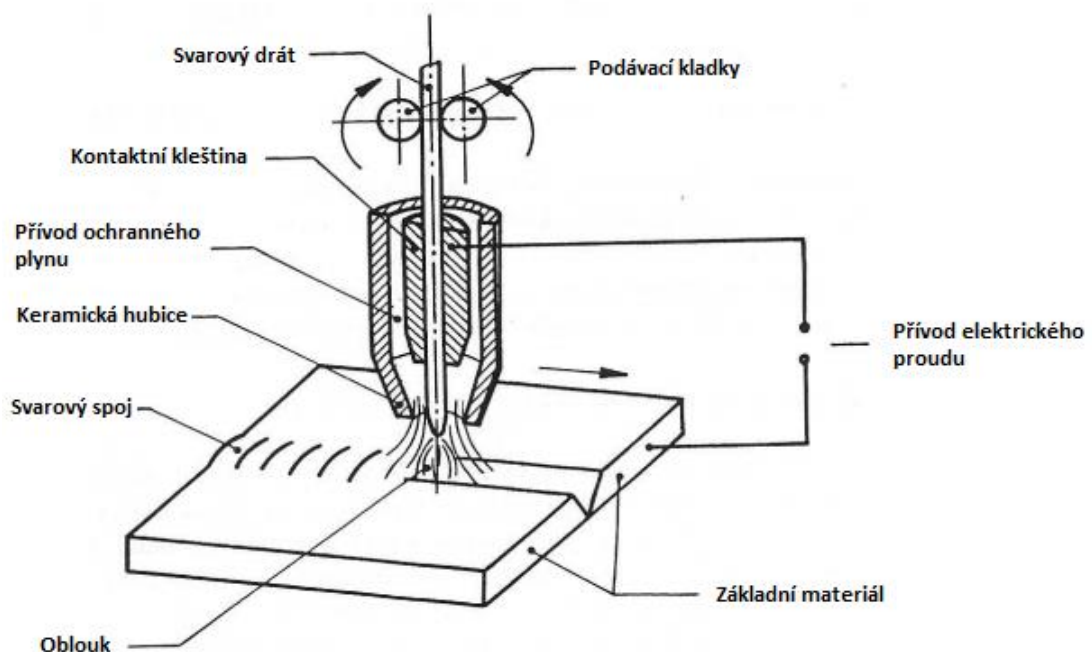
Metoda WAAM je vhodná především pro jednoduché a méně tvarově složité díly, zároveň však umožňuje navařovat rozměrově větší součásti, kdy jejich velikost je omezena především pracovním prostorem navařovacích robotů. Rychlost depozice může dosahovat až 10 kg/h. Vysoké rychlosti nanášení však mají za následek snížení přesnosti dílu. Pro navařování je možné použít veškeré konstrukční i vysokolegované oceli, dále například hliník, titan, nikl, měď a jejich slitiny. [4] [5]

2.2. Svařovací procesy v technologii WAAM

Jak již bylo uvedeno, zdrojem tepla pro tavení přídavného materiálu je elektrický oblouk. Aditivní metoda WAAM se tedy neobjede bez použití svařovacích procesů. Nejčastěji je pro tvoření návarů využíváno svařování elektrickým obloukem v ochranných atmosférách, tedy metoda MIG/MAG (Metal Inert/Active Gas) a metoda TIG (Tungsten Inert Gas). Existují i další svařovací procesy, které se u technologie WAAM spíše nevyužívají. [5]

2.2.1. MIG/MAG

Nejčastějším svařovacím procesem je MIG/MAG. Princip je založený na elektrickém oblouku hořícím mezi tavící se elektrodou přídavného materiálu a základním materiálem. Elektrický oblouk je zároveň chráněn ochrannou atmosférou, která se podle použitého plynu dělí na inertní (MIG) nebo aktivní (MAG). Přídavný materiál je dodáván vždy podavačem. Při svařování se většinou volí nepřímá polarita, při svařování hliníku se polarita mění. Tato metoda je oproti TIG charakteristická především vyšší rychlostí svařování, z čehož plyne i vyšší produktivita. Jako inertní ochranné plyny je možné využít argon, helium, či jejich směsi, pro MAG se využívají směsné plyny na bázi argonu nejčastěji s oxidem uhličitým nebo kyslíkem. [7]

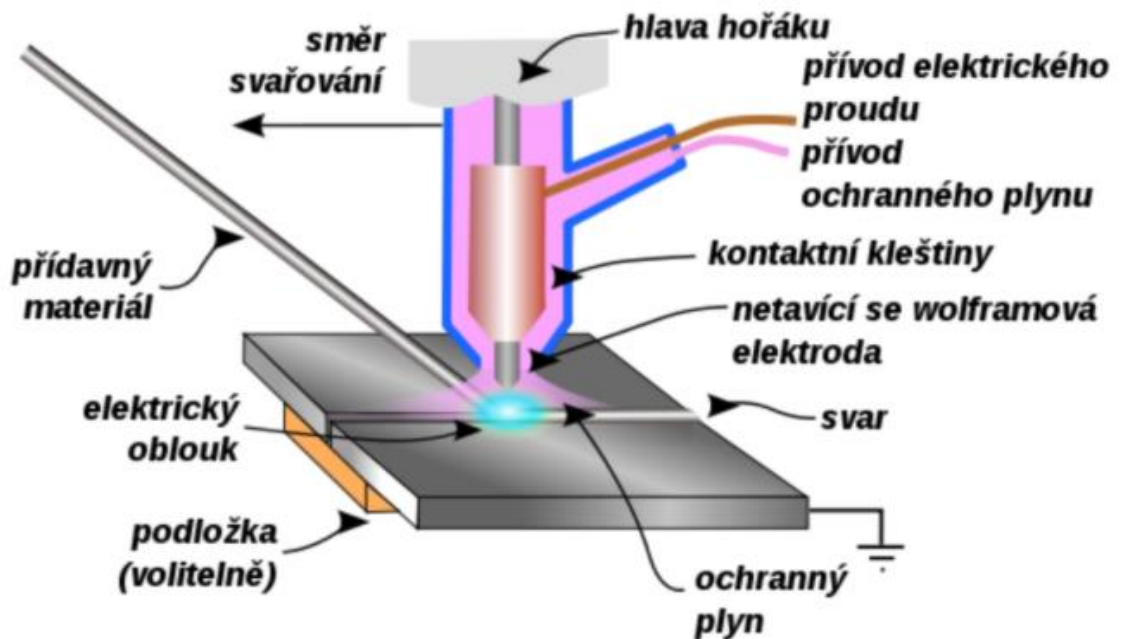


Obr. 6 - Schéma svařování metodou MIG/MAG [8]

Velkým problémem při navařování rozměrnějších součástí je velké množství vneseného tepla. Z tohoto důvodu se u WAAM využívají především modifikace MIG/MAG. V současné době je možné využívat například metodu CMT (Cold metal transfer) a její variace – CMT pulse, CMT cycle step, CMT advanced a kombinaci CMT advanced pulse. Pomocí těchto metod budou zhotoveny experimentální vzorky, a proto je vhodné použít metody více přiblížit v praktické části. [7]

2.2.2. TIG

Na rozdíl od MIG/MAG hoří u TIGu elektrický oblouk mezi netavící se wolframovou elektrodou a základním materiálem. Příkladný materiál je veden do místa navařování automatickým podavačem. Elektrický oblouk chrání inertní ochranná atmosféra na bázi argonu nebo směsi argonu a hélia. Při svařování se volí polarita přímá, tzn. wolframová elektroda je připojena na mínus pól. Metoda TIG se dále vyznačuje nižším výkonem odtavení. Problémem je také velké vnesené teplo, jež omezuje využití metody v praxi. Z tohoto důvodu se při navařování WAAM převážně volí modifikace MIG/MAG. [8]



Obr. 7 - svařovací proces TIG [9]

2.3. Geometrie návaru

Jedním z mnoha způsobů, které určují výslednou kvalitu návaru je nepochybně geometrie návaru. Pomocí geometrie je možné určit, kolik materiálu z navařené vrstvy může být využito pro výslednou součást a jaké procento bude odpad. V zásadě se geometrie při experimentech určuje z příčného řezu. [10]

2.3.1. Stanovení rozměrů

Pro vyhodnocení určujeme tzv. efektivní rozměry na metalografickém výbrusu. Efektivními rozměry jsou:

- EWT – efektivní tloušťka stěny (effective wall thickness)
- SW – vlnitost povrchu (surface waviness)
- EH – efektivní výška návaru (effective height) [10]

V praxi se nejprve nasnímá metalografický výbrus do digitální formy pomocí digitálního mikroskopu a následně se provede odečítání rozměrů pomocí příslušného softwaru. Pro odečítání je důležité v softwaru nejdříve zakreslit základnu odečítání, kterou je rovnoběžka s povrchem základního materiálu, od které se postupně určují měřené veličiny, které jsou na základnu kolmé. Měřené rozměry jsou vyznačené vlevo na Obr. 8. Vpravo je vyobrazeno odečítání parametrů v praxi. [11]



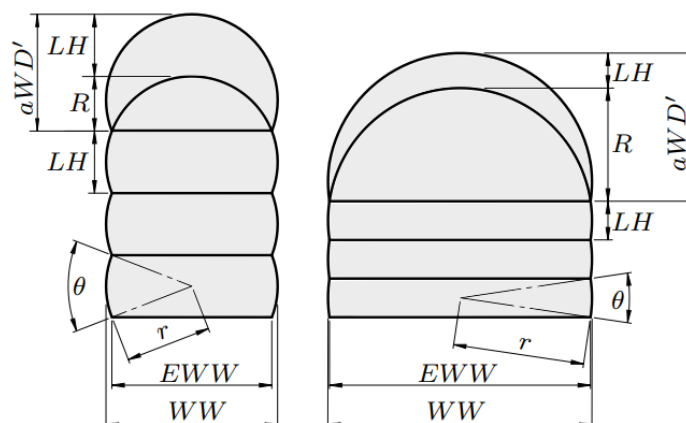
Obr. 8 – Odečítání geometrických parametrů [10] [11]

2.4. Geometrie jedné vrstvy

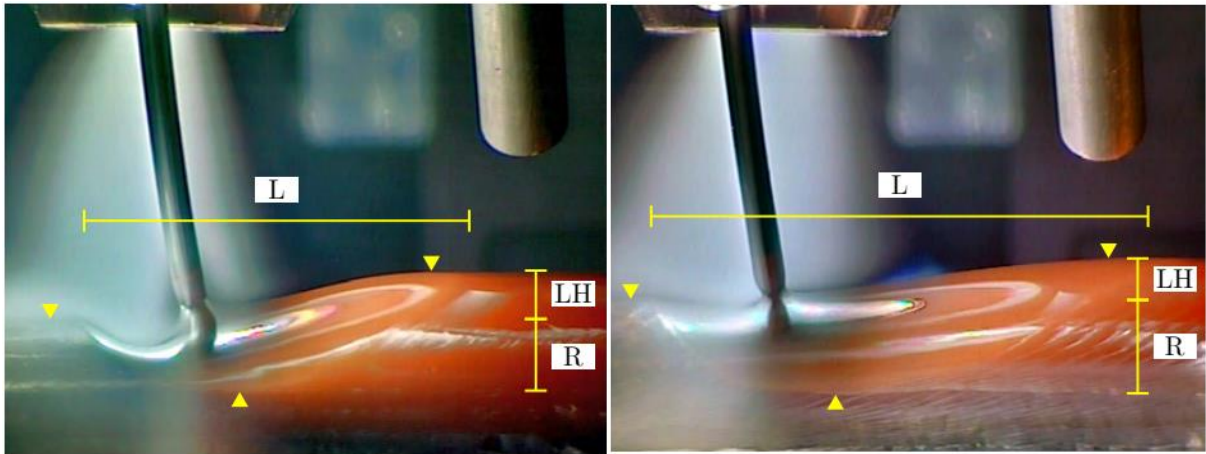
Výslednou kvalitu součásti udává geometrie návaru. Návar je tvořen vrstvením housenek na sebe. Z tohoto hlediska je dobré se zaměřit i na geometrii jedné housenky. Hlavními geometrickými parametry, které ovlivňují výslednou kvalitu součásti jsou, jak již bylo uvedeno, efektivní šířka stěny a výška vrstvy. Tyto rozměry ovlivňuje geometrie svarové lázně a vyplývají z interakce mezi výkonem oblouku, rychlostí pojezdu hořáku, rychlostí podávání drátu, interpass teploty a vlastnostmi materiálu. [12]

Rozměry svarové lázně lze při modelování svařovacích procesů vypočítat. Základy analytických řešení geometrie jedné vrstvy vyvinuli Rosenthal a Rykalin, kteří zjistili, že lze problém řešit ve dvou rovinách. Bylo možné uvažovat o 2D analytickém řešení, ovšem takový model platí pouze tam, kde se teplotní pole s tloušťkou výrazně nemění. V opačném případě byly sestaveny matematické modely pro 3D řešení. Tyto základy umožňovaly další vývoj pro výpočet rozměrů jedné vrstvy při svařování. [12]

Na Obr. 9 jsou znázorněné dva příčné řezy, na kterých můžeme demonstrovat, jak nastavení vstupních parametrů ovlivňuje výsledný návar. U prvního návaru je svarová lázeň tvořena nízkým výkonem oblouku. To má za následek větší výšku vrstvy a užší návar. Opačný případ je znázorněn napravo. Oba návary byly provedeny se stejným objemem přídavného materiálu na jednu vrstvu. Výšku vrstvy udává parametr LH (layer height), šířka stěny je označená WW (wall width), efektivní šířka stěny EWW (effective wall width), velikost přetavení R (re-melting), zdánlivá hloubka svarové lázně aWD' (apparent weld pool depth), poloměr r (radius) a úhel označený písmenem θ . [12]



Obr. 9 - Příčné řezy navařenými stěnami s konstantním objemem materiálu na vrstvu a s vyznačením hlavních rozměrů [12]



a)

b)

Obr. 10 - Geometrie svarové lázně a) při nižším výkonu oblouku a b) při vyšším výkonu oblouku [12]

Provedený experiment, který měl ověřit svařovací model v praxi, ukázal, že při rozdílné tepelné účinnosti je možné vytvořit stejnou geometrii použitím vysokého a nízkého výkonu oblouku. To má však za následek rozdíl v geometrii obou svarových lázních (Obr. 10). Na obrázcích je také možno pozorovat, jak oblouk ovlivňuje více přední než zadní část svarové lázně. [12]

Experiment ověřil, že nastavením vstupních parametrů můžeme ovlivnit geometrii navařované vrstvy. Při navařování součástí o více vrstvách pak geometrie jedné vrstvy rozhoduje i o výsledném návaru jak z pohledu geometrie, tak i kvality provedení.

3. Monitorování výšky vrstvy při navařování

Podstatným faktorem ovlivňující geometrii vrstvy je především vnesené teplo při navařování, které je ovlivněno dosavadní výškou návaru. Pro dosažení opakovatelného a stabilního nanášení je nutné vnesené teplo regulovat, čehož se docílilo pomocí tepelné regulace – teploty interpass. [13]

Dalším neméně důležitým faktorem ovlivňující geometrii navařované vrstvy je náklon svařovacího hořáku vůči základnímu materiálu. Po několika studiích bylo dokázáno, že pro nízkou a střední složitost dílu je nejvíce spolehlivý způsob depozice nanášet materiál hlavou hořáku kolmo k povrchu základního materiálu. [13]

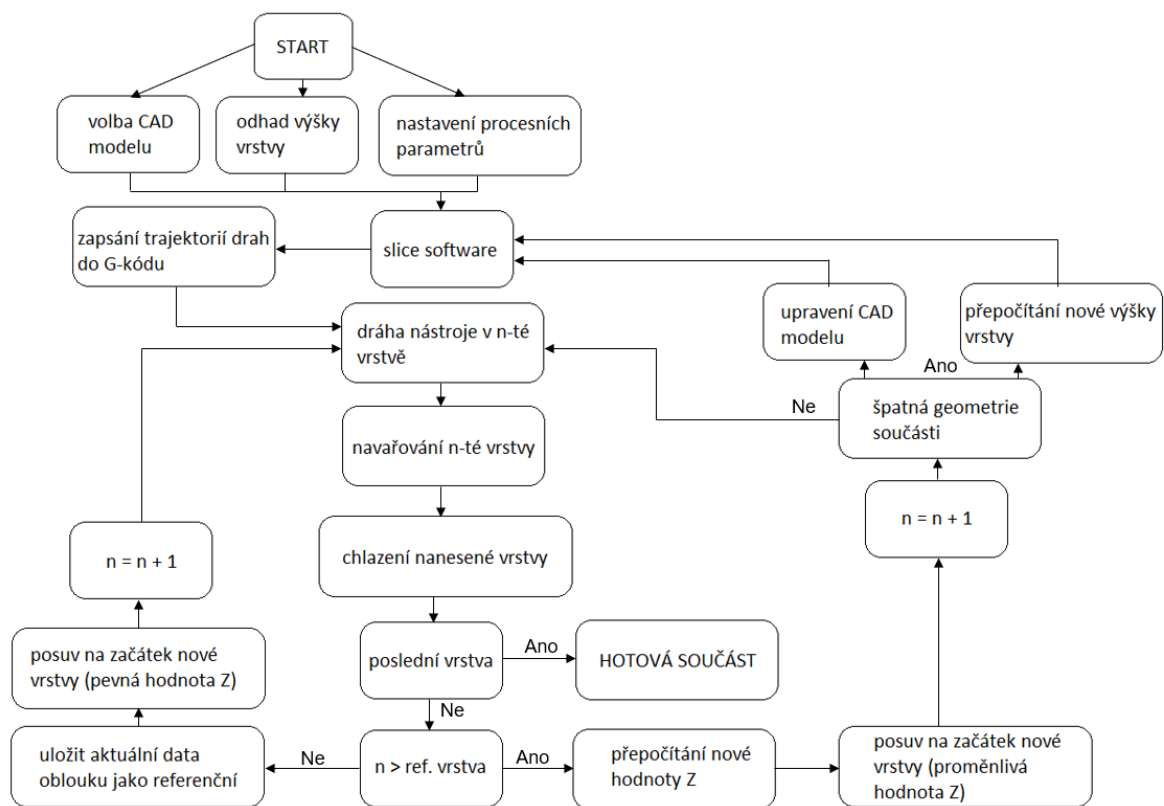
Při navařování metodou GMA (Gas metal arc) se hořák zvedá o výšku kroku po dokončené vrstvě. Vzhledem k nedokonalé geometrii navařované housenky se výška skutečně nanesené vrstvy liší od stanovené výšky kroku. Jestliže dochází k navařování více vrstev, výšková chyba se nasčítá a vzdálenost mezi hořákem a dílem může překročit přijatelné meze. Následkem toho vznikne rozdíl geometrií mezi CAD modelem a navařenou součástí. Vlivem výškových rozdílů může dojít k dvěma mezním stavům při navařování, které vedou k nedokončení součásti. K prvnímu případu dochází, pokud je skutečná výška vrstvy nižší než výška kroku. Důsledkem je příliš vzdálený hořák od navařované součásti, přičemž není zaručená dostatečná a vhodná plynová ochrana svarové lázně a dochází k většímu rozstříku. U druhého případu je skutečná výška vyšší než výška kroku, což může způsobit přilnutí rozstříku k trysce či dokonce kolizi hořáku s povrchem součásti. [13] [14]

Pro zvýšení přesnosti dílu a snížení množství obráběného materiálu je třeba se zaměřit na geometrii jedné vrstvy. Jeden z přístupů hodnotící geometrii vrstvy spočívá v měření její šířky a výšky pomocí pasivního strojového snímacího systému a digitálního zpracování obrazu. Shromážděná data umožňují provést 3D rekonstrukci svarových housenek v daném okamžiku a pro zajištění správného procesu navařování je nutné tato data vyhodnocovat a upravovat v reálném čase. [13] [14]

Další způsob, kterým lze řídit výšku vrstvy, upravuje rychlost nanášení na základě offline měření laserovým čárovým skenerem po nanesení každé vrstvy k dosažení požadované konečné výšky součásti. V neposlední řadě lze výšku vrstvy řídit pomocí monitorování proudu v oblouku. [13]

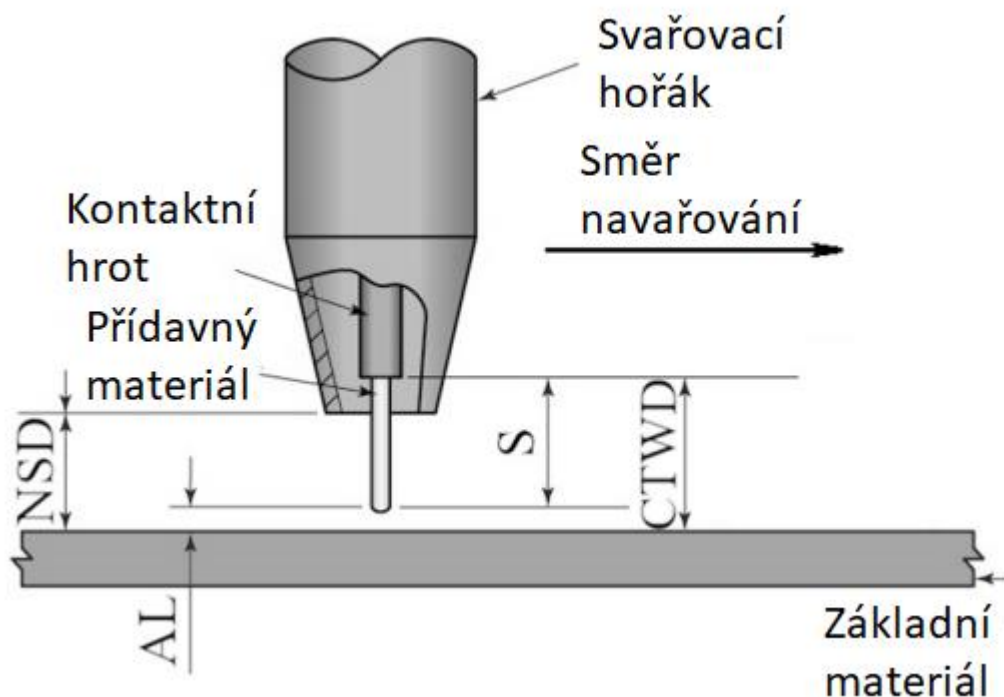
3.1. Monitorování výšky pomocí měření proudu při navařování

Pro monitorování výšky vrstvy pomocí měření proudu při navařování je nutné mít ucelený systém se zpětnými vazbami. Princip činnosti systému je znázorněn na Obr. 11. Na počátku je vždy volba CAD modelu. Uživatel následně definuje výšku vrstvy, rychlost pojezdu hořáku, rychlost podávání drátu a také teplotu interpass. Po nastavení procesních parametrů slicer vygeneruje depoziční dráhy pro každou vrstvu a všechny tyto dráhy jsou zapsány do G kódu. Následně řídicí počítač odešle dráhu pro uložení první vrstvy do ovladače, dojde k zapálení el. oblouku a navaření první vrstvy na základní materiál. Během depozice je proud v oblouku monitorován. Jeho průměrná hodnota pak slouží jako vstupní parametr pro ovládání výšky. Po nanesení každé vrstvy nejprve proběhne ochlazování, přičemž je vrstva neustále snímána teplotním čidlem. Jakmile vrstva dosáhne nastavené teploty interpass, dojde k vyhodnocení výšky vrstvy podle měřených dat v řídicím počítači. Poté jsou data odeslána do ovladače pohybu, nastane posunutí v ose Z o danou výšku vrstvy a opět je spuštěno navařování. Celý krok se opakuje, dokud není součást dokončena. [13]



Obr. 11 - Schéma ovládacího systému. Upraveno dle [13]

Vyhodnocení výšky vrstvy probíhá z naměřeného elektrického proudu při navařování. Každá vrstva je během navařování zaznamenávána, ukládána a zpracována. Celý princip měření vychází ze změny délky vyčnívajícího konce svařovacího drátu během navařování. Délka vysunutého přídavného materiálu (svařovacího drátu) je na Obr. 12 označena písmenem S (Wire stickout length). Elektrický proud prochází kabelem a přes kontaktní hrot protéká svařovacím drátem. Při průchodu součástmi má vysunutý drát vyšší elektrický odpor v porovnání s el. odporem při průchodu kabelem či základním materiálem. Délka elektrického oblouku je označena písmeny AL (Arc length) a je při příslušné podávací rychlosti udržována na konstantní hodnotě vnitřním regulátorem svařovacího zdroje. Zkratkou CTWD (contact tip to work distance) je značena vzdálenost kontaktního hrotu od základního materiálu. Elektrický odpor při konstantní délce oblouku během navařování na vzdálenost CTWD je pak složen z el. odporu v oblouku a proměnného el. odporu ve vyčnívajícím drátu. Z důvodu nekonstantních výšek předchozích vrstev se při navařování délka vysunutí drátu mění. [13]



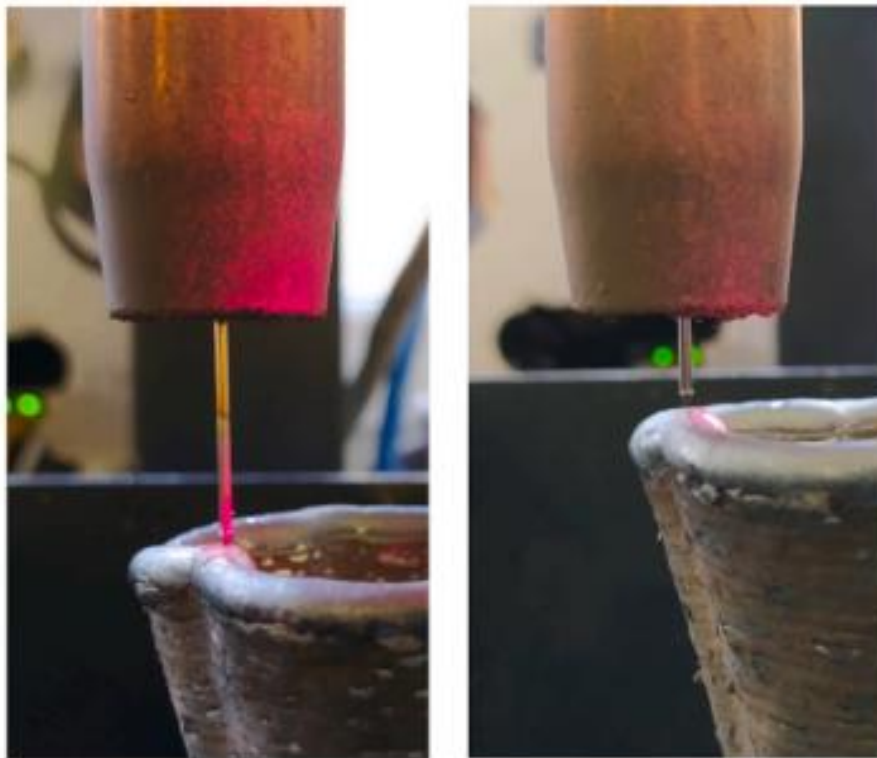
Obr. 12 - Schéma vysunutí drátu při navařování. Upraveno dle [13]

Pro výpočet existuje lineární vztah mezi kontaktním hrotem a elektrickým odporem na vzdálenosti CTWD. S rostoucí vzdáleností CTWD roste i elektrický odpor vyčnívajícího drátu, protože řídicí jednotka zdroje GMA udržuje konstantní délku oblouku. Pokud dojde k růstu elektrického odporu v drátu, roste zároveň i teplota v drátu a sníží se tím hustota procházejícího elektrického proudu potřebné k roztavení špičky drátu. [13]

Když porovnáme data elektrického oblouku při navařování, získáme výsledky, že elektrický oblouk je při navařování prvních vrstev méně stabilní v porovnání s vyššími vrstvami. Tato nestabilita je dána především tepelnými podmínkami v několika prvních vrstvách. Proto je důležité nejprve navařit několik vrstev z důvodu zajištění stabilních údajů o sledovaném proudu. Pokud se dosáhne stabilního elektrického oblouku, použijí se data z dané vrstvy jako referenční. Řídící jednotka následně monitoruje obloukový proud a stanovenou referenční hodnotu využívá pro každou z následujících vrstev (Obr. 11). [13]

Pokud se podíváme na

Obr. 13, rozdíl je patrný na první pohled. V levé části je součást zhotovena s konstantním přírůstkem v ose z bez výškové regulace. Konečná vzdálenost hořáku a výsuv drátu je po dokončení navařování větší a součást nedosahuje potřebných rozměrů. Pokud takto navařenou součást porovnáme se způsobem navařování s řízením výšky vrstvy pomocí měření el. proudu (v pravé části) je jasné, že navařená součást s řízením výšky vrstvy je rozměrově i geometricky přesnější.



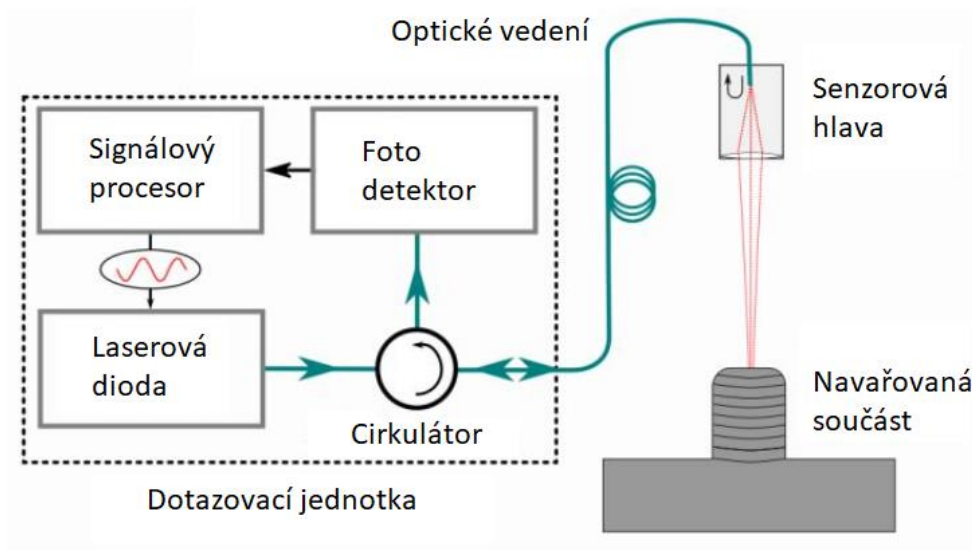
Obr. 13 - Porovnání vzdáleností po navaření poslední vrstvy [13]

3.2. Monitorování výšky pomocí laserového snímače

Pro měření výšky vrstvy lze využít také laserové snímače. Vzhledem k vysokému světelnému záření oblouku je takřka nemožné dosáhnout přesných výsledků pomocí cenově dostupných senzorů jako jsou triangulační či konfokální senzory. Tyto typy senzorů mají další nevýhodu, kvůli které je jejich používání značně ztíženo. Konfokální a triangulační senzory potřebují poměrně velké sensorové hlavy, a proto je jejich nasazení v blízkosti svarové lázně obtížné. [15]

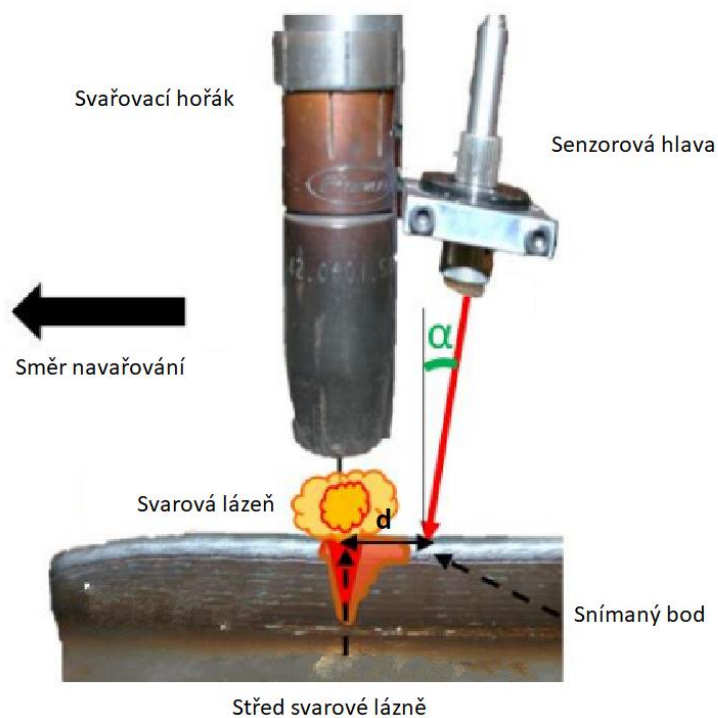
Velmi vhodné je využití koherentní interferometrie s rozlišením vzdálenosti (CO-RRI), díky které je možné měřit výšky vrstvy v průběhu navařování a to s vysokým rozlišením pod 100 μm v pracovní oblasti. Zásadní výhodou má samotná koherentní technologie, která nemá žádnou inherentní citlivost na záření z el. oblouku, což umožňuje měření blízko svarové lázně. Ve srovnání např. s optickou koherenční tomografií (OCT) má CO-RRI nižší rozlišení než OCT. Díky jednoduchému nastavení CO-RRI a nižším pořizovacím cenám má CO-RRI veliký potenciál trvalého využití pro kontrolu výšky vrstvy při navařování. Na rozdíl od OCT má také CO-RRI větší pracovní rozsah, což umožňuje bezproblémové skenování v celém profilu stěny. [15] [16]

Dotazovací jednotka je znázorněna na Obr. 14. Zdrojem paprsků je pro CO-RRI diodový laser generující sinusoidálně modulované záření. Světlo z laseru je vedeno pomocí optických vláken přes cirkulátor k sensorové hlavě, kde se nachází nastavitelná čočka. Čočkou prochází slabě zaostřený paprsek dopadající na měřené místo. Odražený paprsek je následně veden zpět optickými vlákny do fotodetektoru. Výsledné interferenční signály jsou demodulovány v hardwaru pro zpracování signálu. U technologie CO-RRI je měření provedeno tak, že se síla zpětného signálu vyhodnocuje jako vzdálenost v závislosti na dosahu. [15]



Obr. 14 - Princip nastavení měření. Upraveno dle [15]

Obecně systémy sloužící k měření navařené vrstvy jsou umístěny za hořákem. Uspořádání zařízení pro měření výšky pomocí laserového paprsku při navařování metodou MIG je znázorněno na Obr. 15. Senzorová hlava je namontována na svařovacím hořáku. Směr navařování je označen šipkou. Vzdálenost d měřeného bodu od středu svarové lázně musí být dána tak, aby bylo zajištěno měření výšky vrstvy mimo svarovou lázeň. Kvůli geometrii navařené vrstvy je nutné mít sensorovou hlavu natočenou o úhel $\alpha = \text{cca } 8^\circ$. [15] [16]

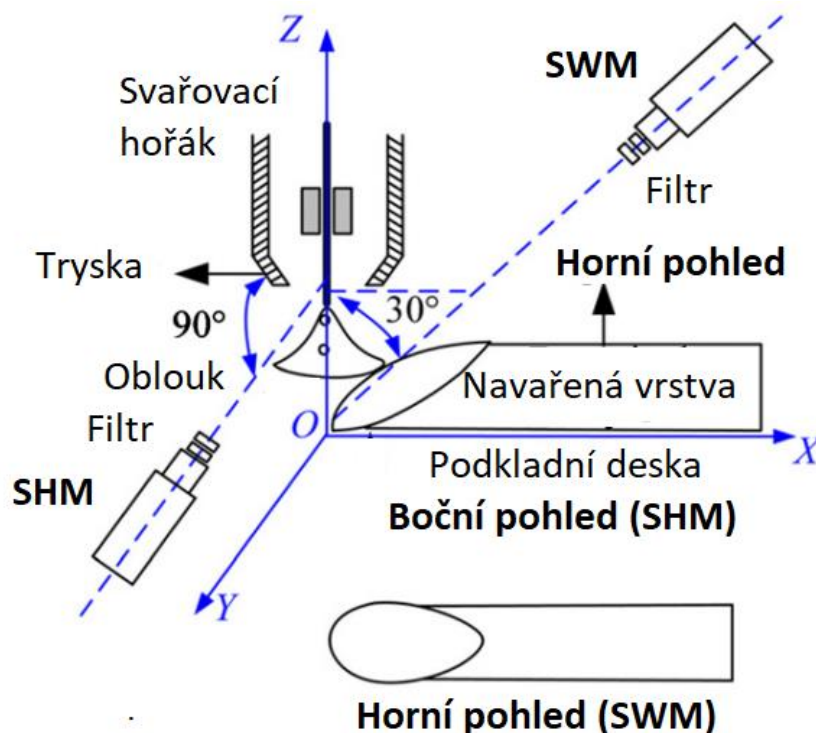


Obr. 15 - Uspořádání zařízení při měření. Upraveno dle [15]

3.3. Monitorování výšky pomocí svařovací kamery

Pro řízení procesu je nezbytně nutné analyzovat geometrii navařené vrstvy a její správné vyhodnocení vede ke správnému navaření součásti. Kamerové snímací senzory jsou využívány v technologii WAAM především kvůli bezkontaktnímu snímání svařovacího procesu a velkému množství snímaných dat. V praxi se využívají dva typy senzorů – aktivní a pasivní senzory. [14]

Aktivní kamerové senzory jsou široce uplatňovány například při 3D rekonstrukci svarové lázně. Vzhledem k velkému zpoždění dat a potřebě zajistit přesnou kalibraci se místo aktivních kamerových senzorů u technologie WAAM používají pasivní senzory. Pasivní kamerové senzory mohou snímat samotný svar, přinášejí informace o tvaru kapičky roztaveného přídavného materiálu či polohy svarové lázně. Z takových informací je možné určit výšku navařené vrstvy a ovlivnit tím geometrii a kvalitu navařované součásti. [14]



Obr. 16 - Návrh snímání výšky a šířky navařené vrstvy pomocí dvou kamer. Upraveno dle [14]

Na Obr. 16 je znázorněno experimentální nastavení pro snímání výšky a šířky navařené vrstvy. Svařovací hořák se pohybuje ve vertikálním směru tj. v ose Z. Mezi přídavným materiálem ve formě drátu a základním materiálem vzniká oblouk. Směr navařování předpokládáme proti směru osy X. Senzor označen SHM (sensor for height measurement)

neboli senzor pro měření výšky vrstvy snímá navařenou vrstvu z boku, aby bylo možné sledovat jak výšku navařené vrstvy, tak vzdálenost trysky k hornímu povrchu navařené vrstvy. To je důležité proto, aby nedošlo k odchýlení od správné polohy hořáku vůči návaru vlivem součtu výškových chyb každé navařené vrstvy. Pro lepší rozlišení svarové housenky od pozadí je vhodné použít úzkopásmový filtr. Při svařování dochází k ukládání roztavených kapiček PM při vysoké teplotě, s čímž je spojeno i vyzařování infračerveného záření. Pokud je požadováno měření šířky navařené vrstvy, kamerový senzor snímá navařenou vrstvu shora. Takový senzor je na Obr. 16 označen písmeny SWM (sensor for width measurement) – senzor pro měření šířky vrstvy. Při navařování je zaznamenáván digitální obraz, který je následně vyhodnocován v příslušném softwaru pro měření výšky vrstvy (např. Xiris WeldStudio). [14]

Pro využití maximálního potenciálu metody WAAM je nezbytně nutné kontrolovat výšku vrstvy během procesu navařování pro zajištění kvality a bezpečnosti procesu. Pokud se objeví závada, kterou nebude možno opravit, je možné díky okamžité kontrole součást vyhodit a tím šetřit materiálové i finanční náklady. Kromě toho monitorování procesu nabízí možnost úprav parametrů, jako jsou např. rychlost posuvu drátu, rychlost posuvu hořáku či svařovací parametry a tím předejít vzniku závad nebo opravit drobnou závadu v předchozí vrstvě. K monitorování procesu je možné využít laserové bodové snímače, kamerové systémy, vyhodnocovat svařovací parametry, či jiné monitorovací metody. Každá metoda má jinou technologickou podstatu a je nutné mít potřebné vybavení včetně softwarů. Pokud je však provedeno správné nastavení celého systému, je možné kvalitně a levněji vyrábět součásti, které by jinou technologií byly takřka nevyrobitelné.

4. Praktická část – EXPERIMENT

4.1. Návrh experimentu

Návrh experimentu má pro celý další postup praktické části asi největší význam. Pokud by byl experiment špatně navržen, může dojít k situaci, kdy budou data nevyhodnotitelná, nebo je nebude prakticky možné naměřit a porovnat. Návrh experimentu umožňující ověření výšky navařené vrstvy sestává z několika bodů. Bylo nutné určit metodiku navařování vzorků s uchycením základního materiálu na desku, následně muselo být navrženo umístění měřících a sensorických systému na svařovací hořák. Nakonec byl navržený experiment ověřen offline simulací.

Pro tento experiment jsme se rozhodli výšky navařených vrstev ověřit třemi měřícími metodami a to i z důvodu možnosti porovnání sensorických systémů mezi sebou.

Měření výšky vrstvy bude provedeno:

- a) Laserovým senzorem Sick DT20 Hi
- b) Svařovací kamerou Xiris XVC-700/710
- c) Posuvným měřítkem

Před zahájením experimentu musela být zvolena i metoda navařování. Vhodnou metodou z pohledu technologie WAAM je určitě technika CMT. Abychom mohli ale výšky vrstev porovnat i s jinými způsoby navařování, bylo rozhodnuto v rámci experimentu navařit další dva vzorky modifikacemi techniky CMT – CMT cycle step a CMT pulse.

Vzorky budou navařeny modifikacemi:

- a) CMT
- b) CMT cycle step
- c) CMT pulse

Tím je dán počet vzorků i počet snímačů. Budou navařeny celkem tři vzorky, každý jinou metodou svařování a každá vrstva příslušného vzorku bude měřena pomocí tří měřících systémů.

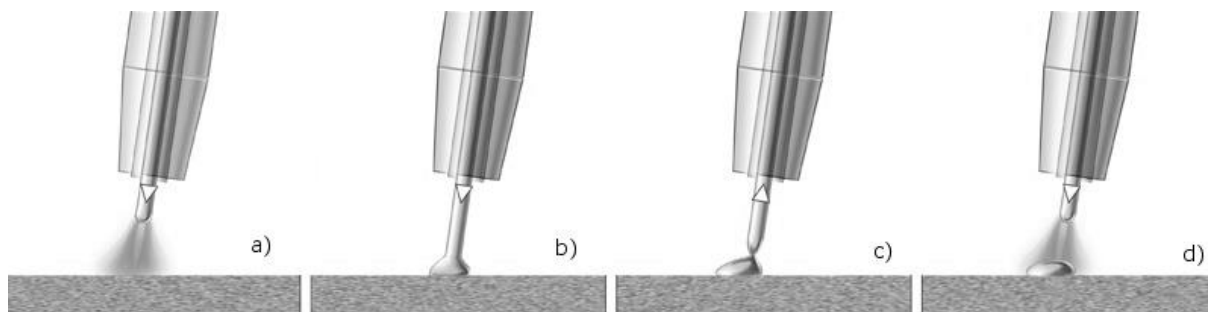
4.1.1. Specifikace použitých modifikovaných svařovacích procesů

CMT (Cold metal transfer)

CMT je modifikovaný svařovací proces MIG vynalezený společností Fronius. CMT se vyznačuje nízkým tepelným příkonem a také sníženým rozstříkem. Jednou z mnoha vlastností je i možnost spojování tenkých plechů z Al a to až od 0,3 mm tím, že eliminuje výskyt minimálních deformací. Svařování modifikací CMT také vykazuje dobré výsledky při svařování plechů z hořčíku, titanu a dokonce i kompozitů. [17] [18]

Princip CMT vychází z metodiky GMAW. Regulace tepelného příkonu u CMT je úzce spjata s pohybem drátu a oddělování kapky. Pokaždé, když dojde ke zkratu, je napájení přerušeno, čímž je docíleno zcela bezrozstříkového procesu s nízkým příkonem tepla. Zpětný pohyb drátu reguluje především hořák se střední frekvencí do 70 Hz. [17] [18]

Na Obr. 17 a) je zachycen pohyb roztaveného drátu směrem ke svarové lázni. Následně (Obr. 17 b)) se drát ponoří do lázně čímž elektrický oblouk zhasne. V tomto okamžiku (Obr. 17 c)) se mění posuv drátu na zpětný chod, což napomáhá oddělení kapky od drátu a zkratový proud je udržován na malých hodnotách. Na Obr. 17 d) je celý proces u konce a cyklus se znovu opakuje. [17] [18]



Obr. 17 - Schéma pohybu drátu modifikace CMT [19]

Dalším unikátem v CMT jsou řídicí jednotky, které během spojování identifikují zkrat čímž spustí zatahování drátu. To vede k odtržení kapky od drátu. Výsledkem je dopředný pohyb drátu s následným zpětným chodem hned po výskytu zkratu. Důsledkem je generované teplo pouze elektrickým obloukem a to jen po krátkou dobu. Regulace proudu následně zajišťuje přenos zcela bez rozstříku. U CMT lze také snadno sledovat délku oblouku a snadno jej ovládat mechanickými prostředky. Tím je docílena vysoká stabilita oblouku bez ohledu na

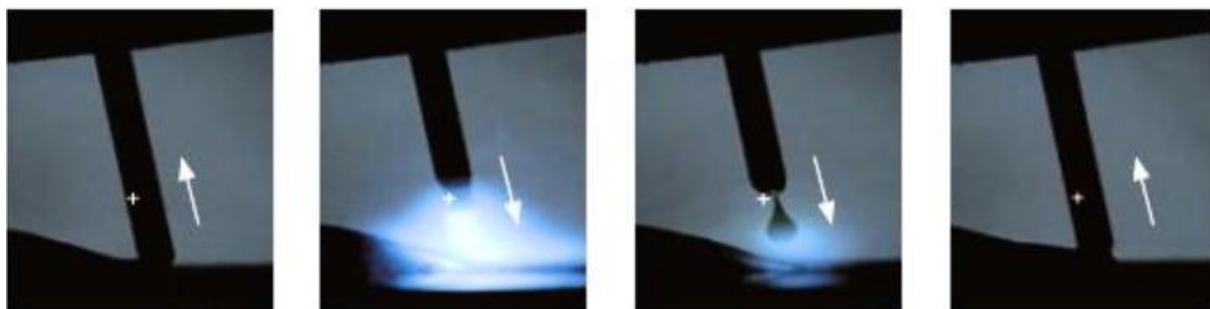
spojovaný povrch. Z toho důvodu je použití CMT vhodné také pro svařování ve všech polohách a pro jakoukoli aplikaci. [18]

Dalšími výhodami kromě vnesení malého tepelného příkonu a nízkého rozstříku je i vysoká účinnost procesu. Konečná účinnost však závisí do jisté míry i na dovednostech operátora a svářeče, což platí i u ostatních technik spojování. Vzhledem k tomu, že se jedná o zcela elektronický proces je chybovost značně snížena a účinnost CMT velmi vysoká.

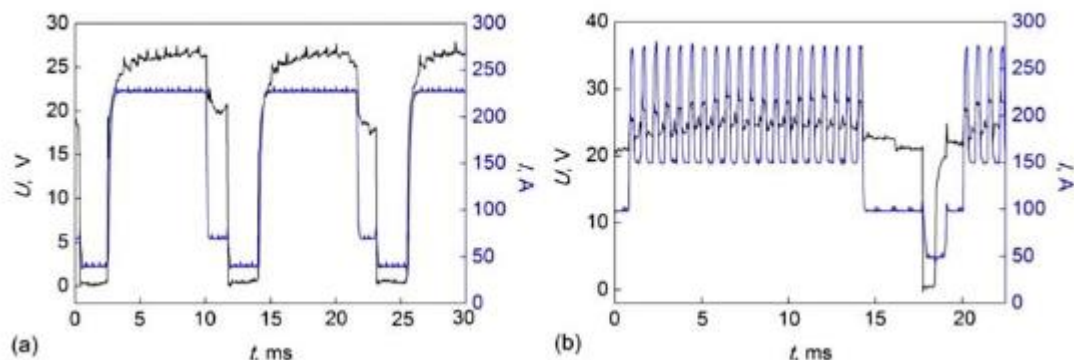
Díky všem přednostem je využití této techniky velmi preferováno například v námořním a automobilovém průmyslu, spojování plechů a potrubí a v neposlední řadě při navařování metodou WAAM. [18]

CMT pulse (CMT + P)

Prakticky jde o zcela novou techniku svařování úpravou procesu CMT. Tato metoda se vyznačuje především spojením cyklu pulzů s cykly CMT. Porovnání průběhu napětí a proudu metody CMT a CMT pulse je znázorněn na Obr. 19. Narozdí od klasického CMT dochází zde ke zvýšení tepelného příkonu, k větší rychlosti spojování a také ke zvýšení výkonu. U CMT + P se v každém cyklu navíc odděluje další kapka, díky čemuž je dosaženo vyšších rychlostí nanášení. V první fázi cyklu dochází ke zkratu a drát je zatahovaný zpět do hořáku. Následně se zapálí oblouk s pulzním proudem a s pohybem drátu směrem ke svaru se současně odděluje kapka. Jakmile dojde ke spojení drátu a podkladního materiálu, oblouk zhasne a opět je udržován zkratový proud. Při vytahování drátu zpět do hořáku je oddělena další kapka (jako u metody CMT). Takto se celý cyklus opakuje. Princip přenosu je na Obr. 18. [18]



Obr. 18 Princip přenosu metodou CMT + P [18]



Obr. 19 Porovnání průběhu napětí a proudu: (a) CMT, (b) CMT pulse. Upraveno dle [20]

CMT cycle step

Další poměrně mladou technikou ve svařování je CMT cycle step. Jde o nedávno navržený svařovací proces vycházející ze CMT s možností nastavit krok cyklu – CMT cycle step. Takový proces umožňuje nastavit počty jednotlivých kapek i dobu prodlevy mezi cykly. Hlavní výhodou procesu je snížení přívodu tepla při svařování. Tepelný příkon je možné i efektivně řídit. Svár pak vykazuje čiré zvlněné housenky s vysokým stupněm reprodukovatelnosti a vysokou tolerancí pro mezery v obrobku. Technika CMT cycle step stále není zcela prozkoumaná a není znám vliv dvou hlavních parametrů (cyklus CMT a doba intervalu) na svařovací proces. [21]

Přicip procesu je v podstatě stejný jako u klasického CMT s tím rozdílem, že je možné řídit jednotlivé cykly. Lze tak definovat přesný počet kapek na svařovací bod, či nastavit časový interval mezi předchozím a následujícím cyklem. Tyto cykly se následně opakují, dokud není svarová housenka dokončena. [21]

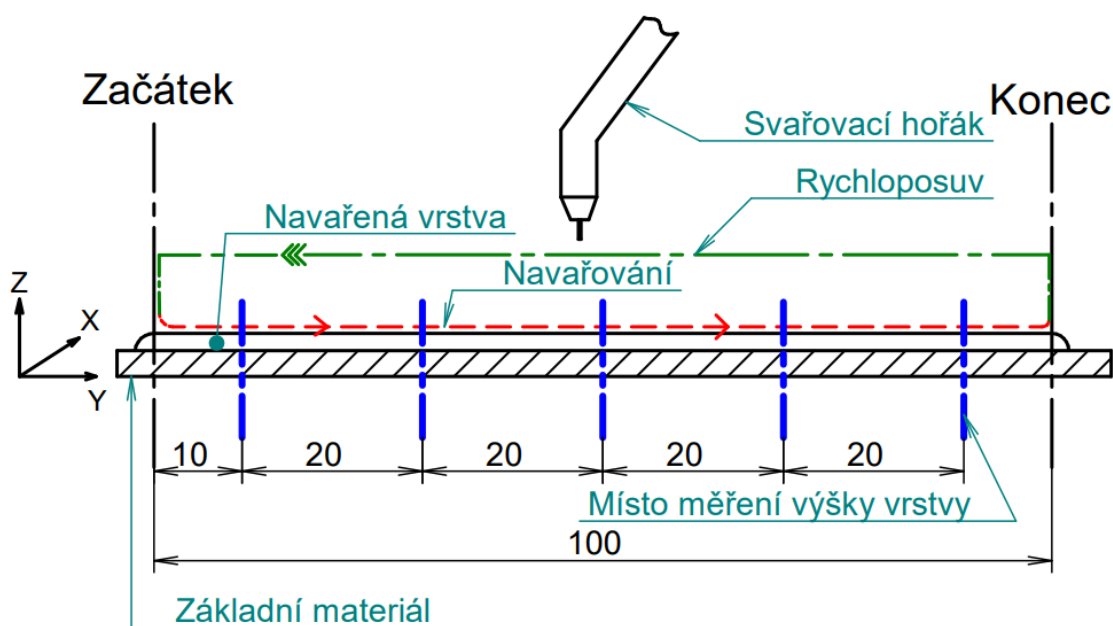
4.1.2. Návrh vzorků a jejich upevnění

Nejprve bylo nutné navrhnout vzorek s ohledem na možnost odečítání výšky navařené vrstvy. Pro odečítání výšek vrstev se nejvíce hodí strategie rovinného návaru a to i vzhledem k budoucímu umístění sensorických systémů na hořáku.

Navržený vzorek je tvořen postupným navařováním dvaceti vrstev. Celý cyklus vrstvení začíná navařováním housenky o délce 100 mm. Po dokončení navařování je svařovací hořák vysunut do bezpečné vzdálenosti od návaru a rychloposuvem se vrací na začátek.

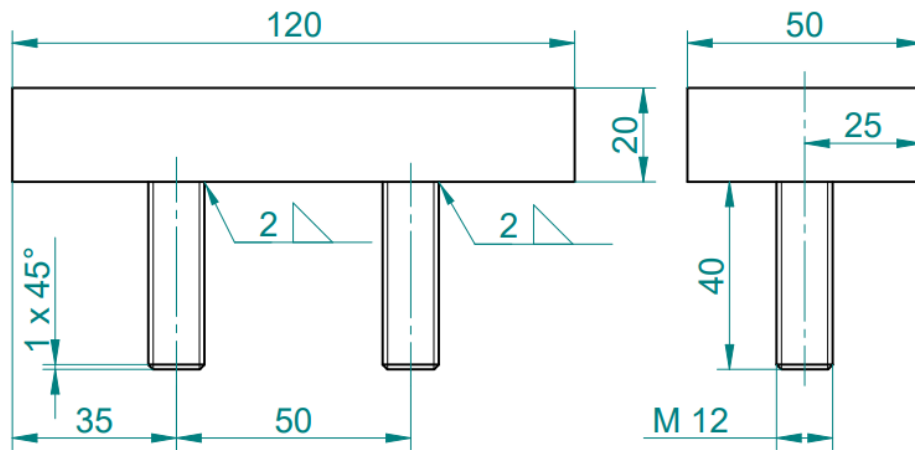
Následně dojde k posunu v ose z o výšku další vrstvy a opět je započato navařování. Takto se celý cyklus opakuje, dokud není navařena poslední vrstva. Cyklus je znázorněn na Obr. 20.

Aby bylo možné výšky navařených vrstev vyhodnotit, bylo stanoveno pět snímaných bodů v průběhu celého návaru. Měřená místa jsou na Obr. 20 znázorněna jako modré, dvojitě čerchované čáry a jsou symetricky rozmístěna po celém návaru. Z důvodu umožnění měření výšky každé navařené vrstvy bylo nutné navařovací cyklus rozšířit. Vždy po navaření každé vrstvy bylo navařování přerušeno a výška vrstvy se v pěti bodech dle schématu změřila. Po ukončení měření došlo k pokračování přerušeno cyklu, tj. návratu rychloposuvem na začátek, posunutí v ose z a navařování další vrstvy.



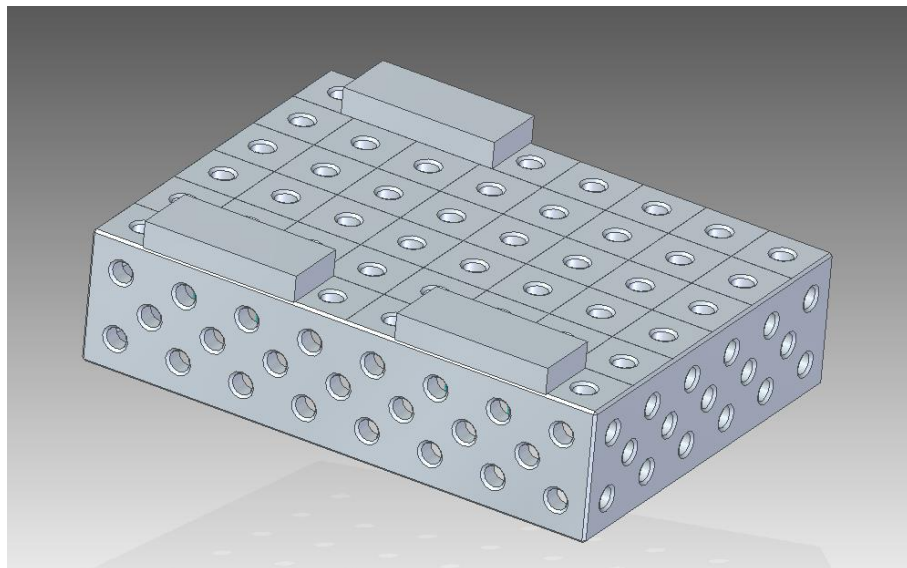
Obr. 20 Návrh rovinného návaru. Upraveno dle [11]

Jako základní materiál byla navržena destička z konstrukční oceli S235 o rozměrech 120 x 50 x 20 mm. Pro jednodušší upevnění k modulárnímu upevňovacímu přípravku jsou v místě otvorů svařovacího stolu přivařeny závitové tyče M12 o délce 40 mm a pomocí matic M12 je celý vzorek upevněn.



Obr. 21 Návrh rozměrů vzorku včetně upínacího systému

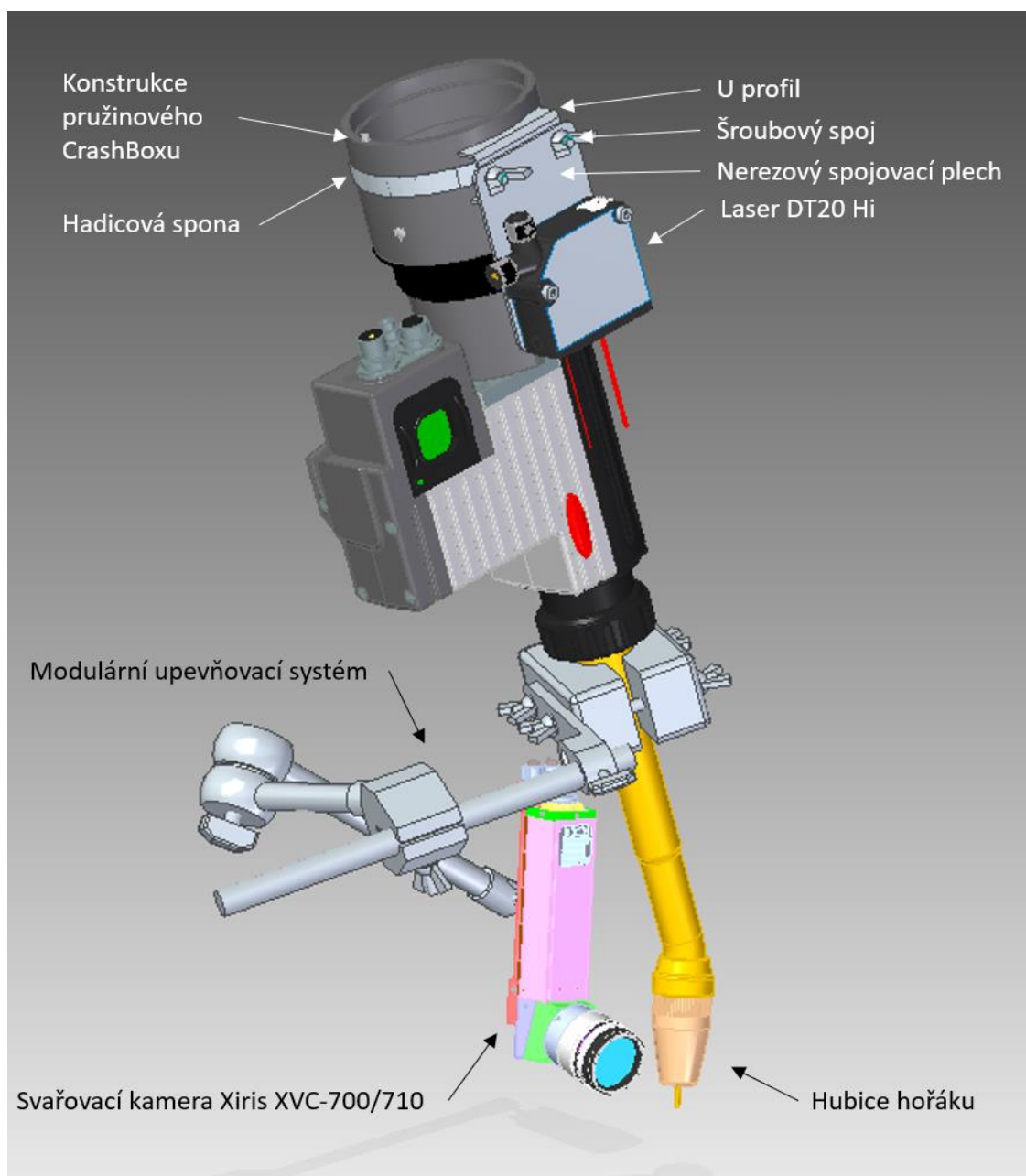
Pro jednodušší manipulaci po jednoosém polohovadle, které je součástí navařovacího robota, kde bude experiment prováděn, můžeme využít modulární upevňovací přípravek. Takový stůl umožňuje libovolné umístění vzorku po jednoosém polohovadle a zároveň je možné na něj umístit hned několik vzorků v případě navařování různými metodami či opakování měření. Upevnění vzorků je vyobrazeno na Obr. 22.



Obr. 22 Upevnění vzorků k modulárnímu upevňovacímu přípravku

4.1.3. Návrh umístění měřících systémů

Pro zkoumání výšky navařené vrstvy bylo navrženo využití tří měřících systémů. Každý měřící systém vyžaduje jinou polohu pro měření z důvodu rozdílného způsobu odečítání měřených veličin. Posuvné měřítko je z hlediska umístění měřidla nejjednodušší záležitostí. Jde totiž o ruční metodu měření, a tak pokaždé, když dojde k přerušení navařování, se uskuteční ruční měření v již určených místech.



Obr. 23 Navržení umístění senzorických systémů na svařovací hořák

Trochu složitější umístění vyžaduje laserový systém Sick DT20 Hi. Tento senzor pracuje na bázi odraženého paprsku, což je již popsáno a vysvětleno v teoretické části. Jediná možnost, kam systém umístit, je na konstrukci pružinového CrashBoxu. Pro připevnění musel být navržen přípravek, aby bylo možné zajistit nehybnou polohu rovinné plochy laseru na kruhovitou objímku hořáku. Připevnění je nakonec velice jednoduché. Na objímce hořáku je upevněný U profil pomocí hadicové spony. Daný U profil má vyfrézovaný přesný poloměr objímky, aby hladce dosedl po celé ploše. Do U profilu jsou vyvrtány dvě díry o průměru 6 mm. Poté je přidán nerezový spojovací plech, který je patřičně upravený a upevněný pomocí 2 šroubů velikosti M5 a křídlovou maticí k U profilu. Upravený nerezový plech má ještě vyvrtané dva otvory příslušné otvorům v laseru DT20 Hi. Připevnění laseru je opět realizováno šroubovým spojem. Takové upevnění umožňuje správně měřit vzdálenost laseru od poslední navařené vrstvy.

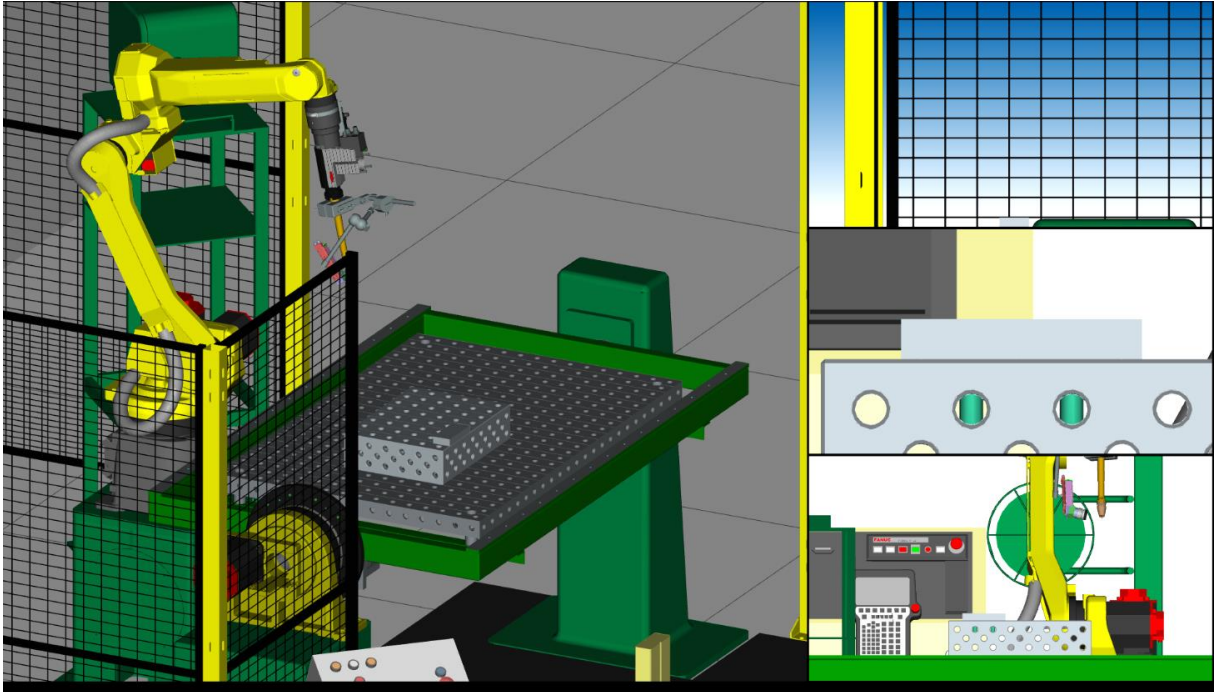
Svařovací kamera Xiris XVC-700/710 musí být dle teorie umístěna kolmo na bok navařované stěny. Toho je docíleno přesným nastavením modulárního upevňovacího systému. Obraz pak musí zachycovat jak podkladovou vrstvu (základní materiál či předchozí housenku) tak i nově navařovanou vrstvu a samozřejmě střed obrazu by měl cílit na svarovou lázeň. Oba navržené upínací systémy jsou vymodelované v programu SolidEdge a jsou na Obr. 23.

4.1.4. Offline simulace experimentu

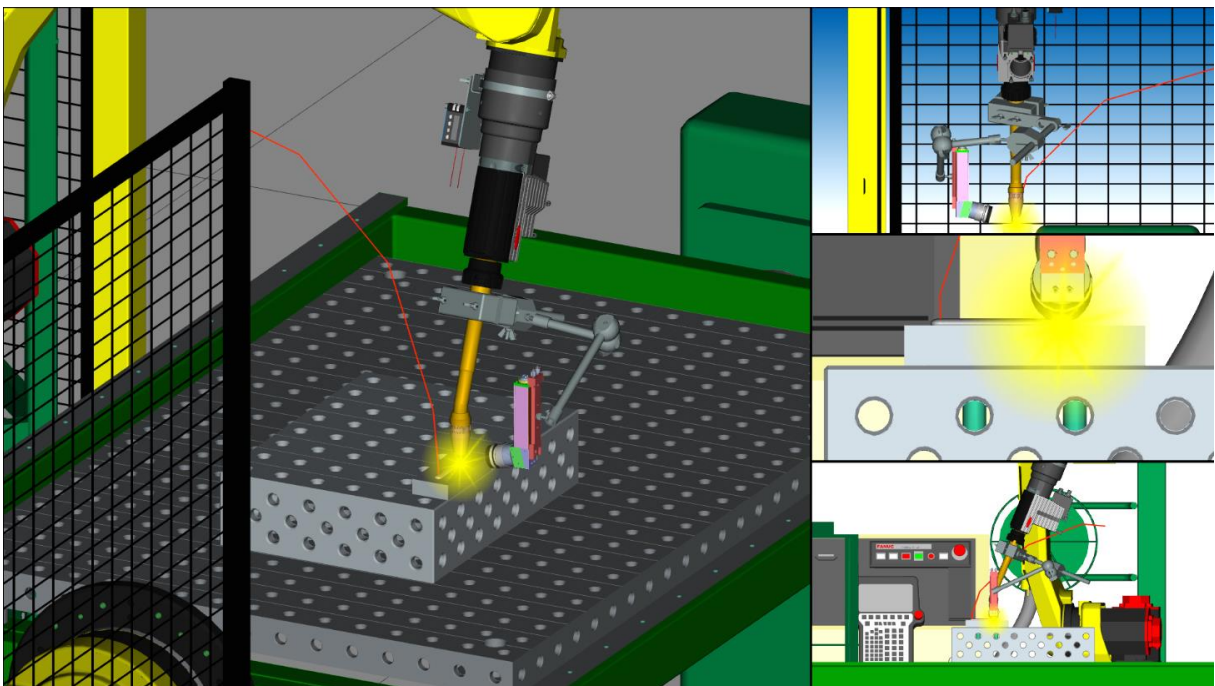
Navržená strategie navařování a měření (z kapitoly 4.1.2) byla ještě před samotným navařováním ověřena off-line simulací. Simulace je velice důležitou součástí procesu. Pomocí simulace je možné odhalit nedostatky strategie navařování či různé kolize při měření a navařování. Pro simulaci byly využity přesné modely robotického pracoviště, modulárního upevňovacího přípravku s připevněnými vzorky a senzorické systémy s jejich držáky. Průběh simulace je vyobrazen na obrázcích níže.

Na Obr. 24 je znázornění umístění vzorku na jednoosé polohovadlo. Robot je ve výchozí pozici tzn. počáteční stav před navařováním. Dle navržené strategie nejprve dojde k navařování jedné vrstvy se současným pořizováním záznamu svařovací kamerou. Zmíněná část je zobrazena na Obr. 25. Po navaření vrstvy dojde k měření laserovým senzorem umístěným na konstrukci pružinového CrashBoxu. Z tohoto důvodu musí dojít k natočení

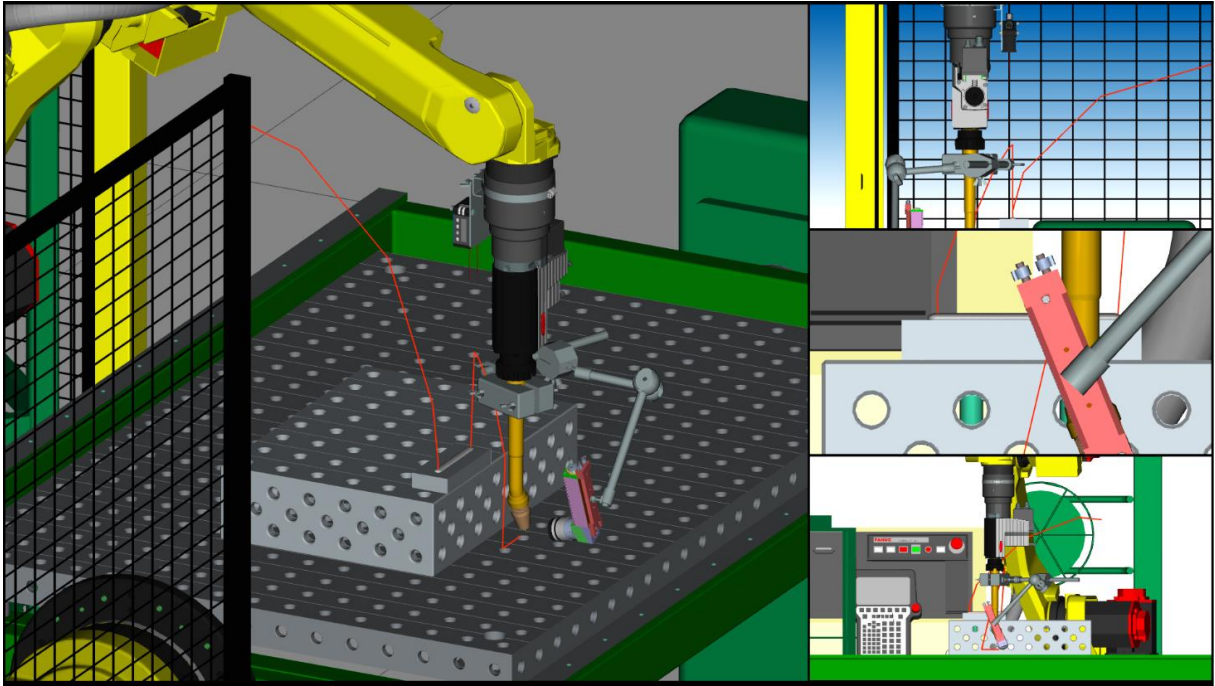
hořáku jako je vidět na Obr. 26. V tomto okamžiku je důležité zkontrolovat pohyb robota, aby nedocházelo ke kolizi. Z bokorysu jasně vidíme, že ke kolizi nedochází, tudíž je navržená strategie ověřená a je možné začít s navařováním.



Obr. 24 Upevnění vzorku na jednoosé polohovadlo



Obr. 25 Průběh navařování přičemž je pořizován záznam svařovací kamerou



Obr. 26 Měření laserovým senzorem

4.2. Realizace experimentu

4.2.1. Pracoviště

Pro realizaci experimentu byly vybrány laboratoře výuky svařečských technologií na Ústavu strojírenské technologie, Fakulty strojní, ČVUT v Praze. Experimentální laboratoř je vybavena nejrůznějšími svařovacími pomůckami včetně robotického pracoviště. Robotické pracoviště obsahuje univerzální 6ti-osý robot FANUC Arc Mate 100iC, řídicí jednotku R-J3iC a jednoosé polohovadlo FANUC P250. Nastavené parametry zajišťuje svařovací zdroj Fronius Trans Puls Synergic 3200 CMT. Pracoviště je vybaveno také podavači a zásobníky drátu, dále jsou zde lahve s ochranným plynem a je zde instalováno odsávání škodlivých plynů, které se tvoří při svařování. U robotického pracoviště musí být zabezpečena bezpečnost obsluhy. K tomu slouží například světelné závory ohraničující pracovní prostor robotické ruky, či koncové spínače na dveřích vymezujících servisní oblast robota.

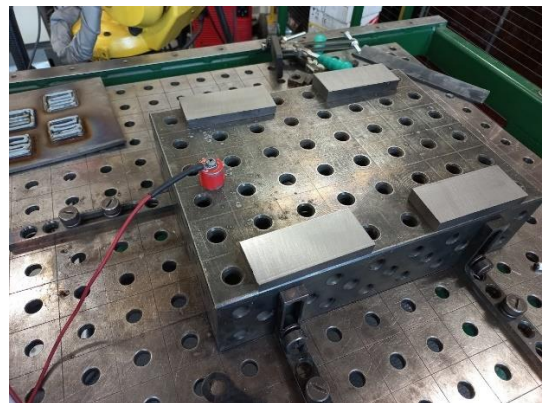
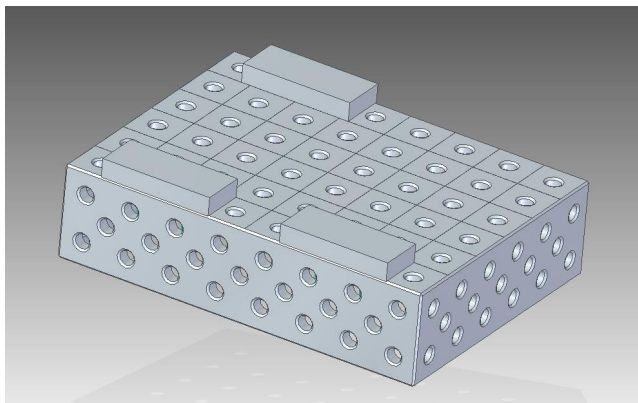
Pro současné experimentální měření bakalářské práce na téma zjišťování teplotního ovlivnění podkladového materiálu byla v prostoru robota umístěna měřicí ústředna ALMEMO 5690-2.



Obr. 27 Experimentální robotické pracoviště ÚST FS ČVUT

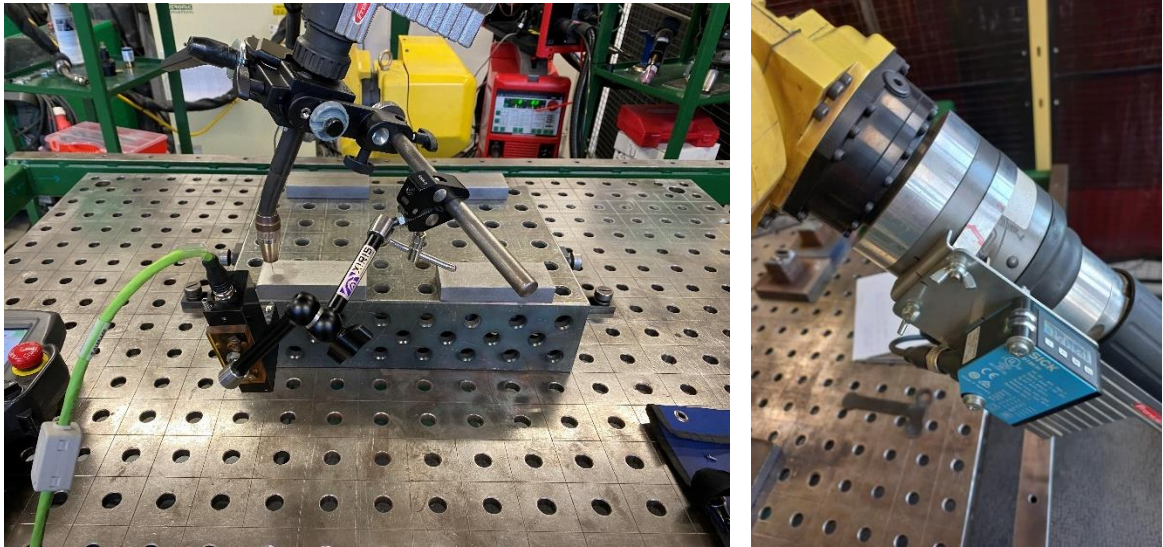
4.2.2. Příprava experimentu

Výroba a upevnění vzorků proběhla dle návrhu v kapitole 4.1.2. Vzorky vyrobené z konstrukční oceli S235 o rozměru 120 x 50 x 20 mm byly přišroubovány pomocí navařených závitových tyčí a matic M12 k modulárnímu upevňovacímu přípravku. Správnou polohu modulárního přípravku zajišťovaly dorazy ve tvaru L, připevněné k jednoosému polohovačlu pomocí nastřelovacích svorníků. Pro zamezení nežádoucího pohybu byl modulární přípravek následně upevněn rovněž nastřelovacími svorníky. Upevnění vzorků je vyobrazeno na Obr. 28.



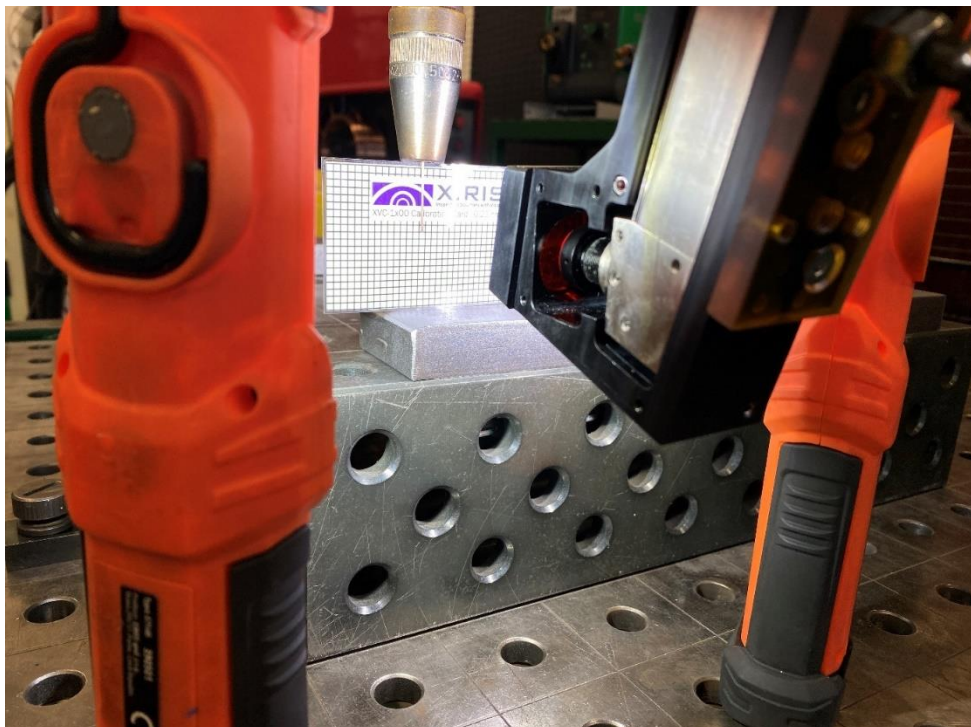
Obr. 28 Návrh a realizace upevnění vzorků na pomocný stůl

Senzorické systémy byly umístěny na svařovací hořák dle popisu v kapitole 4.1.3. Umístění svařovací kamery Xiris XVC-700/710 je vlevo, upevnění laserového snímače DT20 Hi je vpravo na Obr. 29.



Obr. 29 Umístění senzorických systémů na svařovacím hořáku

Před začátkem měření musela být provedena kalibrace svařovací kamery Xiris XVC-700/710. Jde o tzv. virtuální kalibraci, která nastavuje vzdálenost kamery od místa sledování, aby bylo možné měřit reálné hodnoty. Kalibruje se většinou pomocí kalibračního vzorku, který je tvořen rastrovým obrazem. Obrázek z kalibrace je níže.



Obr. 30 Kalibrace svařovací kamery Xiris XVC-700/710

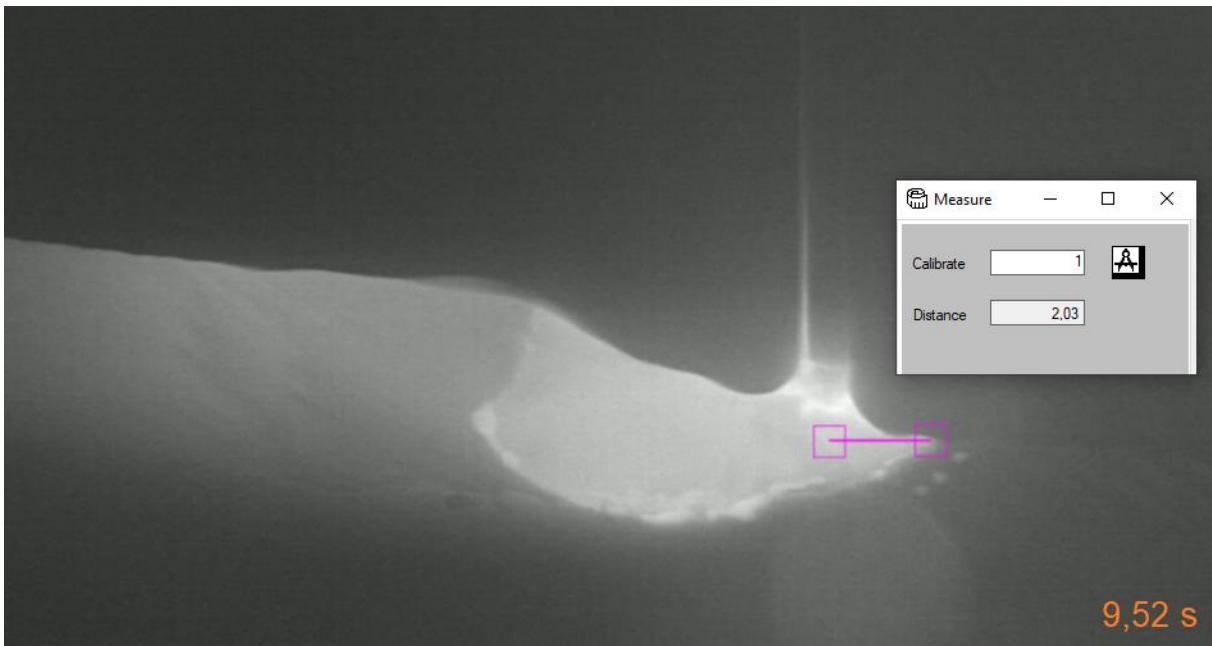
4.2.3. Metodika odečítání výšky vrstvy

Nejprve je důležité zmínit, že svařovací kamera při navařování každé vrstvy pořizuje video záznam, který je uložen do paměti příslušného počítače pod charakteristickým názvem a pořízený záznam se musí vyhodnotit zpětně po provedení navařování. Tím odpadá problém zastavení navařování z důvodu měření.

Zbylé dva systémy takovou možnost nemají a je třeba zajistit možnost měření mezi navařováním každé další vrstvy. Z tohoto důvodu je cyklus navařování popsán v bodě 4.1.2 po navaření každé vrstvy přerušen a dojde nejprve k měření posuvným měřítkem v přesně stanovených místech zanesených na Obr. 20. Posuvné měřítko umožňuje měřit pouze výšku celého návaru, takže veškeré hodnoty jsou vztažené k základnímu materiálu a výšky jednotlivých vrstev je následně nutné přepočítat. Po dokončení měření posuvným měřítkem došlo k měření laserem. Do cyklu navařování byl zanesen program pro měření laserem. Po spuštění programu robotické rameno najelo tak, aby laser zacílil přesně na měřené místo kolmo k základnímu materiálu. Laserový systém opět umožňuje měřit pouze vzdálenost předmětu od senzoru, proto se naměřené hodnoty musely taktéž přepočítat. Před měřením první vrstvy musela být tedy změřena vzdálenost od povrchu základního materiálu, což později udávalo počáteční vzdálenost. Při měření každé další vrstvy laserový senzor zůstával ve stejné výšce, čímž bylo možné odečítat zmenšující se vzdálenosti povrchu návaru od senzoru. Takto byly změřeny dané vzdálenosti ve stejných místech jako u ostatních senzorů a jejich následným přepočítáním bylo umožněno změřit výšky příslušných vrstev.

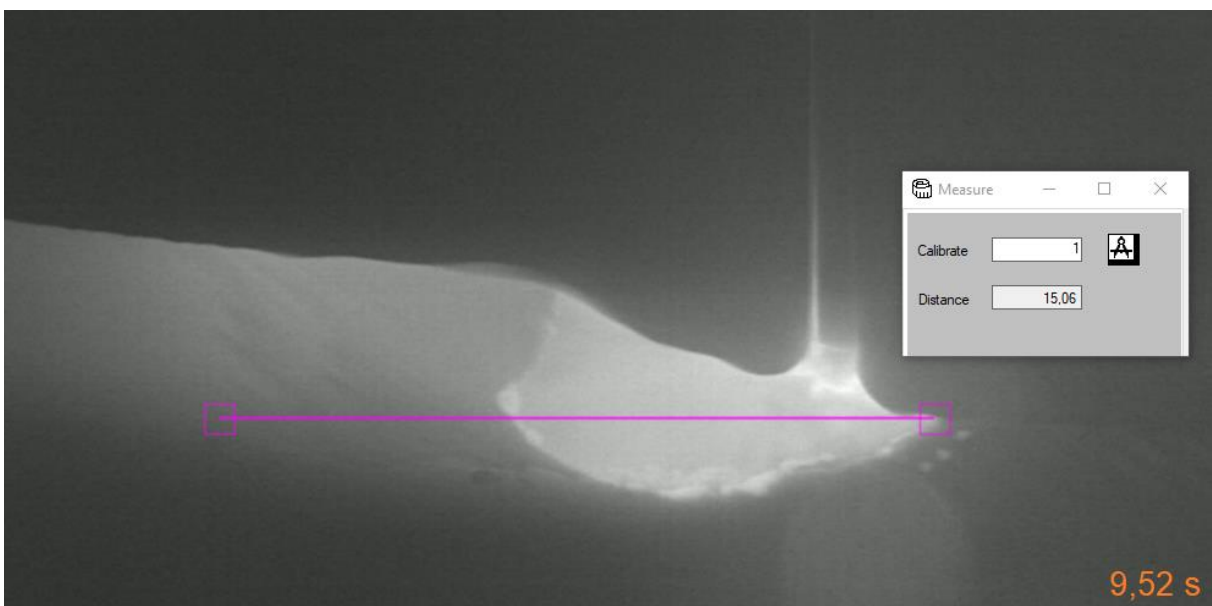
Po dokončení navařování byly video záznamy ze svařovací kamery vyhodnocovány zpětně pomocí programu Xiris Weld Studio. Aby bylo možné vyhodnocovat výšku vrstvy ve stejném místě jako u ostatních senzorů, bylo nutné nejprve přepočítat vzdálenost na čas. Navařený vzorek byl dlouhý 100 mm. Následně se změřil celkový čas zaznamenaného navařování, který trval 34 s. Jednoduchou matematickou operací bylo možné dopočítat dobu navařování 1 mm (což odpovídá 0,34 s) a video záznam v příslušném místě zastavit.

Příklad druhého měření (30 mm od začátku navařování) čtrnácté vrstvy druhého vzorku navařeného technikou CMT cycle step je na sekvenci níže.



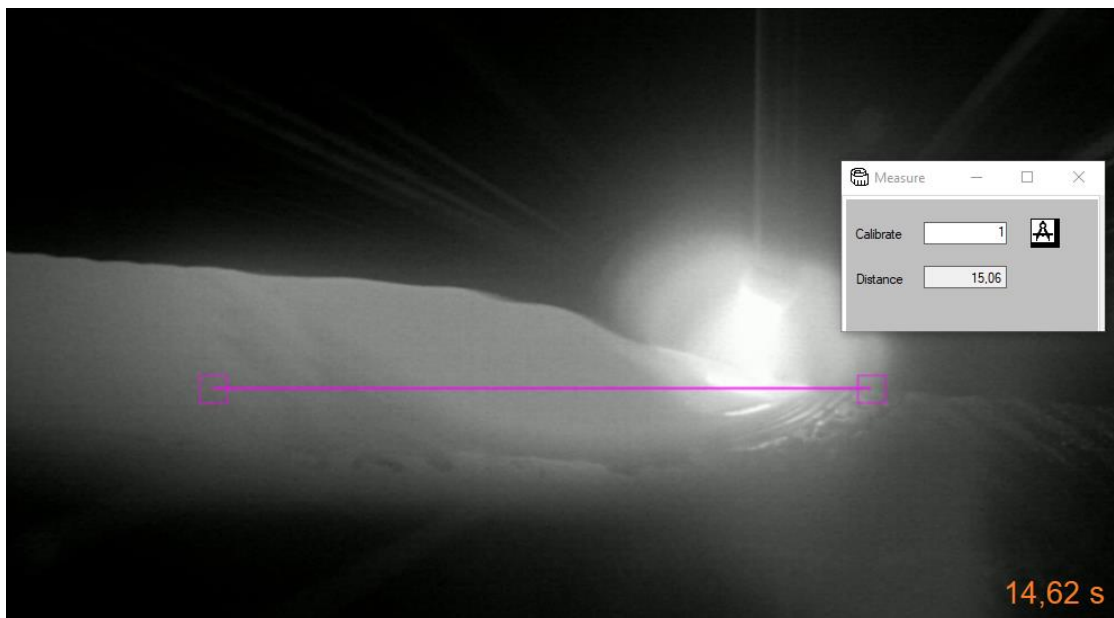
Obr. 31 Zastavení videozáznamu v čase 9,52 s

Druhé měřené místo se nachází ve vzdálenosti 30 mm (10,2 s) od počátku navařování. Aby bylo možné změřit přesnou výšku vrstvy, bylo nutné stopnout video s předstihem. Ovlivněná oblast svarovou lázní je přibližně 2 mm, o které bylo nutné zastavit video dříve. Po přepočítání na vzdálenosti odpovídá 28 mm časovému úseku 9,52 s. Tento moment je zachycen na Obr. 31. Od polohy svařovacího drátu je náš měřený bod vzdálen o 2 mm. Z tohoto místa je vyvedena vodorovná čára dlouhá 15 mm, kdy na jejím pravém konci (před svarovou lázní) se dotýká povrchu předchozí vrstvy (znázorněno na Obr. 32).



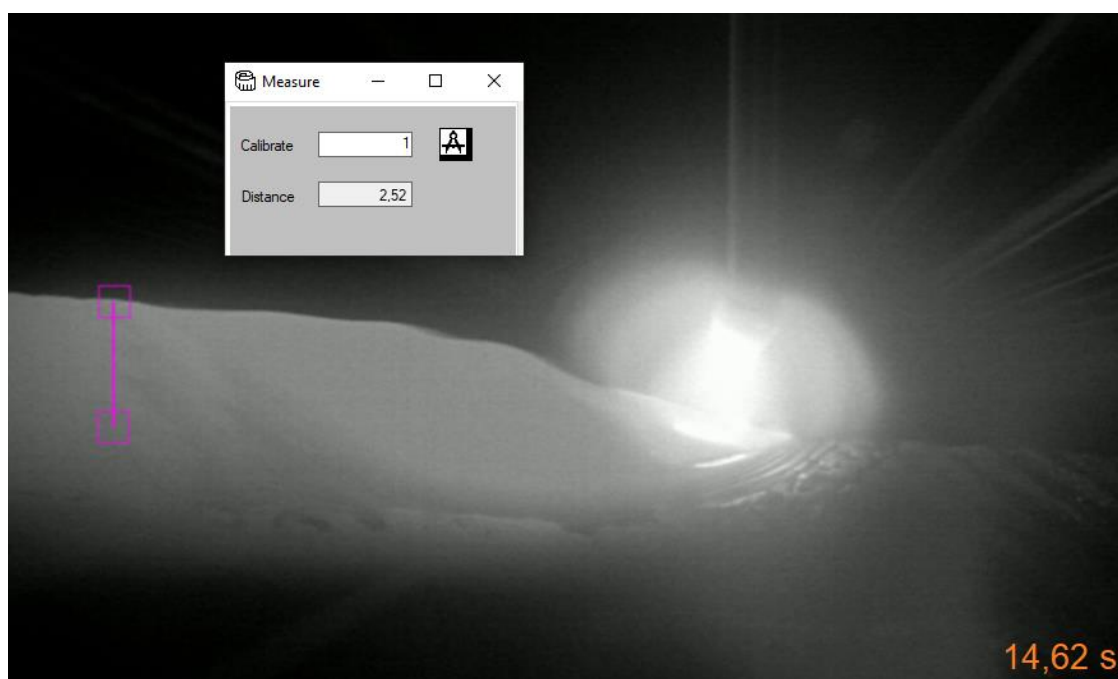
Obr. 32 Vytvoření základny pro měření výšky vrstvy

V této chvíli muselo být video posunuto přesně o nastavenou vzdálenost (15 mm), což je v přepočtu 5,1 s ($15 \times 0,34$ s). Posunuté video o příslušnou vzdálenost je na Obr. 33. V tomto okamžiku se nachází náš měřený bod na levém konci distanční čáry a výška předchozí vrstvy odpovídá poloze koncového bodu.



Obr. 33 Posunutí záznamu o 5,1 s

Následně už šlo pouze o přesunutí pravého konce měřicí čáry ve vertikálním směru od levého bodu na povrch nově navažené vrstvy a na měřícím panelu odečíst vzdálenost a zaznamenat jí do příslušného řádku v tabulce měřených hodnot.



Obr. 34 Měření výšky vrstvy

4.2.4. Průběh navařování a měření

Součásti, vytvářené aditivní metodou WAAM, mají své konečné mechanické vlastnosti závislé na použití přídatného materiálu, ze kterého budou vytvářeny. Z tohoto důvodu je nutné nejprve určit potřebné mechanické vlastnosti konečné součásti, podle kterých je zvolen odpovídající přídatný materiál.

Vzhledem ke zkoumání výšek navařených vrstev, není zapotřebí vytvářet návar z legovaných vysokopevných ocelí. Jako přídatný materiál pro experiment byl proto použit poměděný drát G3Si1, jinak určený pro svařování nelegovaných a nízko legovaných uhlík-manganových konstrukčních ocelí. Svařovací drát G3Si1 je obecně využíván při výrobě ocelových konstrukcí. Dále je vhodný pro vytváření koutových a tupých svarů ve všech svařovacích polohách. [22]

Tab. 1 Chemické složení svarového kovu G3Si1 v hm. % [22]

C	Si	Mn
0,078	0,85	1,46

Dalšími důležitými parametry jsou i mechanické vlastnosti svařovacího drátu. Nejdůležitější hodnoty mechanických vlastností jsou uvedeny v Tab. 2.

Tab. 2 Mechanické vlastnosti přídatného materiálu [22]

R _m [MPa]	R _e [MPa]	A [%]	KV [J]
560	470	26	70 (-30 °C)

Pro ochranu svarové lázně před okolními vzdušnými plyny bylo nutné zvolit také ochranný plyn. Použitím ochranného plynu se zaručí vytvoření kvalitního návaru. Jako ochranný plyn byla k navařování použita směs s obchodním názvem Inomaxx2, která obsahuje 2 % oxidu uhličitého a 98 % argonu. Složení směsi plynů zaručuje vysoký ionizační potenciál a stabilní oblouk při minimálním nauhličení svarového kovu. Inomaxx2 spadá do kategorie plynů M12 dle ČSN EN ISO 14175. Jedná se prakticky o nejpoužívanější směs používanou pro MAG svařování korozivzdorných ocelí. Výhodami Inomaxx2 je tvorba hladšího a ploššího svaru, dále minimální tvorba rozstřiku, svary vytváření jasně čistý povrch a vhodnost použití pro všechny tloušťky materiálu a způsoby přenosu. [23]

Před samotným navařováním musely být nastaveny svařovací parametry. Postupně byly navařeny 3 vzorky, přičemž každý vzorek byl navařený jinou technikou svařování. Svařovací parametry nebyly voleny metodicky (nejsou stejné). Z důvodu možnosti provedení měření byly nalezeny takové parametry, které vykazovaly stabilní proces navařování. První vzorek navařený technikou CMT má nastavené svařovací parametry uvedené v Tab. 3. Svařovací parametry vzorku navařeného technikou CMT cycle step a CMT pulse jsou v daném pořadí uvedené v Tab. 4 a v Tab. 5.

Tab. 3 Základní parametry svařování technikou CMT

Proud [A]	Napětí [V]	Posuv drátu [m/min]	Korekce délky oblouku [%]	Režim hořáku
131	10,4	3,8	0 %	S2- takt

Tab. 4 Základní parametry svařování technikou CMT cycle step

Proud [A]	Napětí [V]	Posuv drátu [m/min]	Korekce délky oblouku [%]	Režim hořáku
129	11,7	5,3	0 %	S2- takt

Tab. 5 Základní parametry svařování technikou CMT Pulse

Proud [A]	Napětí [V]	Posuv drátu [m/min]	Korekce délky oblouku [%]	Režim hořáku
106	15,8	9,0	15 %	S2- takt

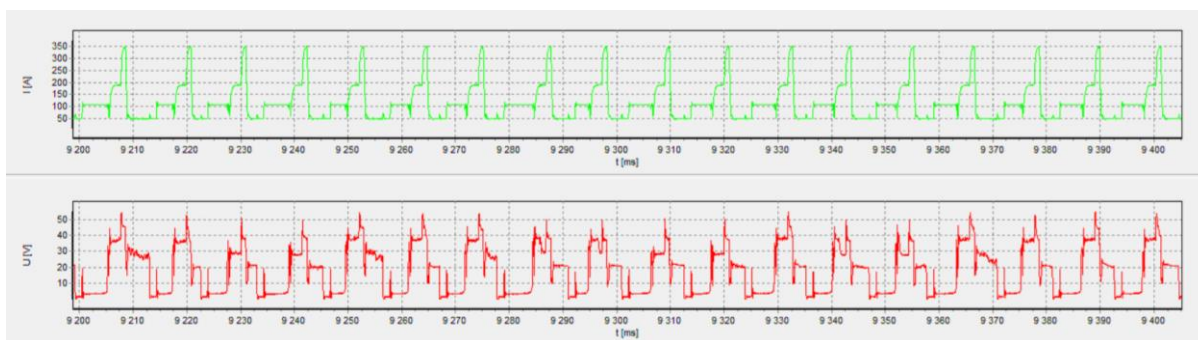
Po nastavení svařovacích parametrů se přistoupilo k samotnému vycentrování dráhy navařování do osy vzorku. To se muselo udělat pokaždé před navařováním nového vzorku.



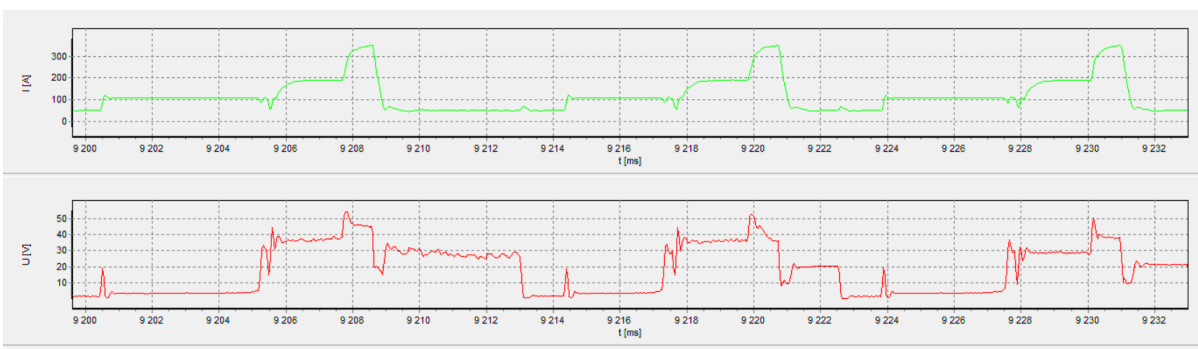
Obr. 35 Nastavení dráhy navařování do osy vzorku

Jakmile byla dráha robota ověřena spuštěním celého programu nanečisto (tj. bez svařování), změřila se počáteční vzdálenost laserem a mohlo být zahájeno navařování. Po navaření první vrstvy se přistoupilo k metodice měření uvedené v 4.2.3. Veškeré změřené hodnoty jsou zaznamenány v příloze v tabulce naměřených hodnot. Po zaznamenání hodnot byla navařena další vrstva a obdobně změřena. Takto se pokračovalo, dokud nebyl návar složen z 20 vrstev a navařování bylo u konce. Navařování a měření probíhalo u všech vzorků totožně. Vzorky se liší pouze technikou navařování.

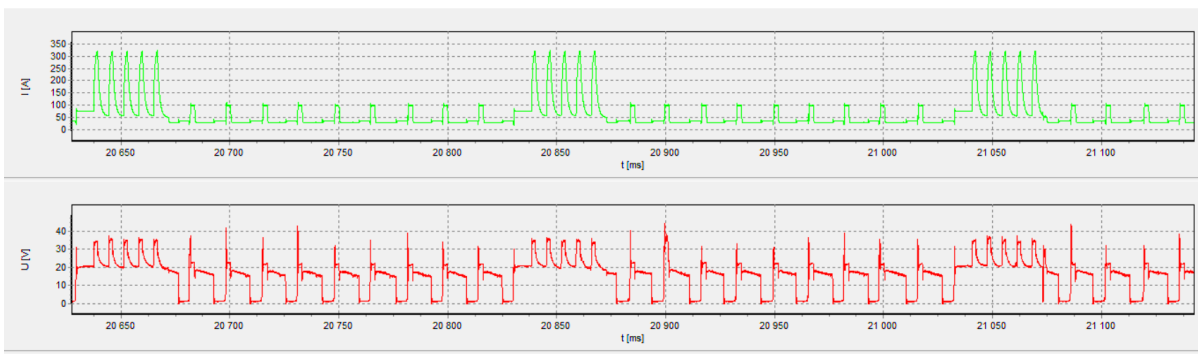
Současně s navařováním se ukládaly hodnoty napětí a proudu v průběhu svařování. Grafy průběhu napětí a proudu použitých technik svařování zaznamenané Weldmonitorem jsou na Obr. 36 až Obr. 41



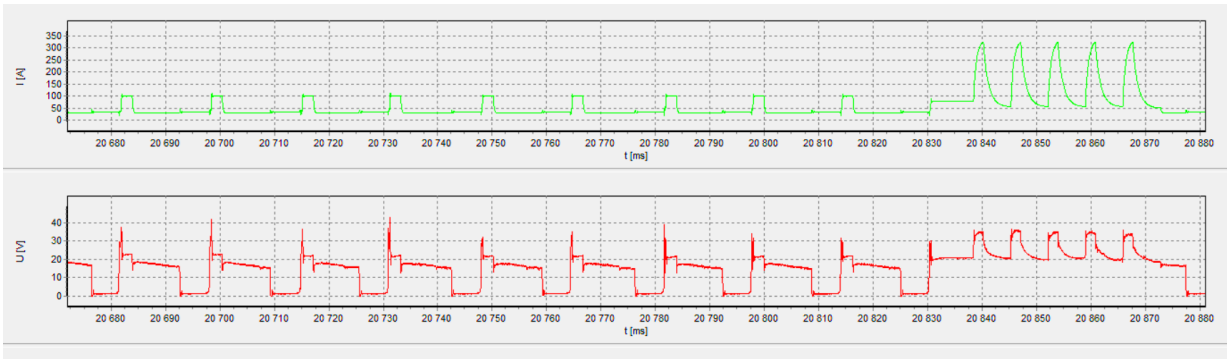
Obr. 36 Průběh proudu a napětí svařovací techniky CMT



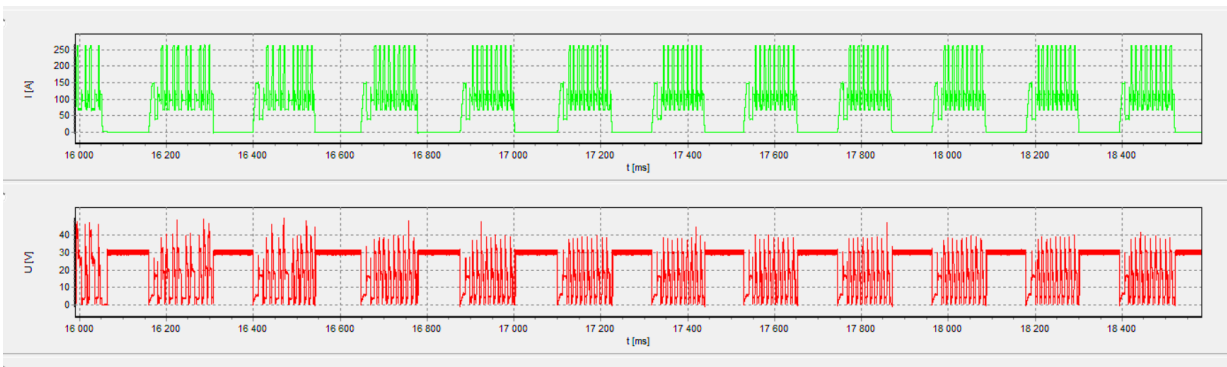
Obr. 37 Detail průběhu proudu a napětí svařovací techniky CMT



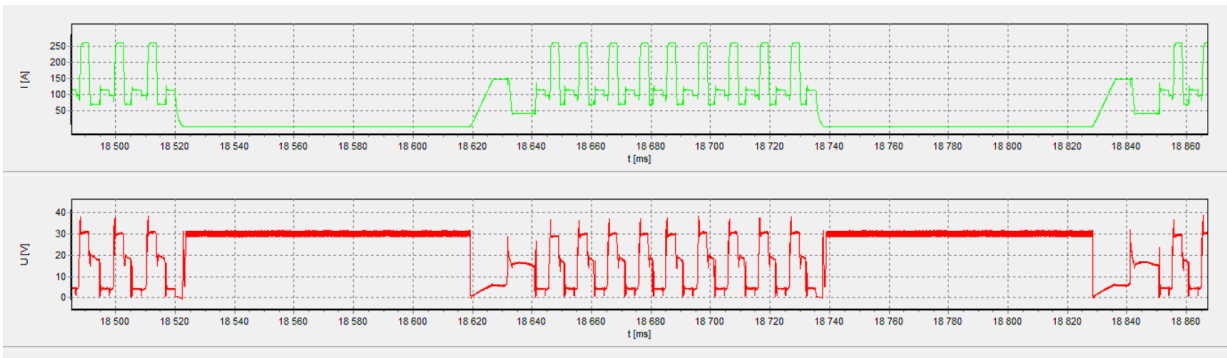
Obr. 38 Průběh proudu a napětí svařovací techniky CMT pulse



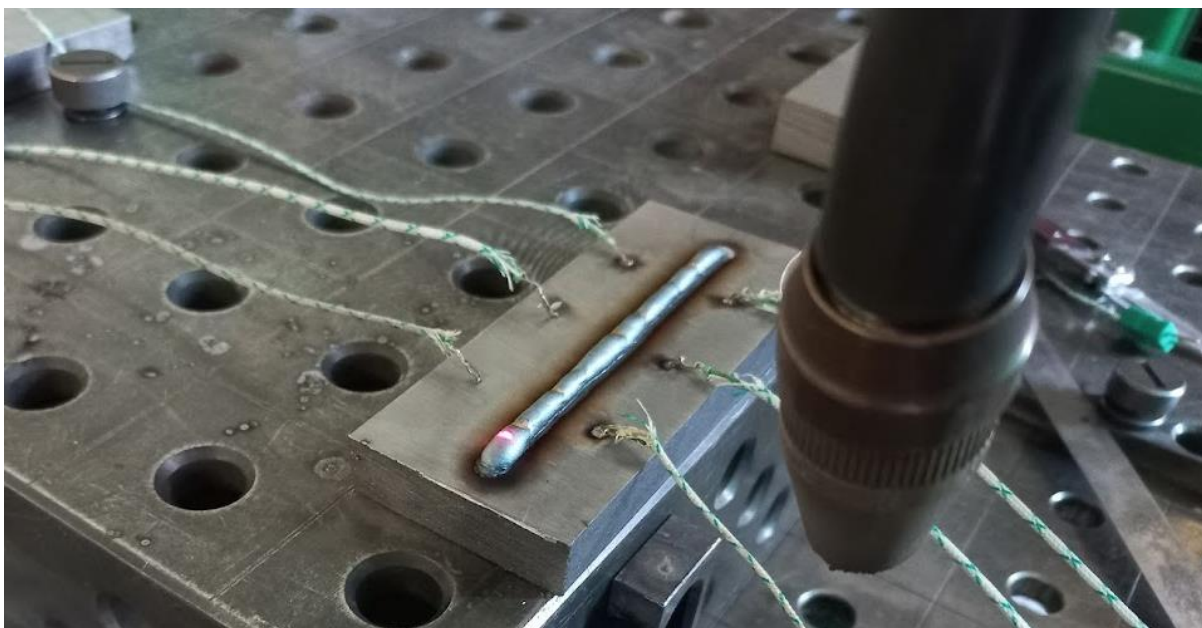
Obr. 39 Detail průběhu proudu a napětí svařovací techniky CMT pulse



Obr. 40 Průběh proudu a napětí svařovací techniky CMT cycle step



Obr. 41 Detail průběhu proudu a napětí svařovací techniky CMT cycle step



Obr. 42 Měření laserem druhé vrstvy navařené technikou CMT

Prvním problémem, který byl objeven při měření vzdálenosti laserem bylo nedostatečné zatemnění místnosti a z toho důvodu docházelo ke špatnému zpětnému odrazu laseru a proměrování vzdálenosti. Proto byla kolem pracovního prostoru robota umístěna zástěna, která výrazně snížila intenzitu osvětlení v místnosti. Před umístěním zástěny byla naměřena v pracovním prostoru robota intenzita osvětlení 645 lx. Po zatmění se přesnost měření výrazně zvýšila s tím, že intenzita osvětlení klesla na 110 lx. Umístění zástěny je vidět na Obr. 43.

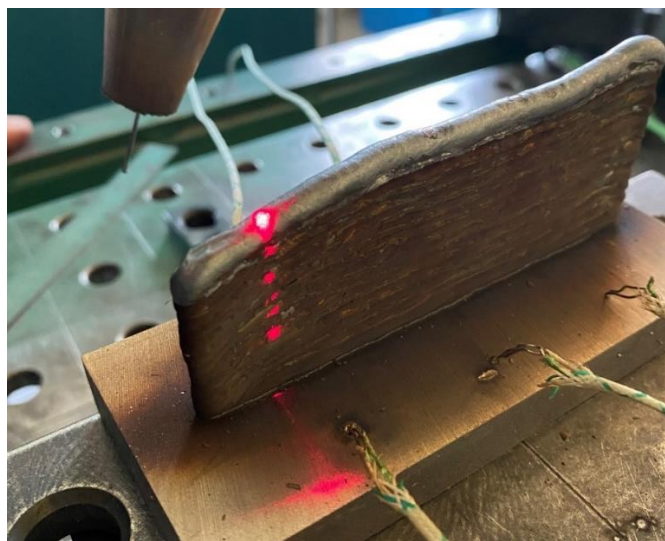
Další problém při měření laserem byla samotná velikost laserového paprsku. Laserový paprsek byl trochu širší než samotný návar a z toho důvodu docházelo občas k proměrování. V takovém případě se muselo měření opakovat. Po navaření několika vrstev navíc docházelo k odchylce od trajektorie navařování. Návar není z hlediska geometrie dokonale rovný a čím více vrstev bylo navařeno, tím větší byla odchylka od trajektorie navařování a měření. Z tohoto důvodu se použila korekce měření a laserový paprsek byl nastaven zpět do středu navařené vrstvy. I přes korekci občas docházelo kvůli velikosti laserového paprsku k proměrování ukázaného na Obr. 45.



Obr. 43 Umístění zástěny do pracovního prostoru robota



Obr. 44 Viditelnost laseru po umístění zástěny

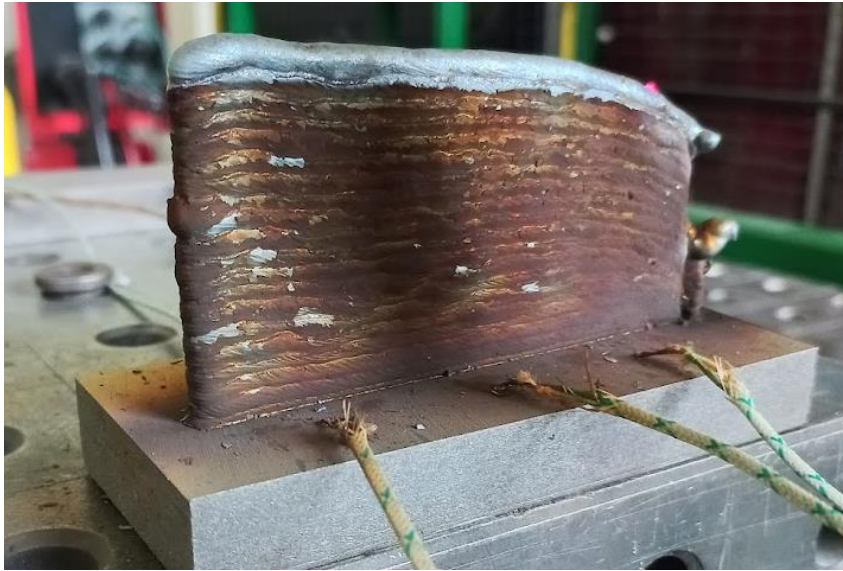


Obr. 45 Laserový paprsek byl větší než samotný návar

Při vizuálním zhodnocení navařených vzorků typu „stěna“ je na první pohled vidět nerovnoměrný přírůstek u všech vzorků. Největší rozdíly mezi startem a ukončením návaru jsou u techniky CMT. Přírůstek vrstvy se tak v průběhu vzorku značně mění a pro další výzkum by tak bylo vhodné zaměřit se i na parametry navařování na startu a ukončení. Některé publikace se již tímto problémem zabývají a mohly by být tak vhodnou inspirací v dalším výzkumu této problematiky.



a)



b)



c)

Obr. 46 Navařené vzorky metodou a) CMT, b) CMT cycle step, c) CMT pulse

4.3. Zpracování naměřených hodnot

Pro dosažení potřebných výsledků muselo být provedeno přepočítání naměřených hodnot. Vzhledem k tomu, že laserový senzor měřil vzdálenost polohy laseru od poslední vrstvy, byla výška vrstvy dopočítána odečtením předchozí hodnoty od nově naměřené. Všechny naměřené hodnoty jsou v tabulce naměřených hodnot v příloze DP. Příklad výpočtu dvacáté vrstvy prvního měření pro techniku CMT, měřenou laserovým senzorem, je uveden níže.

Naměřená hodnota 19. vrstvy: 345 mm

Naměřené hodnota 20. vrstvy: 342 mm

$$h_i = n_{i-1} - n_i$$
$$h_{20-1} = 345 - 342 = 3 \text{ mm}$$

Výška vypočítané dvacáté vrstvy je 3 mm. Veškeré vypočítané hodnoty jsou zaneseny v příloze v tabulce vypočítaných hodnot. Podobně je proveden výpočet výšky vrstvy měřené posuvným měřítkem. Posuvné měřítko zaznamenává celkovou výšku návaru. Příklad výpočtu pro stejnou vrstvu jako v předchozím případě:

Naměřená hodnota 19. vrstvy: 56 mm

Naměřené hodnota 20. vrstvy: 58,6 mm

$$h_i = n_i - n_{i-1}$$
$$h_{20-1} = 58,6 - 56 = 2,6 \text{ mm}$$

Obdobně byly vypočítány všechny výšky vrstev měřené laserovým senzorem a posuvným měřítkem. Výšky vrstev snímané svařovací kamerou byly odměřeny přímo v programu Xiris Weld Studio a byly zaneseny do tabulky vypočítaných hodnot.

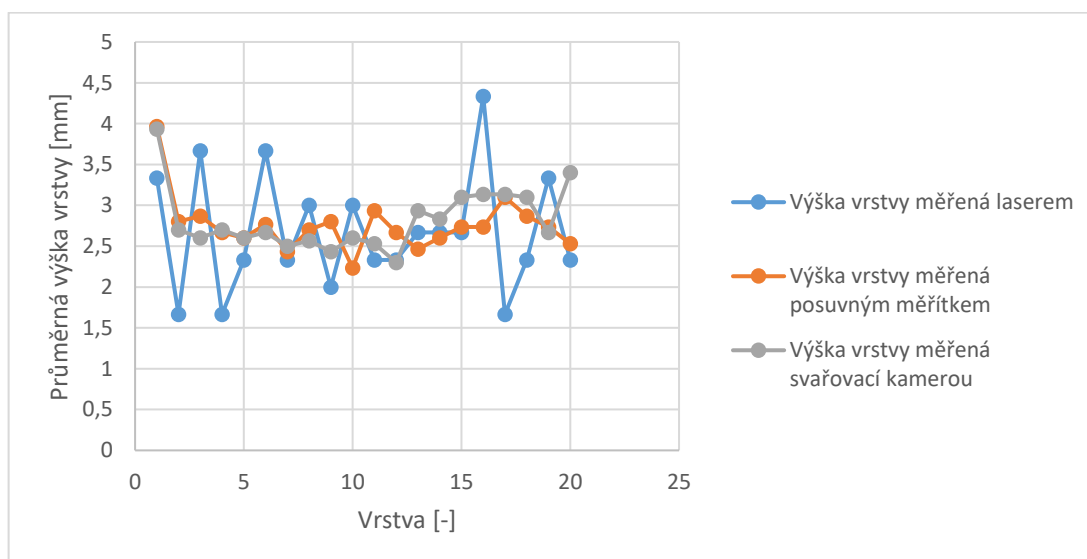
Po přepočítání se stanovila průměrná hodnota výšky jedné vrstvy z již provedených pěti měření. Pro přesnější výsledek byla nejvyšší a nejnižší hodnota odečtena. Příklad výpočtu průměrné hodnoty jedné vrstvy pro první vrstvu měřenou laserovým senzorem navařenou technikou CMT:

$$h_{1-1} = 5 \text{ mm}; h_{1-2} = 3 \text{ mm}; h_{1-3} = 3 \text{ mm}; h_{1-4} = 3 \text{ mm}; h_{1-5} = 4 \text{ mm}$$
$$\bar{h}_1 = \frac{h_{1-1} + h_{1-2} + h_{1-3} + h_{1-4} + h_{1-5} - h_{1MAX} - h_{1MIN}}{3} = \frac{5 + 3 + 3 + 3 + 4 - 5 - 3}{3}$$
$$\bar{h}_1 = 3,33 \text{ mm}$$

Obdobně byly dopočítané všechny průměrné hodnoty každé vrstvy. Tabulka vypočítaných průměrných hodnot se nachází v příloze.

5. Diskuze výsledků

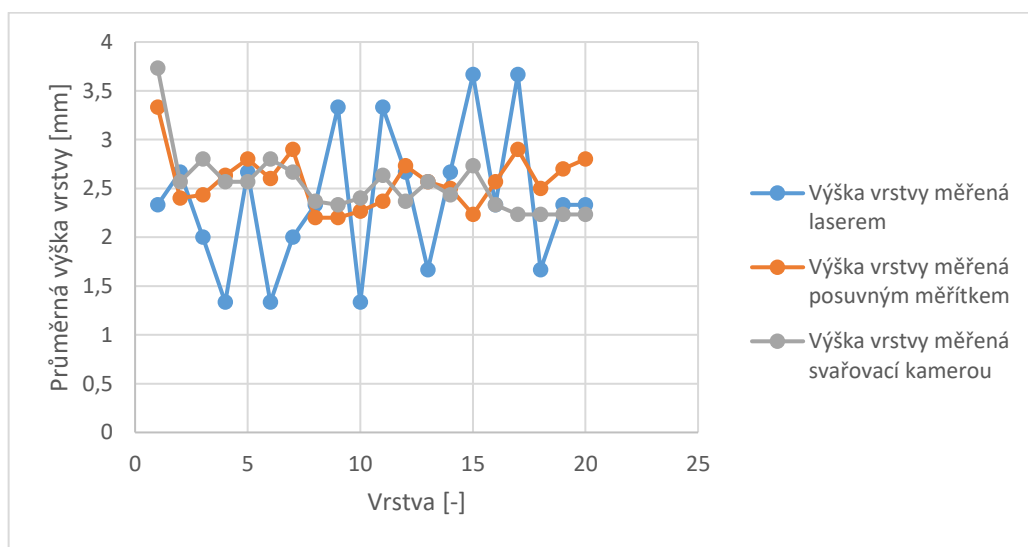
Vypočítané průměrné hodnoty je možné znázornit přehledně do grafů. Pro navařování technikou CMT, CMT cycle step a CMT pulse byly vyneseny grafy průměrné výšky vrstvy příslušné housenky pro všechny tři metody měření. Ze všech tří grafů je patrné, že měřené hodnoty laserovým senzorem mají mnohem větší rozptyl než zbylé dva měřicí systémy. To je převážně způsobeno širokým laserovým paprskem, který v mnoha případech zabíral i bok navařené stěny. Další úskalí laserového senzoru je v přesnosti měření. Vzhledem k tomu, že senzor měřil s přesností na milimetry, nelze přesně určit výšku navařené vrstvy. Laserový senzor je tudíž vhodný využít ke kontrole tam, kde jsou navařovány rozměrnější součástky či kde není potřeba výrazné přesnosti.



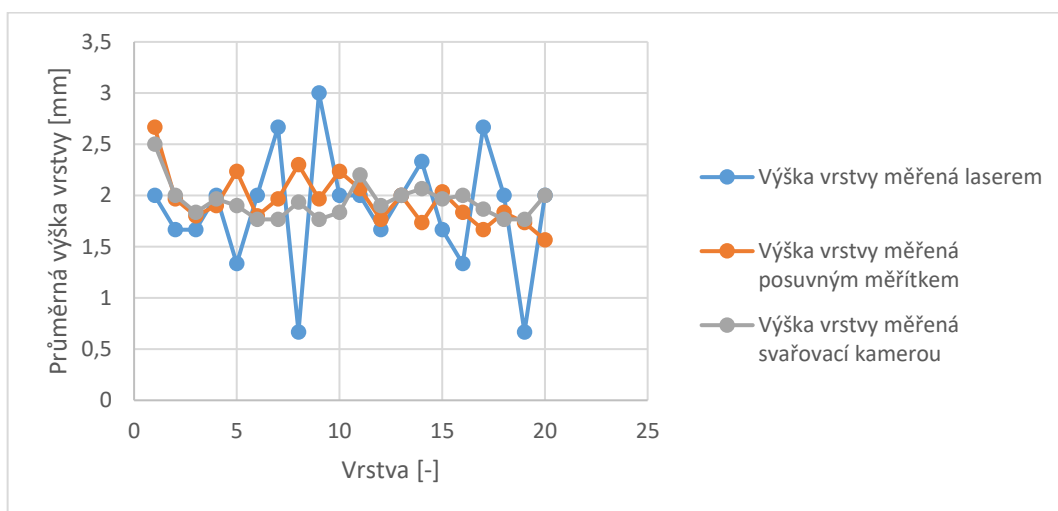
Obr. 47 Průměrná výška vrstvy jednotlivých housenek navařených technikou CMT

Pokud bychom porovnali dvě zbylé metody měření pro všechny techniky navařování, dojdeme k výsledku, že měřené hodnoty se moc neliší. Naměřené hodnoty se pořád pohybují okolo pomyslné osy průměrného přírůstku. Jejich odchylka je dána spíše chybou měření. U posuvného měřítka šlo pouze o lidský faktor měření a odečítání. Posuvné měřítko muselo být ustaveno rovnoběžně s výškou stěny. Poněvadž výška vrstvy byla měřena ručně, docházelo k odchylkám od ideální měřicí pozice. Další úskalí při měření posuvným měřítkem spočívá v měřeném místě. Výška vrstvy byla měřena v příslušném označeném místě, ovšem při ručním měření je tato přesnost opět výrazně snížena. Opakovatelnost měření je tedy velice omezená. Z těchto důvodů je vhodné použít posuvné měřítko pouze k ověření navařené vrstvy, nikoli však k řádnému měření.

Podobné hodnoty, jako při měření posuvným měřítkem, byly zaznamenány i svařovací kamerou. Velikou výhodou tohoto systému měření byla možnost opakovaně přehrát či zastavit záznam. Vzhledem k metodice měření je pomocí svařovací kamery dosahováno poměrně přesných hodnot (přesnost 0,1 mm). Stejně jako u posuvného měřítka je problém měřit ve stejném místě. Aby bylo možné měření opakovat, bylo nutné zastavit záznam v přesně stanovený čas. Software Xiris Weld Studio tuto možnost nenabízí a je jen na operátorovi, jak přesně dokáže video v daném čase zastavit. Z tohoto důvodu by pro další výzkumy bylo vhodné využít jiného svařovacího softwaru, nebo pozměnit metodiku měření pomocí svařovací kamery.

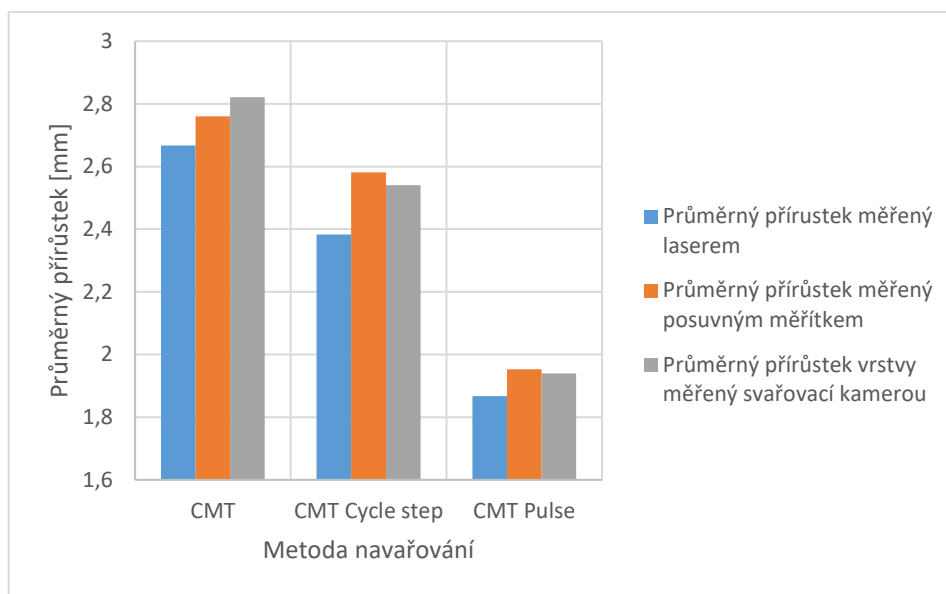


Obr. 48 Průměrná výška vrstvy jednotlivých housenek navařených technikou CMT cycle step



Obr. 49 Průměrná výška vrstvy jednotlivých housenek navařených technikou CMT pulse

Pro ověřování výšky navařené vrstvy existují i jiné postupy, kterými je možné housenky měřit. Pokud bychom potřebovali dosáhnout velice přesných hodnot, je vhodné provést metalografické výbrusy, na kterých je možné velice přesně změřit výšku navařených vrstev. Metalografické výbrusy jsou narozdíl od námi zvolených metod měření velice nákladnou záležitostí, což výrazně snižuje praktické využití. Další vhodnou alternativou by mohlo být měření výšky vrstvy pomocí měření svařovacích parametrů.



Obr. 50 Porovnání průměrného přírůstku různých technik svařování

Jak již bylo uvedeno, parametry svařování byly voleny tak, aby byl proces navařování stabilní. V tomto směru pak můžeme porovnat i průměrný přírůstek na vrstvu pro danou metodu. Data, které graf (Obr. 50) ukazuje, mají velký význam pro volbu navařovací metody. Při využití techniky CMT bychom dosáhli největšího návaru za nejrychlejší čas. Průměrný přírůstek se pohybuje okolo 2,7 mm na vrstvu. Naopak nejmenší přírůstek byl zaznamenán u techniky CMT Pulse s průměrným přírůstkem 1,9 mm na vrstvu.

Pokud porovnáme i metody měření, dojdeme ke stejným závěrům jako v předchozích případech. Lehké odchylky jsou zaznamenány při měření posuvným měřítkem a svařovací kamerou (měření je téměř totožné), větší odchylka okolo 0,1 mm je zaznamenána při měření laserem.

6. Závěr

Diplomová práce je psána na téma Ověření výšky navařené vrstvy procesu WAAM pomocí senzorických systémů. V teoretické části diplomové práce je rozebrána aditivní metoda WAAM včetně modifikovaných svařovacích procesů, dále je popsána problematika monitorování výšky navařené vrstvy a jsou rozebrány metody měření výšky navařené vrstvy.

V praktické části je proveden návrh experimentu, kde byl stanoven počet navařených vzorků pomocí metody CMT, CMT cycle step a CMT Pulse, dále byla stanovena metodika měření výšky vrstvy pomocí laserového senzoru, svařovací kamery a posuvného měřítka. Byla navržena strategie navařování typu "stěna" včetně vzorku a jeho upevnění. Následně byl proveden experiment.

Měření posuvným měřítkem a laserovým senzorem probíhalo přímo na pracovišti, měření svařovací kamerou bylo uskutečněno pomocí softwaru Weld Studio od firmy Xiris. Naměřené hodnoty byly zpracovány a graficky vyhodnoceny, proběhlo ověření výšek navařených vrstev pomocí senzorických systémů

Při měření laserovým senzorem bylo zjištěno hned několik zásadních nedostatků, jakými jsou: osvětlení místnosti, široký laserový paprsek a měření s přesností na milimetry. U posuvného měřítka je největším problémem ruční měření a nejpřesnějších hodnot bylo dosaženo pomocí svařovací kamery

Největší průměrný přírůstek byl zaznamenán při navařování metodou CMT a to v hodnotě 2,7 mm na vrstvu, naopak nejnižší nárůst vrstvy probíhal při navařování metodou CMT pulse (1,9 mm na vrstvu).

Pro další experimenty je vhodné upravit počáteční a koncové svařovací parametry, aby byla výška vrstvy v celé délce totožná a nedocházelo k výrazným rozdílům mezi počátkem a koncem návaru. Pro lepší a přesnější výsledky by bylo vhodné pozměnit metodiku měření a vyhodnocování pomocí svařovací kamery a laserového senzoru. Při využití laserového senzoru je vhodné mít dostatečné zatemnění v místnosti a měřený návar by měl být širší než laserový paprsek. Posuvné měřítko není vhodné pro měření výšky navařené vrstvy a v praxi pro získávání hodnot je nevyužitelné. Lze jej využít maximálně pro kontrolu výšky navařené vrstvy. Dále by bylo vhodné ověřit výšky navařené vrstvy i dalšími metodami, jako je metalografický výbrus či měření svařovacích parametrů.

Bibliografie

- [1] DING, Donghong, Zengxi PAN, Dominic CUIURI a Huijun LI. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2015, **2015**(81), 465–481 [cit. 2022-07-07]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1007/s00170-015-7077-3>
- [2] Additive manufacturing in unmanned aerial vehicles (UAVs): Challenges and potential. *Aerospace Science and Technology* [online]. 2017, **2017**(63), 140-151 [cit. 2022-07-07]. ISSN 1270-9638. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.ast.2016.12.019>.
- [3] GISARIO, Annamaria, Michele KAZARIAN a Filomeno MARTINA. Metal additive manufacturing in the commercial aviation industry: A review. *Journal of Manufacturing Systems*. 2019, **2019**(53), 124-149. ISSN 0278-6125.
- [4] WILLIAMS, S. W., F. MARTINA, A. C. ADDISON, J. DING, G. PARDAL a P. COLEGROVE. Wire Arc Additive Manufacturing. *Materials Science and Technology*. 2016, **32**(7), 641-647. ISSN 0267-0836. Dostupné z: doi:[10.1179/1743284715Y.00000000073](https://doi.org/10.1179/1743284715Y.00000000073)
- [5] KOLAŘÍK, Ladislav, Jan SUCHÁNEK a Marie KOLAŘÍKOVÁ. Navařování metodou WAAM. *MM spektrum* [online]. 2018, **2018**(1) [cit. 2020-02-28]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/navarovani-metodou-waam.html>
- [6] Interpass rolling of Ti-6Al-4V wire + arc additively manufactured features for microstructural refinement. *Additive Manufacturing* [online]. 2018, (21), 340-349 [cit. 2022-03-04]. ISSN 2214-8604. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.03.006>.
- [7] HÁJEK, Jaroslav. Přehled technologií svařování v ochranných plynech. *MM Průmyslové spektrum: Kód článku: 100319* [online]. 2010, (3) [cit. 2022-04-10]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prehled-technologie-svarovani-v-ochrannych-plynech>
- [8] KUBÍČEK, J. *Technologie svařování*. Brno. Studijní opory pro výuku v kurzech. ÚST, odbor svařování a PÚ, VUT Brno. Dostupné z:

- http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/technologie_svarovani_5te_etv_etv-k_kubicek.pdf.
- [9] Svařování TIG - seznámení. In: *Svářečky-elektrody.cz* [online]. [cit. 2022-04-16]. Dostupné z: <https://www.svarecky-elektrody.cz/svarovani-tig-zakladni-seznameni/t-39/t-120>
- [10] ROHAN, Pavel a Tomáš GURČÍK. Vliv složek ochranných atmosfér na WAAM. *MM Spektrum* [online]. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie, 2020, **2020** [cit. 2020-07-30]. Dostupné z: <http://mmspektrum.com/clanek/vliv-slozek-ochrannych-atmosfer-na-waam.html>
- [11] *Vliv parametrů aditivního procesu WAAM na kvalitu návarů*. Praha, 2020. Dostupné také z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/89565/F2-BP-2020-Schwarz-Rudolf-BP%20-%20Schwarz.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. Bakalářská Práce. ČVUT. Vedoucí práce Doc. Ing. Kolařík Ladislav Ph.D.
- [12] RIOS, Sergio a Filomeno MARTINA. Analytical Process Model for Wire + Arc Additive Manufacture. *Additive Manufacturing* [online]. 2018, 1-9 [cit. 2022-04-07]. Dostupné z: [doi:https://doi.org/doi:10.1016/j.addma.2018.04.003](https://doi.org/doi:10.1016/j.addma.2018.04.003)
- [13] In-process path replanning and online layer height control through deposition arc current for gas metal arc based additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes* [online]. 2021, 1169-1179 [cit. 2022-03-12]. ISSN 1526-6125. Dostupné z: <https://www.journals.elsevier.com/journal-of-manufacturing-processes>
- [14] XIONG, Jun a Guangjun ZHANG. Online measurement of bead geometry in GMAWbased additive manufacturing using passive vision. *Measurement Science and Technology* [online]. 2013, **24**(11), 1-8 [cit. 2022-04-01]. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/24/11/115103>
- [15] KISSINGER, Thomas, Bastien GOMIS, Jialuo DING, Stewart W. WILLIAMS a Ralph P. TATAM. *Measurements of wire + arc additive manufacturing layer heights during arc operation using coherent range-resolved interferometry (CO-RR)* [online]. Cranfield University, MK43 0AL, United Kingdom, 2019, 1-3 [cit. 2022-03-21]. Dostupné z: <https://www.euspen.eu/knowledge-base/AM19102.pdf>

- [16] M HALLAM, Jonathan, Thomas KISSINGER, Thomas O H CHARRETT a Ralph P TATAM. In-process range-resolved interferometric (RRI) 3D layer height measurements for wire + arc additive manufacturing (WAAM). *Measurement Science and Technology* [online]. Germany, 2022, 1-13 [cit. 2022-04-07]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ac440e>
- [17] FENG, Jicai, Hongtao ZHANG a Peng HE. The CMT short-circuiting metal transfer process and its use in thin aluminium sheets welding. *Materials & Design* [online]. 2009, **30**(5), 1850-1852 [cit. 2022-04-16]. ISSN 0261-3069. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.07.015>
- [18] A review on Cold Metal Transfer (CMT) technology of welding. *Materials Today: Proceedings* [online]. **2022** [cit. 2022-06-11]. ISSN 2214-7853. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.016>.
- [19] CMT (cold metal transfer) process. In: *Researchgate* [online]. [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/CMT-cold-metal-transfer-process-11_fig1_272600962
- [20] TAPIOLA, Jaakko. Cold Metal Transfer cladding of wear and corrosion resistant coatings in engine applications. *Master of science* [online]. 2017, 37-43 [cit. 2022-06-19]. Dostupné z: [doi:10.13140/RG.2.2.15573.52963](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15573.52963)
- [21] PENG, Mingjian, Hongbing LIU, Ying LIANG, Wenhui XU, Yixuan ZHAO, Shuhai CHEN, Jiarong WENG a Jin YANG. CMT welding-brazing of al/steel dissimilar materials using cycle-step mode. *Journal of Materials Research and Technology* [online]. 2022, (18), 1267-1280 [cit. 2022-06-19]. ISSN 2238-7854. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.03.043>.
- [22] WELD G3Si1. In: *ESAB* [online]. [cit. 2022-07-09]. Dostupné z: <https://www.esab.co.uk/cz/cz/products/filler-metals/mig-mag-wires-gmaw/mild-steel-wires/weld-g3si1.cfm>
- [23] Inomax[®] 2 - směs plynů pro svařování. In: *Air Products* [online]. [cit. 2022-07-09]. Dostupné z: <https://shop.airproducts.com/emea/cz/cs-CZ/products/252474>

Seznam tabulek

Tab. 1 Chemické složení svarového kovu G3Si1 v hm. % [22].....	44
Tab. 2 Mechanické vlastnosti přídatného materiálu [22].....	44
Tab. 3 Základní parametry svařování technikou CMT	45
Tab. 4 Základní parametry svařování technikou CMT cycle step	45
Tab. 5 Základní parametry svařování technikou CMT Pulse	45

Seznam obrázků

Obr. 1 Porovnání nákladů na kus v závislosti na množství pro konvenční a aditivní technologie. Upraveno dle [2].....	11
Obr. 2 Rozdělení aditivních metod. Upraveno dle [3].....	12
Obr. 3 - Robotické pracoviště a numericky řízený portál [4].....	14
Obr. 4 Schéma navařování metodou WAAM [6].....	15
Obr. 5 - Výrobek navařený metodou WAAM [4].....	15
Obr. 6 - Schéma svařování metodou MIG/MAG [8].....	16
Obr. 7 - svařovací proces TIG [9].....	17
Obr. 8 – Odečítání geometrických parametrů [10] [11].....	18
Obr. 9 - Příčné řezy navařenými stěnami s konstantním objemem materiálu na vrstvu a s vyznačením hlavních rozměrů [12].....	19
Obr. 10 - Geometrie svarové lázně a) při nižším výkonu oblouku a b) při vyšším výkonu oblouku [12].....	20
Obr. 11 - Schéma ovládacího systému. Upraveno dle [13].....	22
Obr. 12 - Schéma vysunutí drátu při navařování. Upraveno dle [13].....	23
Obr. 13 - Porovnání vzdáleností po navaření poslední vrstvy [13].....	24
Obr. 14 - Princip nastavení měření. Upraveno dle [15].....	26
Obr. 15 - Uspořádání zařízení při měření. Upraveno dle [15].....	26
Obr. 16 - Návrh snímání výšky a šířky navařené vrstvy pomocí dvou kamer. Upraveno dle [14].....	27
Obr. 17 - Schéma pohybu drátu modifikace CMT [19].....	30
Obr. 18 Princip přenosu metodou CMT + P [18].....	31
Obr. 19 Porovnání průběhu napětí a proudu: (a) CMT, (b) CMT pulse. Upraveno dle [20].....	32
Obr. 20 Návrh rovinného návaru. Upraveno dle [11].....	33
Obr. 21 Návrh rozměrů vzorku včetně upínacího systému.....	34
Obr. 22 Upevnění vzorků k modulárnímu upevňovacímu přípravku.....	34
Obr. 23 Navržení umístění sensorických systémů na svařovací hořák.....	35
Obr. 24 Upevnění vzorku na jednoosé polohovadlo.....	37
Obr. 25 Průběh navařování přičemž je pořizován záznam svařovací kamerou.....	37
Obr. 26 Měření laserovým senzorem.....	38

Obr. 27 Experimentální robotické pracoviště ÚST FS ČVUT	39
Obr. 28 Návrh a realizace upevnění vzorků na pomocný stůl	39
Obr. 29 Umístění senzorických systémů na svařovacím hořáku	40
Obr. 30 Kalibrace svařovací kamery Xiris XVC-700/710	40
Obr. 31 Zastavení videozáznamu v čase 9,52 s	42
Obr. 32 Vytvoření základny pro měření výšky vrstvy	42
Obr. 33 Posunutí záznamu o 5,1 s	43
Obr. 34 Měření výšky vrstvy	43
Obr. 35 Nastavení dráhy navařování do osy vzorku	45
Obr. 36 Průběh proudu a napětí svařovací techniky CMT	46
Obr. 37 Detail průběhu proudu a napětí svařovací techniky CMT	46
Obr. 38 Průběh proudu a napětí svařovací techniky CMT pulse	46
Obr. 39 Detail průběhu proudu a napětí svařovací techniky CMT pulse	47
Obr. 40 Průběh proudu a napětí svařovací techniky CMT cycle step	47
Obr. 41 Detail průběhu proudu a napětí svařovací techniky CMT cycle step	47
Obr. 42 Měření laserem druhé vrstvy navařené technikou CMT	48
Obr. 43 Umístění zástěny do pracovního prostoru robota	49
Obr. 44 Viditelnost laseru po umístění zástěny	49
Obr. 45 Laserový paprsek byl větší než samotný návar	49
Obr. 46 Navařené vzorky metodou a) CMT, b) CMT cycle step, c) CMT pulse	50
Obr. 47 Průměrná výška vrstvy jednotlivých housenek navařných technikou CMT	52
Obr. 48 Průměrná výška vrstvy jednotlivých housenek navařných technikou CMT cycle step	53
Obr. 49 Průměrná výška vrstvy jednotlivých housenek navařných technikou CMT pulse	53
Obr. 50 Porovnání průměrného přírůstku různých technik svařování.....	54

Přílohy

Tabulka naměřených hodnot

Typ navařování	Vrstva/Měření	Měření výšky laserem [mm], počátek 400 mm					Měření výšky posuvným měřítkem [mm], počátek 0 mm				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
CMT	1	395	397	397	397	396	4,5	3,8	4	3,8	4,1
	2	395	395	395	394	395	7,9	6,5	6,9	6,4	6,9
	3	390	390	391	392	393	11,1	9,3	9,7	9,4	9,3
	4	389	391	389	389	391	14,1	12,1	12,4	11,9	11,1
	5	386	385	387	389	389	17,6	14,7	14,8	14,7	13,2
	6	382	383	384	383	385	20,5	17,7	17,5	17,4	15,5
	7	380	380	379	381	383	22,7	20,5	20,2	19,8	17,6
	8	376	377	378	377	381	25,5	23,7	22,9	22,4	19,1
	9	375	373	376	377	378	28,4	26,3	25,5	25,3	22,2
	10	370	370	373	374	376	30,8	28,7	28	27,2	24
	11	367	369	370	372	374	33,8	31,2	30,5	30,5	27,5
	12	365	366	367	370	372	36,6	34,1	33,3	32,9	29,8
	13	363	362	365	368	368	39,1	37	35,9	35,2	30,9
	14	360	363	362	362	366	41,8	39,1	38,6	37,6	34,1
	15	357	360	361	359	364	44,3	41,9	41,2	40,4	37
	16	353	354	356	356	360	47,8	44,9	43,7	43,1	39,1
	17	352	352	354	353	359	50,7	48,1	46,9	46,6	41,9
	18	350	349	352	352	355	53,7	50,7	49,9	49,2	44,9
	19	345	347	349	348	352	56	53,6	53	52,2	46,8
	20	342	344	347	346	351	58,6	55,8	55,4	54,8	49,7
		Měření výšky laserem [mm], počátek 398 mm					Měření výšky posuvným měřítkem [mm], počátek 0 mm				
Typ navařování	Vrstva/Měření	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
CMT cycle step	1	396	396	396	395	394	4	3,3	3,4	3,2	3,3
	2	393	393	393	393	393	6,4	5,7	5,8	5,4	5,7
	3	389	391	391	392	391	9,2	8,1	8,1	8	7,7
	4	389	386	391	389	390	11,7	10,8	10,8	10,7	9,4
	5	385	384	386	387	388	14,8	13,4	13,2	13,6	12,3
	6	385	384	384	379	386	17,7	16,2	16	15,8	13,2
	7	379	383	381	383	384	21	18,8	18,6	18,6	16,5
	8	378	379	383	378	382	23	21,3	21,1	20,7	17,7
	9	374	377	375	376	378	25,6	23,9	23	22,8	19,6
	10	372	374	375	375	377	28	26,2	25,9	24,9	21,7
	11	369	370	370	372	376	30,5	28,7	27,9	27,5	23,8
	12	366	368	372	369	373	33,6	31,5	30,9	29,9	25,8
	13	365	366	367	368	371	36,1	34,1	33,5	32	28,4
	14	362	363	365	363	369	38,5	37,4	36,1	34,5	30,5
	15	358	359	361	362	366	41,2	39,2	38,3	37,3	32,3
	16	356	357	358	359	364	44,1	41,9	40,8	39,8	34,1
	17	351	354	354	355	363	47,1	44,7	43,8	42	37
	18	350	352	352	355	359	49,2	47,2	46,3	44,9	39,5
	19	348	349	350	352	358	52,1	50,5	49,1	46,8	41,9
	20	345	347	348	350	354	55,3	53,3	51,5	50	44,2
		Měření výšky laserem [mm], počátek 399 mm					Měření výšky posuvným měřítkem [mm], počátek 0 mm				
Typ navařování	Vrstva/Měření	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
CMT pulse	1	397	396	397	397	398	2,9	2,5	2,6	2,7	2,7
	2	396	395	395	395	395	5,2	4,4	4,6	4,4	4,7
	3	394	393	394	394	393	7,6	6,4	6,2	6,2	6
	4	391	392	392	391	393	9,3	8,3	8,1	8,3	7,9
	5	389	392	391	389	392	11,8	10,7	10,2	10,5	9,5
	6	389	387	390	387	389	13,7	12,7	12,1	12,1	11
	7	384	384	387	385	389	15,6	14,7	14,2	14,1	12,1
	8	383	385	384	385	388	18,3	16,8	16,7	16,4	13,9
	9	380	382	381	382	386	20,3	19,2	18,8	18,2	15
	10	377	380	380	381	383	22,6	21,7	20,9	20,5	16,4
	11	375	378	378	379	381	24,9	24,4	22,9	22,4	17,9
	12	374	374	376	377	380	27,2	26,3	25,1	23,6	19,1
	13	372	374	374	375	378	29,3	28,6	26,8	24,4	21,3
	14	368	372	371	373	377	30,8	30,4	28,7	26,5	22,3
	15	366	370	370	371	376	33,4	32,1	30,5	28,4	24,7
	16	365	366	368	370	375	35	34	32,5	31,1	26,2
	17	362	364	366	367	371	36,8	35,8	34,4	32,5	27,6
	18	360	362	364	365	372	39	37,6	36,4	33,9	29,3
	19	360	362	363	364	369	40,9	39,6	37,9	35,7	30,5
	20	357	358	362	363	367	42,4	41,6	39,5	36,9	32,1

Tabulka vypočtených hodnot

Typ navařování	Vrstva/Měření	Výška vrstvy měřená laserem [mm]					Výška vrstvy měřená posuvným měřítkem [mm]					Výška vrstvy měřená svařovací kamerou [mm]				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
CMT	1	5	3	3	3	4	4,5	3,8	4	3,8	4,1	4,1	3,8	3,9	3,7	4,1
	2	0	2	2	3	1	3,4	2,7	2,9	2,6	2,8	3,4	2,6	2,9	2,6	2,6
	3	5	5	4	2	2	3,2	2,8	2,8	3	2,4	3	2,3	2,5	3	2,2
	4	1	-1	2	3	2	3	2,8	2,7	2,5	1,8	3,1	2,9	2,5	2,7	2,5
	5	3	6	2	0	2	3,5	2,6	2,4	2,8	2,1	3,6	2,5	2,4	2,7	2,6
	6	4	2	3	6	4	2,9	3	2,7	2,7	2,3	3,1	2,5	2,6	2,9	1,8
	7	2	3	5	2	2	2,2	2,8	2,7	2,4	2,1	2,2	2,7	2,9	2,6	2,1
	8	4	3	1	4	2	2,8	3,2	2,7	2,6	1,5	2,9	2,7	2,7	2,3	2,1
	9	1	4	2	0	3	2,9	2,6	2,6	2,9	3,1	2,7	2,5	2,2	2,6	2,2
	10	5	3	3	3	2	2,4	2,4	2,5	1,9	1,8	2,7	2,6	2,8	2,2	2,5
	11	3	1	3	2	2	3	2,5	2,5	3,3	3,5	2,6	2,8	2,4	2,5	2,5
	12	2	3	3	2	2	2,8	2,9	2,8	2,4	2,3	2,9	2,2	1,9	2,3	2,4
	13	2	4	2	2	4	2,5	2,9	2,6	2,3	1,1	3,3	3,2	2,8	2,8	2,4
	14	3	-1	3	6	2	2,7	2,1	2,7	2,4	3,2	3,1	2,4	3,1	2,7	2,7
	15	3	3	1	3	2	2,5	2,8	2,6	2,8	2,9	3,2	3,2	2,9	3,6	2,6
	16	4	6	5	3	4	3,5	3	2,5	2,7	2,1	3	3,5	3,1	3,3	2,9
	17	1	2	2	3	1	2,9	3,2	3,2	3,5	2,8	3,2	3,1	3,1	3,1	3,3
	18	2	3	2	1	4	3	2,6	3	2,6	3	3,3	3,1	3,1	3,1	2,5
	19	5	2	3	4	3	2,3	2,9	3,1	3	1,9	2,7	2,6	2,7	3	2,4
	20	3	3	2	2	1	2,6	2,2	2,4	2,6	2,9	2,9	3,6	3,7	3,2	3,4
CMT cycle step	1	2	2	2	3	4	4	3,3	3,4	3,2	3,3	4	3,7	3,8	3,7	3,3
	2	3	3	3	2	1	2,4	2,4	2,4	2,2	2,4	2,9	2,5	2,6	2,6	2,4
	3	4	2	2	1	2	2,8	2,4	2,3	2,6	2	2,6	3	2,9	2,9	2,6
	4	0	5	0	3	1	2,5	2,7	2,7	2,7	1,7	2,4	2,6	2,9	2,7	2,4
	5	4	2	5	2	2	3,1	2,6	2,4	2,9	2,9	2,6	2,8	2,6	2,5	2,5
	6	0	0	2	8	2	2,9	2,8	2,8	2,2	0,9	2,9	2,9	2,7	2,8	2,5
	7	6	1	3	-4	2	3,3	2,6	2,6	2,8	3,3	2,6	2,7	2,7	2,8	2,2
	8	1	4	-2	5	2	2	2,5	2,5	2,1	1,2	2,7	2,4	2,5	2,2	2,1
	9	4	2	8	2	4	2,6	2,6	1,9	2,1	1,9	2,4	2,2	2,5	2,4	2,1
	10	2	3	0	1	1	2,4	2,3	2,9	2,1	2,1	2,2	2,5	2,5	2,5	1,9
	11	3	4	5	3	1	2,5	2,5	2	2,6	2,1	2,6	2,7	2,6	2,7	2
	12	3	2	-2	3	3	3,1	2,8	3	2,4	2	2,5	2,6	2,5	2,1	1,8
	13	1	2	5	1	2	2,5	2,6	2,6	2,1	2,6	2,5	2,6	2,6	2,6	2
	14	3	3	2	5	2	2,4	3,3	2,6	2,5	2,1	2,3	2,5	2,5	2,5	2,1
	15	4	4	4	1	3	2,7	1,8	2,2	2,8	1,8	2,7	2,7	2,8	2,8	2
	16	2	2	3	3	2	2,9	2,7	2,5	2,5	1,8	2,4	2,3	2,3	2,4	1,7
	17	5	3	4	4	1	3	2,8	3	2,2	2,9	2,4	2,2	2,3	2,2	1,9
	18	1	2	2	0	4	2,1	2,5	2,5	2,9	2,5	2,2	2,2	2,3	2,5	1,8
	19	2	3	2	3	1	2,9	3,3	2,8	1,9	2,4	2,3	2,3	2,2	2,2	2,1
	20	3	2	2	2	4	3,2	2,8	2,4	3,2	2,3	2,2	2,3	2,3	2,2	1,8
CMT pulse	1	2	3	2	2	1	2,9	2,5	2,6	2,7	2,7	2,5	2,6	2,6	2,4	2,3
	2	1	1	2	2	3	2,3	1,9	2	1,7	2	2,1	2	1,6	2	2
	3	2	2	1	1	2	2,4	2	1,6	1,8	1,3	2,1	1,7	1,8	1,6	2
	4	3	1	2	3	0	1,7	1,9	1,9	2,1	1,9	2	2,1	2	1,8	1,9
	5	2	0	1	2	1	2,5	2,4	2,1	2,2	1,6	2,3	1,8	2	1,9	1,7
	6	0	5	1	2	3	1,9	2	1,9	1,6	1,5	1,9	1,9	1,8	1,6	1,5
	7	5	3	3	2	0	1,9	2	2,1	2	1,1	2	1,8	1,8	1,7	1,2
	8	1	-1	3	0	1	2,7	2,1	2,5	2,3	1,8	2,3	1,9	2	1,9	1,5
	9	3	3	3	3	2	2	2,4	2,1	1,8	1,1	1,7	1,7	1,9	1,9	1,1
	10	3	2	1	1	3	2,3	2,5	2,1	2,3	1,4	1,8	1,8	1,9	2	1,2
	11	2	2	2	2	2	2,3	2,7	2	1,9	1,5	2,3	2,4	2,1	2,2	1,7
	12	1	4	2	2	1	2,3	1,9	2,2	1,2	1,2	2,1	1,8	2	1,9	1,3
	13	2	0	2	2	2	2,1	2,3	1,7	0,8	2,2	2,2	2,1	1,8	1,9	2
	14	4	2	3	2	1	1,5	1,8	1,9	2,1	1	2,2	2,1	1,9	2,2	1,3
	15	2	2	1	2	1	2,6	1,7	1,8	1,9	2,4	2	1,9	2	2	1,7
	16	1	4	2	1	1	1,6	1,9	2	2,7	1,5	2,1	2,1	2	1,9	1,5
	17	3	2	2	3	4	1,8	1,8	1,9	1,4	1,4	1,8	1,9	2	1,9	1,6
	18	2	2	2	2	-1	2,2	1,8	2	1,4	1,7	2	1,7	1,8	1,8	1,3
	19	0	0	1	1	3	1,9	2	1,5	1,8	1,2	2,1	2	1,6	1,7	1,4
	20	3	4	1	1	2	1,5	2	1,6	1,2	1,6	2,3	1,9	2	2,1	1,8

Tabulka vypočítaných průměrných hodnot

Technika	Výška vrstvy měřená laserem [mm]			Výška vrstvy měřená posuvným měřítkem [mm]			Výška vrstvy měřená svařovací kamerou [mm]		
	CMT	CMT cycle step	CMT pulse	CMT	CMT cycle step	CMT pulse	CMT	CMT cycle step	CMT pulse
1	3,3	2,3	2,0	4,0	3,3	2,7	3,9	3,7	2,5
2	1,7	2,7	1,7	2,8	2,4	2,0	2,7	2,6	2,0
3	3,7	2,0	1,7	2,9	2,4	1,8	2,6	2,8	1,8
4	1,7	1,3	2,0	2,7	2,6	1,9	2,7	2,6	2,0
5	2,3	2,7	1,3	2,6	2,8	2,2	2,6	2,6	1,9
6	3,7	1,3	2,0	2,8	2,6	1,8	2,7	2,8	1,8
7	2,3	2,0	2,7	2,4	2,9	2,0	2,5	2,7	1,8
8	3,0	2,3	0,7	2,7	2,2	2,3	2,6	2,4	1,9
9	2,0	3,3	3,0	2,8	2,2	2,0	2,4	2,3	1,8
10	3,0	1,3	2,0	2,2	2,3	2,2	2,6	2,4	1,8
11	2,3	3,3	2,0	2,9	2,4	2,1	2,5	2,6	2,2
12	2,3	2,7	1,7	2,7	2,7	1,8	2,3	2,4	1,9
13	2,7	1,7	2,0	2,5	2,6	2,0	2,9	2,6	2,0
14	2,7	2,7	2,3	2,6	2,5	1,7	2,8	2,4	2,1
15	2,7	3,7	1,7	2,7	2,2	2,0	3,1	2,7	2,0
16	4,3	2,3	1,3	2,7	2,6	1,8	3,1	2,3	2,0
17	1,7	3,7	2,7	3,1	2,9	1,7	3,1	2,2	1,9
18	2,3	1,7	2,0	2,9	2,5	1,8	3,1	2,2	1,8
19	3,3	2,3	0,7	2,7	2,7	1,7	2,7	2,2	1,8
20	2,3	2,3	2,0	2,5	2,8	1,6	3,4	2,2	2,0
Průměrná hodnota	2,7	2,4	1,9	2,8	2,6	2,0	2,8	2,5	1,9