

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



Diplomová práce

**Návrh korekcí navařování konstrukční oceli pro
zlepšenou geometrii návaru na hranách**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Votruba** Jméno: **Vojtěch** Osobní číslo: **419960**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav výrobních strojů a zařízení**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní stroje a zařízení**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Návrh korekcí navařování konstrukční oceli pro zlepšenou geometrii návaru na hranách

Název diplomové práce anglicky:

Structural Steel Welding Corrections for Improved Edge Design Geometry

Pokyny pro vypracování:

Popis tématu: Experimentální výzkum technologie aditivního navařování zejména pro situace, které vyžadují změnu množství přidávaného materiálu.; Osnova práce: 1. Seznámení se s průmyslovými technikami aditivní výroby dílců z kovových materiálů; 2. Seznámení se s dosavadními výsledky experimentů a s jejich nedostatky; 3. Vyhledání možných řešení pomocí rešerše; 4. Teoretický rozbor problému; 5. Návrh vlastních procesních parametrů pro geometricky korektní navařování přímého úseku kontur; 6. Návrh vlastních procesních parametrů pro geometricky korektní navařování ostrých a zaoblených rohů kontur; 7. Popis dalšího využití výsledků; Rozsah textové části: 60 - 80 stran

Seznam doporučené literatury:

KRUMML, Vincenc, ŠTEFL, Milan. Transformátory pro obloukové svařování, Praha: SNTL, 1979. DT 621.314.2:621.791.75; LIPPOLD John C., Welding Metallurgy and Weldability, Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons Inc, 2015. 424s. ISBN 978-1-118-23070-1; BANDYOPADHYAY, Amit, BOSE Susmita. Additive manufacturing, Boca Raton, CRC Press 2016. ISBN 978-1-4822-2359-0

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Jan Smolík, Ph.D., ústav výrobních strojů a zařízení FS


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


Ing. Tomáš Fornůsek, ústav výrobních strojů a zařízení FS

Datum zadání diplomové práce: **12.04.2018** Termín odevzdání diplomové práce: **13.07.2018**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2018**


Ing. Jan Smolík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce


Ing. Petr Kolář, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
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.

30.4.2018
Datum převzetí zadání

V. Votruba
Podpis studenta



Čestné prohlášení

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl v příloženém seznamu veškeré použité informační zdroje 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 28.6.2018

.....

Bc. Vojtěch Votruba



Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu své práce Ing. Janu Smolíkovi, Ph.D., který mi umožnil se podílet na výzkumném projektu hybridní technologie na RCMT a můj výzkum pomohl zrealizovat jako diplomovou práci.

Největší dík patří konzultantovi a mému nadřízenému Ing. Tomáši Fornůskovi za mnoho vysvětlení, rad a trpělivosti a ochotu kdykoliv pomoci.

Dále bych chtěl poděkovat Ing. Davidu Burianovi, Ph.D. za pomoc při experimentálním měření termokamerou a Ing. Janu Hornychovi, Ph.D. za pomoc při vyhodnocení pořízených termosnímků. Mé díky patří i Ing. Janu Malému a Mgr. Janu Lomničkovi za praktické rady a pomoc v laboratořích. Také děkuji Ing. Jaroslavu Červenkovvi za pomoc při fotografování vzorků a Ing. Ivanu Divišovi za několik užitečných rad.

Nakonec bych chtěl poděkovat svým rodičům za podporu a zázemí, jimiž mi umožňují bezstarostné studium.



Anotační list

<i>Jméno autora:</i>	Bc. Vojtěch Votruba
<i>Název diplomové práce:</i>	Návrh korekcí navařování konstrukční oceli pro zlepšenou geometrii návaru na hranách
<i>Rozsah práce:</i>	76 stran, 91 obrázků ,7 tabulek
<i>Akademický rok:</i>	2017/2018
<i>Ústav/Odbor:</i>	Ústav výrobních strojů a zařízení
<i>Vedoucí diplomové práce:</i>	Ing. Jan Smolík, Ph.D.
<i>Konzultant:</i>	Ing. Tomáš Fornůsek
<i>Zadavatel tématu:</i>	ČVUT FS, Ú12135
<i>Využití:</i>	Optimalizace hybridní technologie používající navařování metodou MIG/MAG
<i>Klíčová slova:</i>	Dráhové korekce, Aditivní technologie, Hybridní technologie, MIG/MAG, CNC stroj, NC programování, Siemens NX, Postprocessor, Experiment
<i>Anotace:</i>	Práce se zabývá návrhem korekcí pro aditivní, resp. hybridní výrobu dílců. Hlavní částí práce jsou experimenty a jejich vyhodnocení. Veškeré experimenty proběhly v první polovině roku 2018 v laboratořích RCMT. K experimentům byl použit CNC hybridní stroj Bridgeport VMC 500 XP s řídicím systémem Heidenhain. Potřebné NC programy byly vytvořeny v softwaru Siemens NX.



Annotation sheet

<i>Author:</i>	Bc. Vojtěch Votruba
<i>Title of diploma:</i>	Structural Steel Welding Corrections for Improved Edge Design Geometry
<i>Extent:</i>	76 pages, 91 figures, 7 tables
<i>Academic year:</i>	2017/2018
<i>Department:</i>	Department of Production Machines
<i>Supervisor:</i>	Ing. Jan Smolík, Ph.D.
<i>Consultant:</i>	Ing. Tomáš Fornůsek
<i>Submitter of the Theme:</i>	CTU – Faculty of Mechanical Engineering, Ú12135
<i>Application:</i>	Optimization of hybrid manufacturing using MIG/MAG welding
<i>Keywords:</i>	Toolpath corrections, Additive Manufacturing, Hybrid manufacturing, MIG/MAG, CNC machine, NC programming, Siemens NX, Post-processing, Experiment
<i>Annotation:</i>	The thesis focuses on welding corrections for additive, resp. hybrid manufacturing. Main part of the thesis is about experiments and their evaluation. All the experiments were held in the first half of the year 2018 in RCMT laboratories. CNC hybrid machine Bridgeport VMC 500 XP with control system Heidenhain was used for the experiments. All the NC codes needed were created in software Siemens NX.



Obsah

1	Přehled použitých zkratk a veličin	7
2	Úvod a cíle práce.....	8
3	Průmyslové techniky aditivní výroby dílců z kovových materiálů	10
3.1	Využití aditivní technologie v průmyslu.....	10
3.1.1	Direct Metal Laser Sintering (DMLS).....	10
3.1.2	Laser Metal Deposition (LMD).....	12
3.1.3	Navarování elektrickým obloukem	12
3.1.4	Porovnání obloukové metody s konkurencí.....	15
3.2	CAM software pro aditivní navarování	17
3.2.1	CAM	17
3.2.2	Shrnutí nejdůležitějších dodavatelů a rozdělení trhu.....	21
3.2.3	Specifikace aditivního modulu v softwaru Siemens NX.....	23
4	Technické podmínky pro vývoj korekcí.....	27
4.1	Specifikace stroje.....	27
4.2	Příslušenství instalované na stroji.....	28
4.3	Metoda CMT	30
4.4	Popis funkce svařovacího agregátu a parametry elektrického oblouku.....	31
5	Dosavadní výsledky experimentů a jejich nedostatky	32
6	Výpočet vlivu geometrických a kinematických parametrů na svarovou housenku....	37
6.1	Popis návrhu výpočtů.....	37
6.2	Získání kinematických parametrů stroje.....	38
6.3	Návrh popisu aproximace	38
6.3.1	Vliv zpomalení posuvové rychlosti	40
6.3.2	Vliv geometrie	41
6.4	Realizace výpočtu v MS Excel.....	42
6.5	Vizualizace svarové housenky v rohu kontury.....	42



6.6	Diskuze výsledků a jejich využití pro návrh experimentů.....	43
7	Experiment pro optimalizaci navařování na přímém úseku kontury	44
7.1	Zahrnuté geometrické a technologické parametry.....	44
7.2	Návrh zdokonaleného zkušební vzorku	46
7.2.1	CAD model v prostředí Siemens NX	46
7.3	Příprava experimentu	47
7.4	Generování příslušných NC kódů a nastavování parametrů svařovacího zdroje .	48
7.5	Postup experimentu	49
7.6	Popis jednotlivých experimentů	50
7.7	Vyhodnocení experimentu – parametry pro další postup	51
8	Experiment pro optimalizaci navařování v rohu kontury.....	52
8.1	Návrh zkušební vzorku	52
8.1.1	CAD model v prostředí Siemens NX	52
8.1.2	Příprava NC kódů	53
8.2	Reálná příprava zkušebních vzorků.....	55
8.3	Počáteční experimenty pro navařování v rohu kontury	56
8.4	Tepelná energie a tepelná kapacita.....	56
8.4.1	Teoretické vysvětlení odvodu tepelné energie	56
8.4.2	Experimentální posouzení odvodu tepelné energie	57
8.5	Provedení experimentů navařování v rohu kontury s přihlédnutím k tepelným jevům 61	
8.6	Vyhodnocení rohových experimentů.....	61
8.7	Návrh rohových korekcí pro zadané rozpětí úhlů	62
8.8	Vyhodnocení mezních případů.....	62
8.8.1	Mezní úhel.....	62
8.8.2	Mezní rádius.....	62
8.9	Závěrečný zkušební test zahrnující reprezentanty všech typů korekcí.....	63



8.9.1	Postup závěrečného testu	65
8.9.2	Zhodnocení závěrečného testu	66
9	Uplatnění získaných výsledků	68
9.1	Návrh možností funkce technologického postprocesoru	68
10	Závěr.....	69



1 Přehled použitých zkratk a veličin

Zkratky:

CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CL data	Cutter Location data
CMT	Cold Metal Transfer
CNC	Computer Numeric Control
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
HM	Hybrid Manufacturing
HMI	Human-Machine Interface
LMD	Laser Metal Deposition
MIG/MAG	Metal Inert Gas/Metal Active Gas
PRT	Part soubor v Siemens NX
RCMT	Research Center for Manufacturing Technology
UDE	User Defined Events

Veličiny:

a	zrychlení [m/s^2]
b	šířka poličky [mm]
$d_{\text{drátu}}$	průměr drátu [mm]
f	posuv stroje [mm/min]
f_{radius}	posuv stroje v místě poloměru [mm/min]
h	výška poličky/vrstvy [mm]
K	korekce dynamického pulzu
o	poloha osy hořáku [mm]
$\text{přísun}_{\text{drátu}}$	přísun drátu do svarové lázně [m/min]
Q_s	plocha průřezu svarové housenky [mm^2]
Q_t	objem taveniny za čas [mm^3/s]
R	poloměr tolerované dráhy hořáku [mm]
r	poloměr teoretického průřezu svarové housenky [mm]
V	objem taveniny [mm^3]
α	úhel rohu v kontuře [$^\circ$]
λ_{ocel}	součinitel tepelné vodivosti ocele [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]
λ_{vzduch}	součinitel tepelné vodivosti vzduchu [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]



2 Úvod a cíle práce

Ústav výrobních strojů a zařízení (dále RCMT) spolupracuje se společností Kovosvit MAS, a.s. od roku 2014 na společném výzkumu a vývoji technologie vytváření dílců pomocí aditivního navařování metodou MIG/MAG a obrábění v jednom pracovním prostoru. Základ této technologie je patentován. Vývoj technologie ukázal náročnost vytvoření geometricky přesné kontury jednotlivých vrstev. Tato diplomová práce zkoumá možnost využít korekci polohy dráhy navařování a nastavení procesních parametrů elektrického oblouku pro spolehlivé zajištění objemu navařeného materiálu v celé kontuře, zejména v situacích, které vyžadují změnu množství přidávaného materiálu. Tyto situace nastávají v místech kontury, kde se nachází ostrý roh a navařovací hlava se tudíž pohybuje sníženou rychlostí. Již nyní je technologicky zvládnutá strategie bodového navařování, práce se bude tedy zabývat kontinuální svařovací strategií.

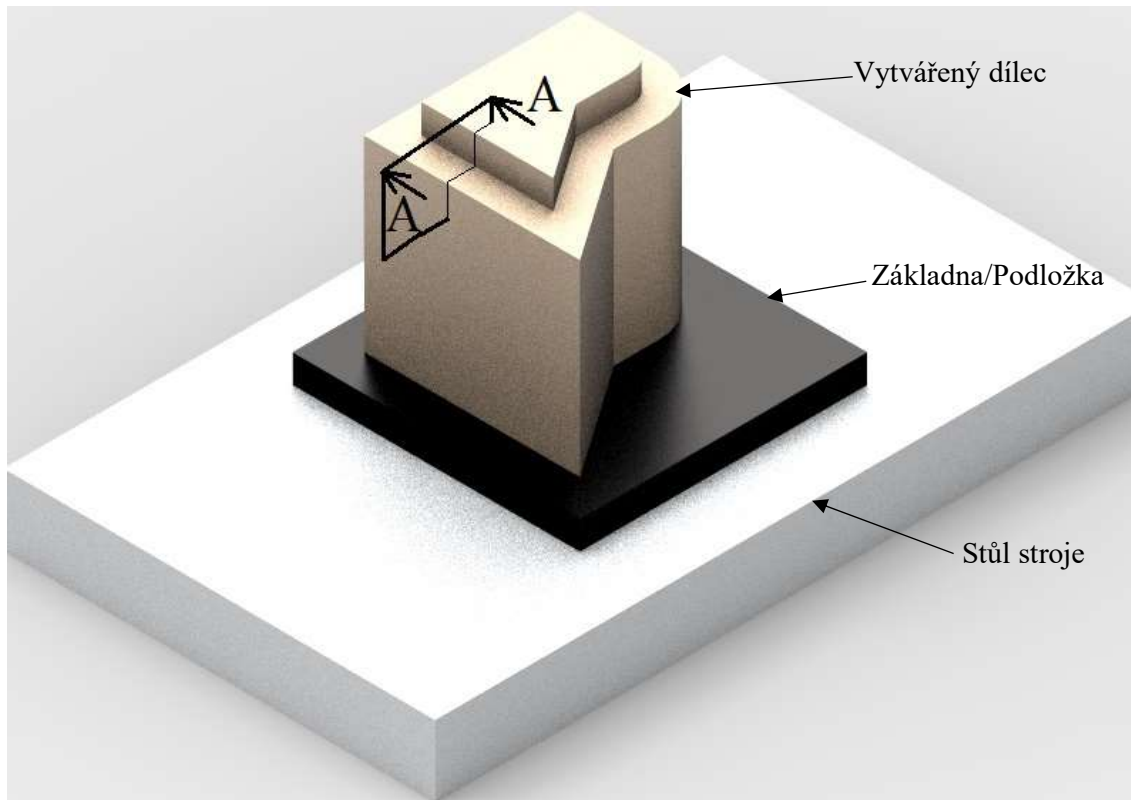
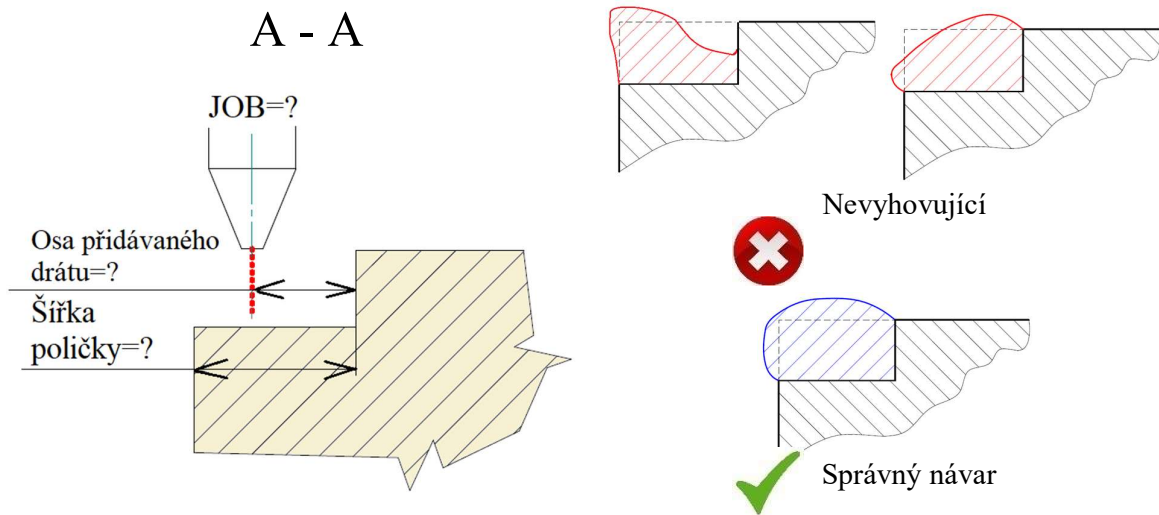
Jedním z problémů kontinuálního navařování je fakt, že zatím nelze řídit spojitě množství materiálu dodávaného navařováním na dílec. K dispozici je pouze konečné množství odladěných kombinací navařovacích parametrů čerpající z referenčních nastavení výrobce. Tyto odladěné kombinace svářečky se nazývají „JOBy“. Cílem diplomové práce bude navrhnout a experimentálně ověřit korekci dráhy navařovacího hořáku a sekvenci „JOBů“, která by byla technologicky vhodná pro kritická místa, jako jsou například ostré rohy. Výzkum a experimentální data by měly posloužit k návrhu technologické nástavby postprocesoru, který bude kompatibilní s modulem HM (Hybrid Manufacturing) vyvíjeném na fakultě jako rozšíření CAD/CAM softwaru Siemens NX.

Experimentální výzkum bude probíhat na speciálně upraveném stroji Bridgeport VMC 500 XP osazeném automatickou svářečkou Fronius CMT Advanced 4000R.

Vysvětlení řešeného problému

Využívaná hybridní technologie a hybridní stroj umožňují pomocí obrábění připravit přesnou geometrii povrchu před každou navařovací operací. Obrobený povrch umožňuje s maximální opakovatelností polohy návaru umisťovat materiál. Tohoto principu je možné s výhodou využít právě u kontur. Před každým navařováním kontury jsou přesně obrobeny plochy, na které je návar kontury umisťován. Takto je možné dosáhnout vždy stejného výsledku tvaru navařené kontury, *pokud v základových plochách nechybí materiál.*

Protože navařením jedné vrstvy „vyřádkováním“ vznikají na okraji vrstvy „schody“ po jednotlivých svarových housenkách vedle sebe, je vhodné okraj vrstvy vyfrézovat, čímž vznikne „polička“. Cílem výzkumu je najít optimální parametry pro návar kontury v oblasti poličky.



Obrázek 1 Náhled na řešený problém

3 Průmyslové techniky aditivní výroby dílců z kovových materiálů

3.1 Využití aditivní technologie v průmyslu

Je zřejmé, že aditivní technologie nemůže nyní ani v blízké budoucnosti zcela nahradit všechny ostatní konvenční metody jako slévání, tváření či obrábění. Nicméně aditivní výroba postupně zaujímá svou pozici mezi konvenčními metodami, oproti kterým má své výhody i nevýhody, tudíž je vždy nutné zvážit, který druh technologie je pro výrobu dílce optimální. [8]

Pro přehled přikládám tabulku, která shrnuje hlavní klady a zápory jednotlivých technologií.

	Slévání/Tváření	Obrábění	Aditivní technologie
Klady	- rychlá sériová výroba	- maximální přesnost - menší počáteční investice	- lze vyrobit téměř jakýkoliv tvar nebo i přidat hmotu k existujícímu dílci - netřeba forem či nástrojů
Zápory	- velká počáteční investice do přípravy výroby - složitost tvaru je limitována - jakost povrchu a přesnost je také limitována	- pro určité tvary je velký odpad materiálu - složité tvary, jako například přesné vnitřní kanálky jsou nevyrobitelné - některé materiály jsou velmi špatně obrobitelné	- nízká produktivita - drahý vstupní materiál v případě prášku - nedostupné CAD nástroje pro optimální návrh

Tabulka 1 Shrnutí technologií

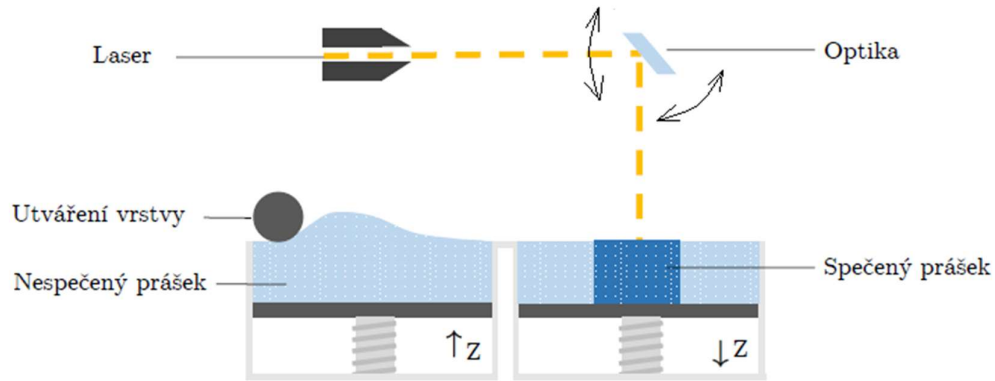
Závěrem lze shrnout, že hlavní uplatnění aditivní technologie je ve výrobě dílců velmi složitých tvarů nebo z těžko obrobitelných materiálů, také dílců nevhodných pro sériovou výrobu konvenčními metodami. Další uplatnění je možné i v opravě opotřebovaných dílců.

Aditivních metod výroby je celá řada, zde budou zmíněny pouze tři hlavní, které se týkají průmyslové výroby kovových dílců. [8]

3.1.1 Direct Metal Laser Sintering (DMLS)

Materiálem pro výrobu je kovový prášek, který je po vrstvách nanášen shrnovací lištou do pracovního prostoru a poté je ve vybraných místech spékán laserovým paprskem. Celý děj

probíhá buď v ochranné atmosféře nebo ve vakuu. Poté, co jsou dokončeny všechny vrstvy, dochází k otryskání nespečeného prášku (ten je možné použít na další dílec) a nakonec je třeba zařadit dokončovací operace, tzn. tryskání, broušení.



Obrázek 2 DMLS [8]

Tato metoda je vhodná pro velmi drahé dílce (například biomedicína), pro Rapid prototyping, dílce s vnitřními kanály nebo dílce s komplikovanou konstrukcí, protože je velmi drahá. Nicméně výsledný dílec má skvělou jakost.

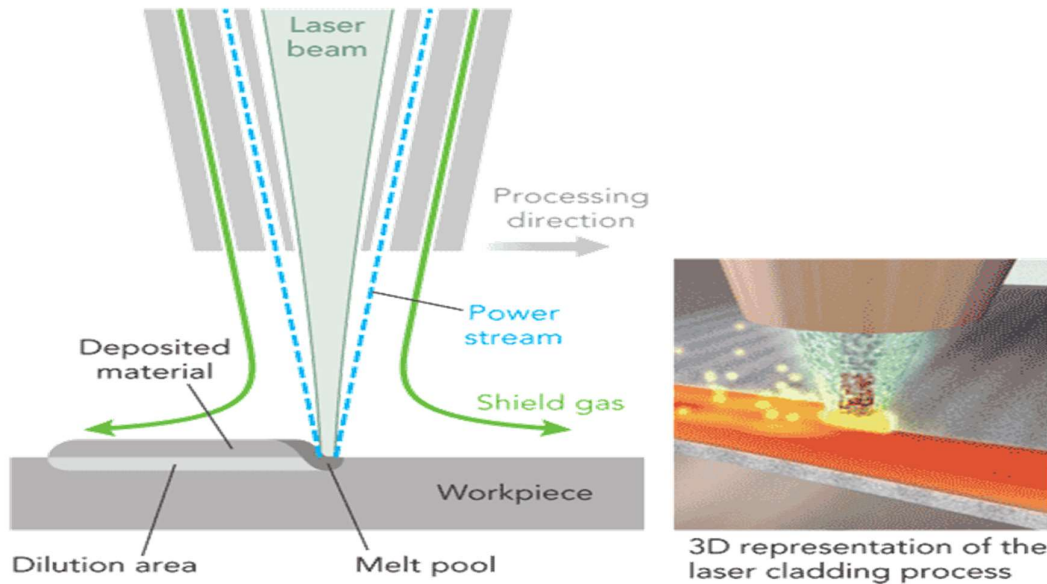
Strojem využívajícím tuto metodu výroby je například LASERTEC 30 SLM od firmy DMG Mori.



Obrázek 3 LASERTEC 30 SLM [12]

3.1.2 Laser Metal Deposition (LMD)

Na povrchu dílu vytvoří laser tavnou lázeň. Pomocí trysky se automaticky nanáší kovový prášek. Dohromady vznikají svarové housenky, které vytvářejí struktury na stávajícím dílcí.



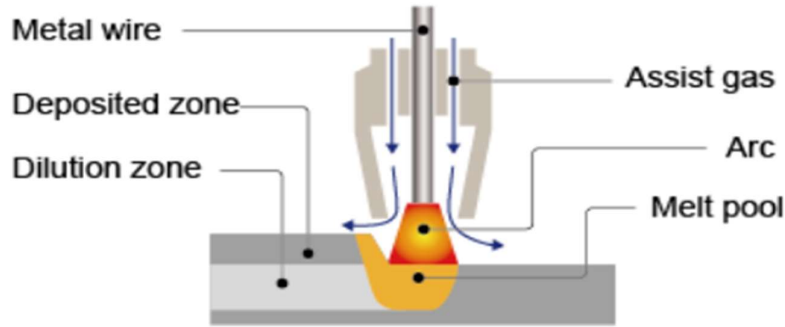
Obrázek 4 LMD [14]

Velikou výhodou metody LMD oproti metodě DMLS je větší rychlost výroby a tím i nižší cena. LMD je také mnohem univerzálnější, lze jím nejen vyrábět celé nové dílce, ale hlavně lze jen přidávat materiál na předpřipravený polotovár. Také je možné jej kombinovat s konvenčním obráběním. Tato kombinace se označuje jako tzn. Hybrid Manufacturing, dále jen „HM“.

Stroje pro Hybrid Manufacturing využívající metodu LMD vyrábí například firma MAZAK (INTERGEX i-400 AM) nebo opět DMG Mori (LASERTEC 65 3D Hybrid). Pouze aditivní stroj má na svědomí například TRUMPF (TrueLaser Cell 3000).

3.1.3 Navařování elektrickým obloukem

Aditivní navařování elektrickým obloukem lze použít v podobných případech jako laserovou metodu LMD. Jak je z názvu patrné, zdrojem energie je elektrický proud místo laserového paprsku. Nezanedbatelnou výhodou je vstupní materiál v podobě drátu, který je podstatně levnější a bezpečněji manipulovatelný než kovový prášek.



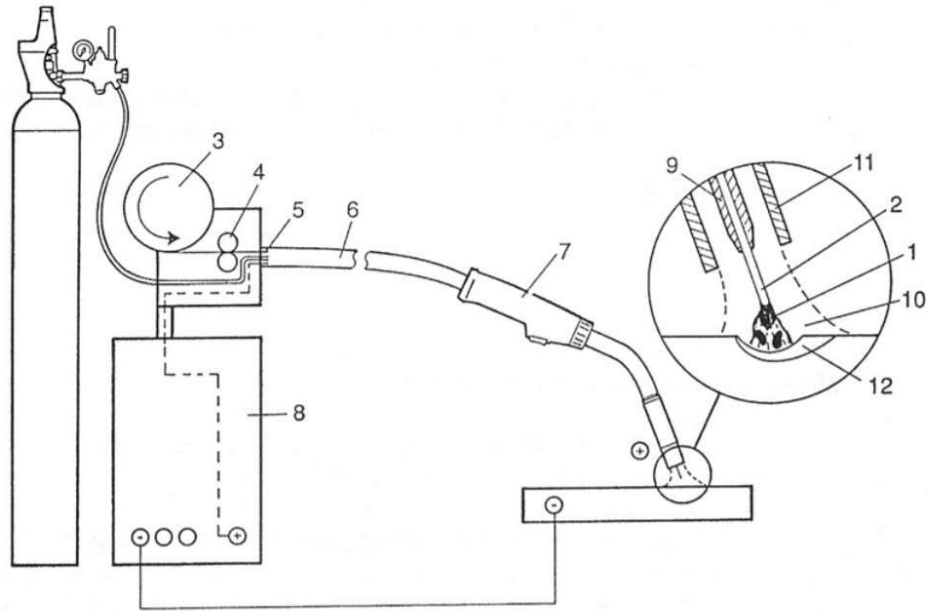
Metal wire melted by an electrical arc is deposited on base material

Obrázek 5 Navařování el. obloukem [14]

Na klasické navařování elektrickým obloukem se často používají průmyslové roboty (ABB, KUKA....) osazené svařovacími hlavici, které mají velký pracovní prostor. Rovněž zde nejsou kladeny nároky na tak vysokou přesnost. Nejrozšířenější metoda z oblasti navařování je metoda MIG/MAG.

MIG/MAG je metodou obloukového navařování v ochranné atmosféře s tavící se elektrodou. Jako ochranná atmosféra se používá buď inertní plyn (nejčastěji argon) pro MIG nebo aktivní plyn (většinou směs CO_2 a argonu). Drát, který je podáván do svařovacího hořáku, funguje jako tavná elektroda. Proud je přiveden do elektrody kontaktním svařovacím průvlakem. V místě, kde hoří elektrický oblouk, se elektroda v podobě drátu taví, a tím vzniká svařová lázeň. Plynová tryska soustředná s kontaktním svařovacím průvlakem udržuje okolo svařové lázně ochrannou atmosféru, která svar chrání před účinky okolí. [7]

Světoví výrobci svařovací metodu MIG/MAG ještě dále modifikují a vylepšují. Jednou z těchto modifikací je i metoda CMT od společnosti Fronius, o které se bude blíže pojednávat v kapitole 4.3.



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.

Obrázek 6 Schéma navařovací metody MIG/MAG [5]

Důležití výrobci

Světoví výrobci:

Lincoln Electric

Firma se sídlem v americkém státu Ohio se zaměřuje na výrobu svářecích zdrojů, hlav i ostatního příslušenství pro svařování. Kromě obloukového svařování dodávají i vybavení k plasmové technologii. Jejich výrobky jsou dodávány nejen do USA, ale i do Evropy a Asie.

Fronius

Fronius je rakouská firma. Jeden z výrobních závodů se nachází v Českém Krumlově, další výrobní závody jsou také v USA. Firma je rozdělena na 3 divize. Divize s názvem Perfect charging se zabývá dobíjením akumulátorů, divize Solar energy se zabývá fotovoltaikou. Pro účely rešerše je důležitá divize Perfect welding, která podobně jako Lincoln Electric vyrábí kompletní vybavení ke svařování.

Čeští výrobci:

Kühtreiber

Česká společnost, která se zabývá vývojem, výrobou a prodejem svařovací techniky a příslušenství.

Alfa In

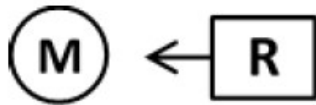
Společnost ALFA IN a.s. je tradičním českým výrobcem svařovacích strojů, plasmových řezacích strojů, transformátorů a plynových filtrů. Sídlo se nachází v průmyslové zóně Nová Ves.

Zástupců strojů z kategorie HM je na trhu zatím málo. Za zmínku stojí určitě Weldprint MCV 5X od Kovošvitu MAS a potom také Variaxis j-600 AM od firmy MAZAK.

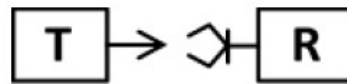
Automatizace navařování

Metoda svařování MIG/MAG nevytváří kolem svaru strusku, navíc drát je možné vést i z několik metrů vzdáleného zásobníku. Kvalita svarů je vysoká pro malé i větší tloušťky materiálu. Při adekvátním vybavení lze dosáhnout vysoké produktivity.

Všechny tyto fakty vedou k tomu, že výše popsaná metoda svařování je značně využívána a hodí se k automatizaci a robotizaci. Nejběžnější průmyslové využití zobrazují schémata na obrázcích 7 a 8 automatických pracovišť svařování. [6]



Obrázek 7 Svařovací robot a polohovací manipulátor [6]



Obrázek 8 Stabilní svařovací automat a polohovací robot [6]

3.1.4 Porovnání obloukové metody s konkurencí

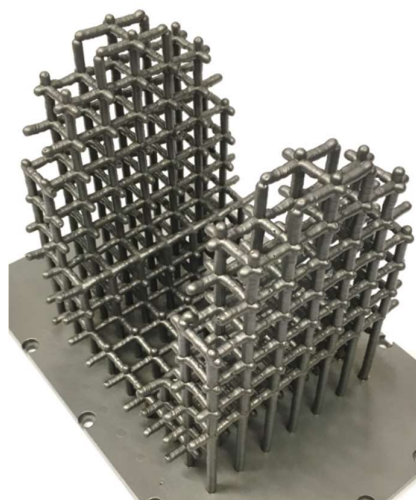
Přestože metoda DMLS je v určité míře průmyslově využívána, není na místě ji považovat za přímého konkurenta metody navařování elektrickým obloukem. Vysoká cena, pracnost výroby a zároveň dobrá přesnost a jakost povrchu bez následného obrábění určují metodě DMLS jiné pole působnosti na trhu.

Hlavním konkurentem je jistě metoda LMD. Jak obloukové navařování, tak LMD lze kombinovat s obráběním v jednom pracovním prostoru – pak hovoříme o HM. Cílem obloukové metody je nepochybně prorazit díky nižší ceně a větší rychlosti růstu materiálu. Dle analýz Kovosvit MAS, cenová úspora by mohla dosáhnout až 70%. Metodu LMD ovšem používají pro své hybridní stroje velcí výrobci jako MAZAK a DMG Mori, proto bude nutné značné úsilí ve vývoji, aby bylo možné těmto významným výrobcům zdárně konkurovat.

Zde je pro informaci přiložen náhled do letáku od Kovosvitu MAS, kde si čtenář může udělat lepší představu o tom, které typy dílců je vhodné hybridní technologií vyrábět.



Článek pásu obrněného vozidla



Podpurná struktura



Tenkostěnný dílec



Dílec s vnitřní strukturou

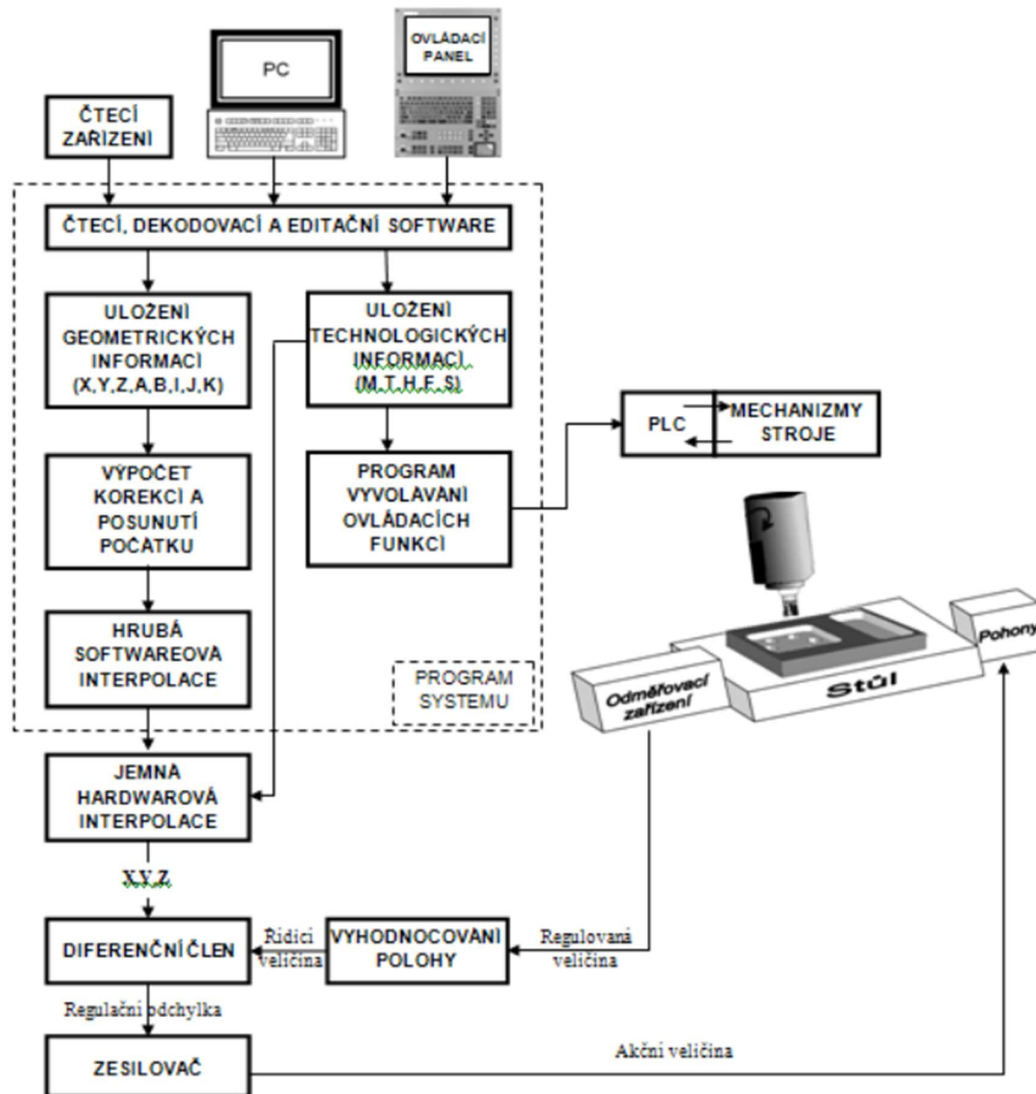
[Obrázek 9 HM dílce [13]]

3.2 CAM software pro aditivní navařování

3.2.1 CAM

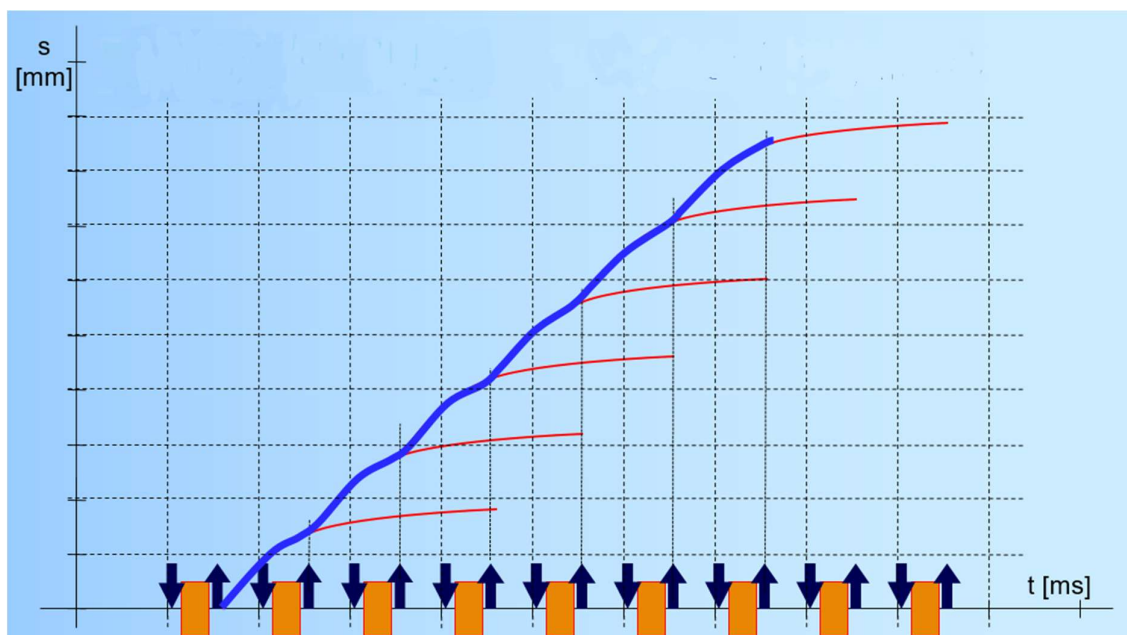
CNC stroj

Dráhové řízení strojů je v dnešní době realizováno výhradně pomocí CNC (Computerized Numerical Control). Princip jeho funkce je nejlépe názorný na blokovém schématu zobrazeném na obrázku 10. [11]



Obrázek 10 Schéma CNC [11]

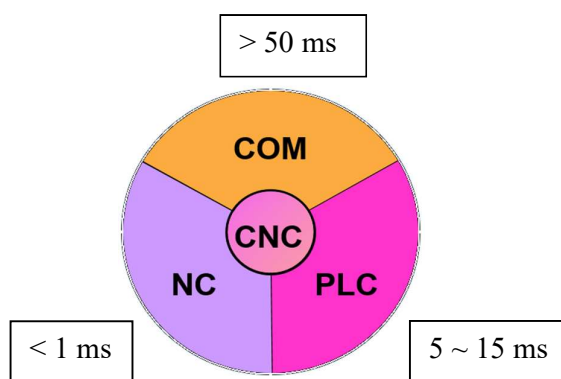
Podle zadaného programu počítač předává příkazy interpolátoru, který ve stanoveném taktu vypočítá a pošle příslušné impulzy do jednotlivých pohonů stroje. Správnost polohy je zajištěna zpětnovazební smyčkou za pomoci odměřování.



Obrázek 11 Interpolace polohy [9]

Na obrázku 11 vidíme interpolaci jedné osy v pevném taktu. Šipka vzhůru znamená vyslání impulsu do pohonu, oranžový obdélníček provádění interpolace a šipka dolů získání informace o stavu polohy osy.

Kromě interpolace polohy os je pro CNC stroj nezbytné také ovládání přídavných funkcí (například roztočení vřetene) a periferií (například zapnutí čerpadla pro pomocnou hydrauliku), což je zajištěno programovatelným logickým automatem – PLC. Dále je také nutná komunikace stroje s obsluhou. Toto rozhraní se nazývá COM nebo HMI. [9]



Obrázek 12 Subsystémy CNC s příslušným časováním [9]

Protože na řízení přídavných operací ani na komunikaci s obsluhou nejsou kladeny tak vysoké nároky na rychlost odezvy, je časování v těchto subsystémech CNC delší. Uvedené časy jsou orientační a liší se podle jednotlivých strojů a řídicích systémů.



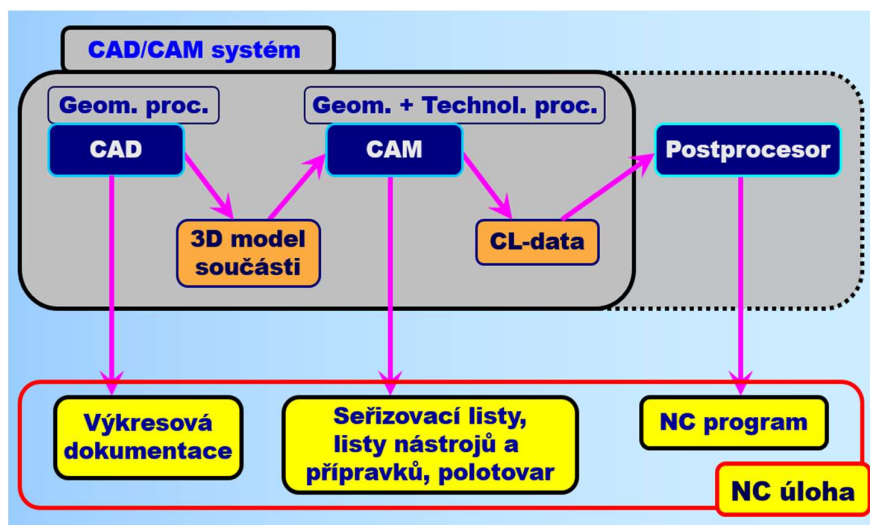
Způsob programování dráhy nástroje

Pro programování dráhy nástroje se používají standardizované programovací jazyky. Jazyk přesně popisuje dráhu nástroje, kinematické parametry, přídatné funkce apod. Je možné ho generovat pomocí softwaru CAM, který bude zmíněn v dalších odstavcích, nebo ho psát ručně ve formátu textového souboru. Není cílem této rešerše vysvětlovat a učit čtenáře některý z těchto jazyků. Standardní ISO kód je čitelný pro všechny řídicí systémy, ovšem každý řídicí systém má svá určitá specifika. Kód jen velmi málo odlišný od standardního ISO používají zejména řídicí systémy Fanuc a Siemens Sinumerik. Řídicí systém Heidenhain má navíc kromě ISO ještě svůj vlastní jazyk Dialog. Ten není principiálně tolik odlišný od ISO, ale příkazy jsou zde nazvány jinak. [9]

CAM software

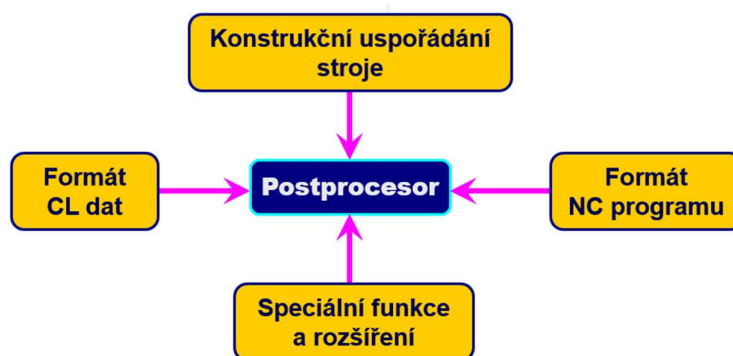
Přestože ruční psaní kódu pro dráhu nástroje je pro velice jednoduché součásti praktické, pro složitější dílce je velmi pracné a pro dílce vyráběné například 5-ti osým frézováním téměř nemožné. Většina dílců je vymodelována v 3D prostředí CAD softwaru. Tyto modely lze použít pro software CAM, který generuje dráhy nástroje podle požadavků uživatele. Standardní formát pro tyto data jsou CL data (Cutter Location). Ta vždy považují obrobek za statický a tudíž obsahují dráhu pohybujícího se nástroje. V CAMu navíc nastavíme i řezné parametry jako například otáčky, posuv a podobně. CL data obsahují pouze informace o poloze (x,y,z) a úhlu natočení nástroje v prostoru (α,β,γ) . Z praktických důvodů je však často potřeba znát i kontaktní bod mezi nástrojem a dílcem. Například Siemens NX tedy souhrn CL a dalších dat ukládá ve formátu PRT. [9]

Dalším důležitým krokem je převedení CL dat na NC kód pomocí postprocesoru.



Obrázek 13 Schéma přípravy NC kódu [9]

Postprocesor je v první řadě vlastně druh překladače, který překládá CL data na NC kód. Vstupními parametry pro tento překlad jsou požadované formáty CL dat i NC kódu a hlavně konstrukční uspořádání stroje. Pomocí transformačních matic se převádí například pohyb nástroje v osách x a y na pohyb křížových saní. O dost složitější situace potom nastávají u 5-tiosých operací, kde se například nachází dvě rotační osy na straně stolu (kolíbká). Při těchto operacích nejenže transformační matice bude obsahovat pravděpodobně složky do všech směrů, ale problematické jsou zejména různé přejezdy kritických míst a nejednoznačné polohy. [9]

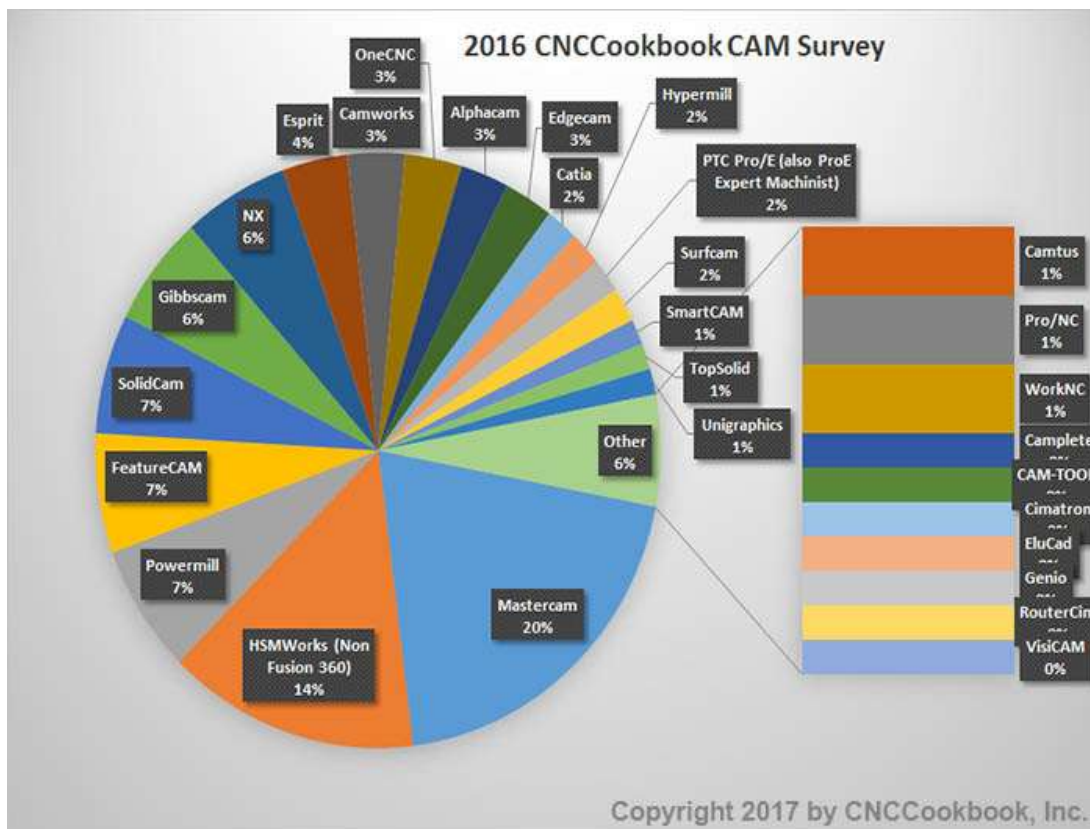


Obrázek 14 Schéma funkce postprocesoru [9]

Druhým, neméně důležitým účelem postprocesoru jsou různé přídavné a technologické funkce. Vhodným naprogramováním je možné v určitých místech řídit například posuv či spínání přídavných zařízení a periférií. [9]

3.2.2 Shrnutí nejdůležitějších dodavatelů a rozdělení trhu

Pro porovnání s vlastním povědomím o často používaných CAM softwarech byla ze zdroje [16] použita uživatelská anketa. Vzhledem k tomu, že není nezbytné znát přesné podmínky ankety ani není vhodné brát výsledky jako dogma, bude tento graf brán pouze orientačně.



Obrázek 15 Podíl CAM softwarů u uživatelů [16]

CAM	Společnost
NX	Siemens
Catia	Dassault Systèmes
Gibbscam	
Powermill	Autodesk
FeatureCam	
HSMWorks	
Mastercam	CNC Software
Alphacam	Vero Software
Edgecam	

Tabulka 2 Společnosti produkujející CAM software



Spolupráce firem v oblasti vývoje CAM pro aditivní technologii

1) *DMG Mori + Siemens NX*

Společnost DMG Mori byla již zmíněna v kapitole 3.1 jako jeden z předních výrobců strojů pro aditivní technologii LMD, kterou kombinuje s obráběním ve stejném pracovním prostoru, tedy se jedná o stroje pro hybridní technologii. Není překvapivé, že DMG Mori navázalo spolupráci s vývojáři Siemens NX, aby pro své zákazníky zajistili softwarovou a zejména CAM podporu svých hybridních strojů.

Podle Siemensu má tento software mnoho pokročilých a užitečných funkcí, jako jsou topologická optimalizace součástí, tvorba podpůrných struktur při 3D tisku, simulace růstu vrstev a další softwarové vychytávky. Podrobnější informace se dají vyčíst například v [17]. Tento software je dostupný ve výzkumném ústavu, o jeho funkcích týkajících se řešení diplomové práce se bude prakticky pojednávat v následující kapitole 3.2.3.

2) *MAZAK + EdgeCam*

Podobně jako DMG Mori je MAZAK jedním z předních výrobců hybridních strojů. CAM softwarovou podporu stroje zřejmě zajišťuje společnost Vero Software, přičemž vyvíjí nejspíše podobný modul jako Siemens, ovšem ten by měl být součástí Edgecam. Tyto informace nelze považovat za zcela spolehlivé. Různé zmínky se dají dočíst v článku [18].

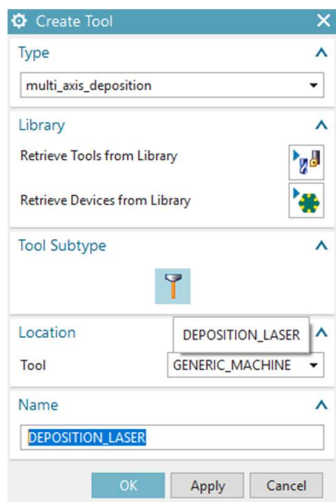
3) *MasterCam + CAMufacturing solutions*

Další zajímavým softwarem je APLUS od CAMufacturing solutions. Na svých internetových stránkách [15] uvádějí, že spolupracují s univerzitou ve Windsoru. V propagačním článku [19] je funkce softwaru krátce popsána, navíc je popis doplněn obrázky.

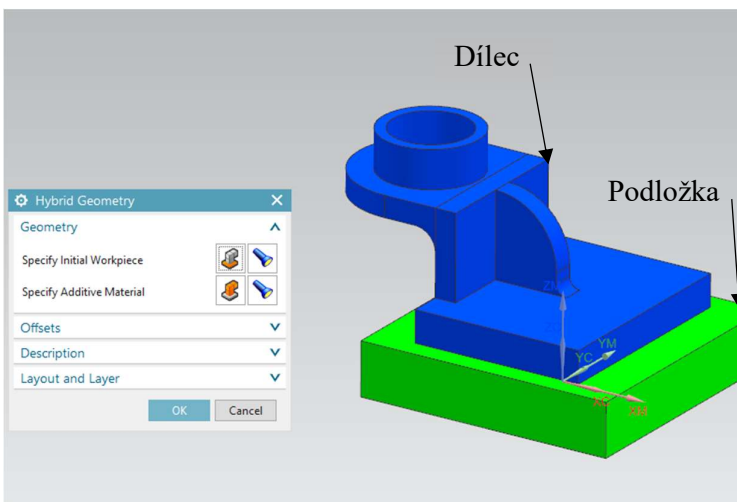
Přestože jsem pomocí e-mailu a sociální sítě Facebook kontaktoval společnosti Autodesk a Dassault Systèmes s tím, jestli také vyvíjejí aditivní funkce do svých CAM softwarů, odpovědi jsem se nedočkal. Není tedy možné zhodnotit žádný z CAMů kromě Siemens NX.

3.2.3 Specifikace aditivního modulu v softwaru Siemens NX

Funkce aditivní technologie je zabudována přímo do CAM části NX. Aditivní funkce se drží podobného principu jako funkce pro obrábění. Stejně jako se pro obrábění definuje nástroj fréza, tak pro aditivní operaci se volí jako nástroj Deposition Laser (metoda LMD, uvedena v kapitole 3.1.2) – viz obrázek 16. Dále je nutné definovat geometrii, což znamená vybrat, která část objektu je podložka a která část objektu je dílec. Definice geometrie je na obrázku 17.

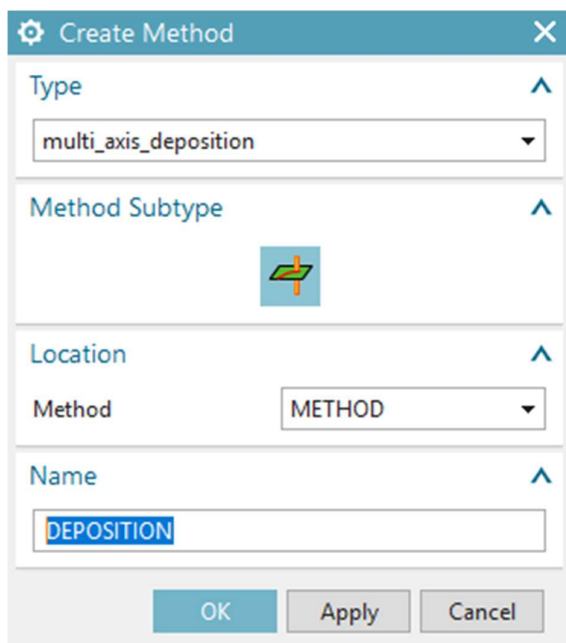


Obrázek 16 Volba nástroje - laser

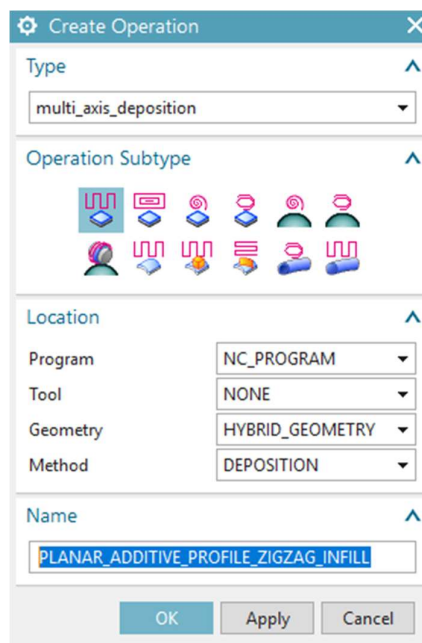


Obrázek 17 Definice geometrie

Aditivní operace jsou společně definovány metodou, jež se nazývá Deposition. Dialogové okno s výběrem metody je na obrázku 18. Po rozklopení je na výběr celá řada aditivních operací – viz obrázek 19.

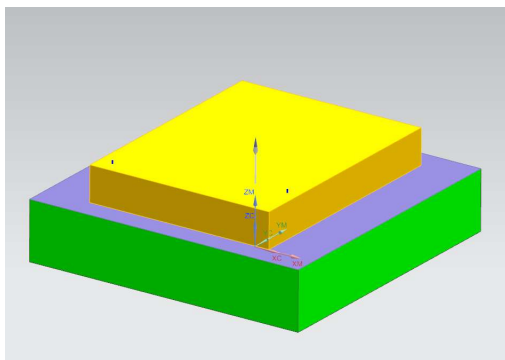


Obrázek 18 Dialogové okno metody

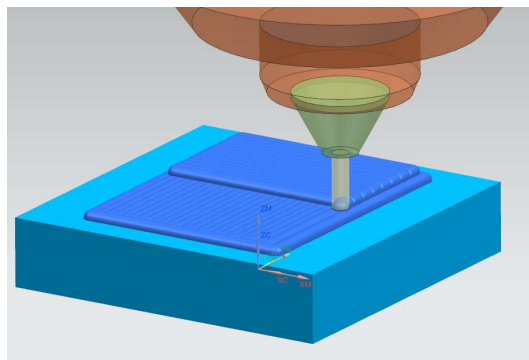


Obrázek 19 Výběr operace

Mezi operacemi stojí za zmínku například Zig Zag, Follow Part. Jejich princip je převzatý z frézovacích operací. Dále je důležitým typem operace Thin Wall, vhodná pro tvorbu tenkých stěn a dutých dílců. V poslední řadě zde ještě existují rotační operace, kde musí technolog rozdělit vytvářený dílec na technologické části, jak se budou postupně vyrábět. Editace konkrétní operace vypadá opět obdobně jako u frézování, jen se zde místo strojních parametrů (otáček vřetene, hloubka řezu apod.) nastavují parametry pro aditivní laserovou technologii. Po kliknutí na „generate“ se vytvoří část dílce žlutou barvou, která vznikla danou operací, obrázek 20.



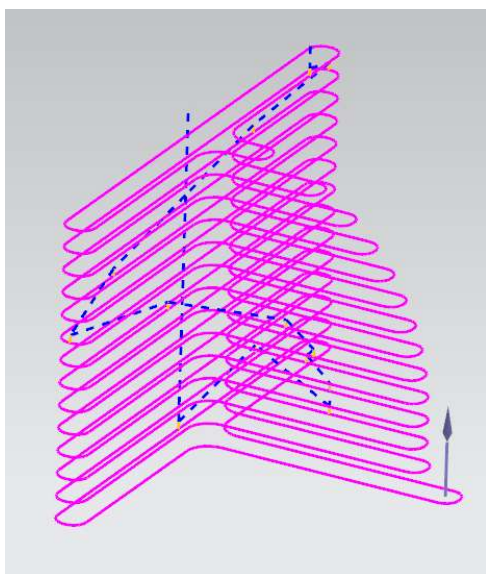
Obrázek 20 Objem vytvořený jednou operací



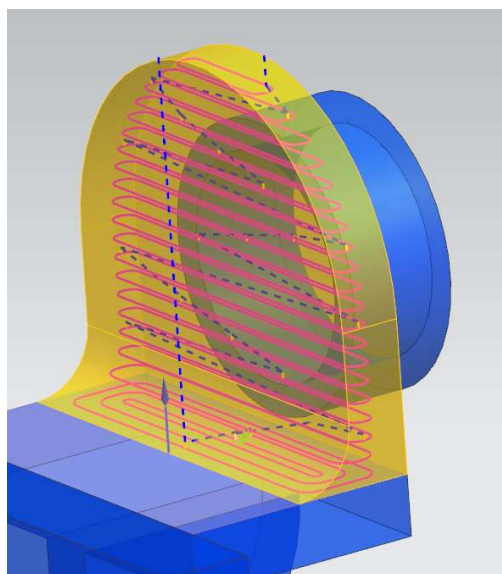
Obrázek 21 Vizualizace tvorby housenek

Celý technologický sled operací lze verifikovat. Při verifikaci je k vidění vizualizace tvorby jednotlivých navařených housenek, což je ukázáno na obrázku 21.

Nejpříhodněji operací Follow Part se posléze vygenerují dráhy pro další dvě části vytvářeného dílce. Vygenerované dráhy jsou zobrazeny na obrázku 22 a 23.

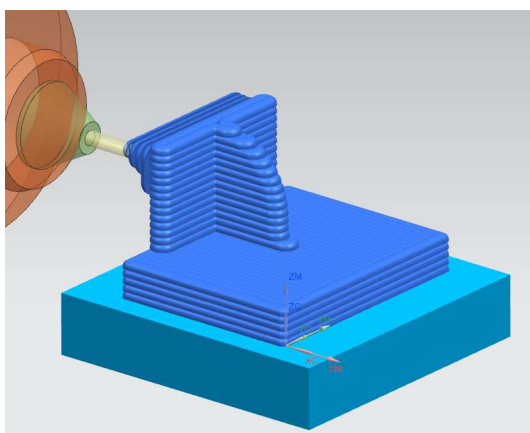


Obrázek 22 Dráhy druhé operace

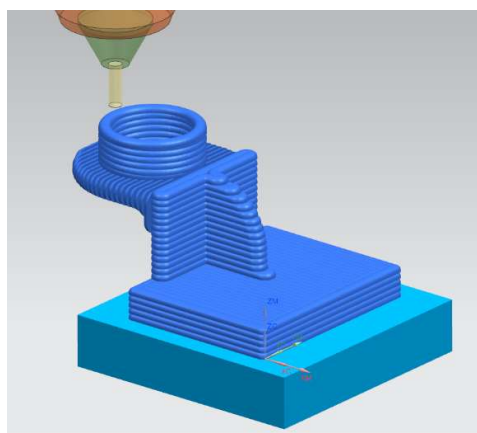


Obrázek 23 Dráhy třetí operace

Poslední operací Thin Wall bude vytvořen nákrůžek. Verifikační vizualizace celého procesu je vidět na obrázcích 24 a 25.



Obrázek 24 Vizualizace postupné tvorby dílce



Obrázek 25 Vizualizace hotového dílce



V této kapitole byly krátce popsány funkce aditivního modulu v CAMu Siemens NX. Největší předností softwaru je možnost propojit v jednom virtuálním prostředí aditivní technologii s obráběním, protože objemy vytvořené aditivními operacemi jsou funkční tělesa, která se dají použít pro definici dalších operací.

Přestože software je robustní, byl primárně vytvořen pro aditivní metodu LMD a ne pro obloukové navařování. Problémy, jimiž se zabývá diplomová práce, nejsou v softwaru zatím podchyceny, ale pokud se podaří uspokojivě navrhnout korekce hořáku dle experimentů, neměl by být pro zkušeného programátora problém někdy později software na základě těchto znalostí rozšířit.

4 Technické podmínky pro vývoj korekcí

Následující kapitola pojednává o specifickém technickém vybavení použitém pro experimenty. Popis tohoto vybavení je zdokumentován v interních zprávách RCMT.

4.1 Specifikace stroje

Experimentální část výzkumu je provedena na hybridním stroji. Tím strojem je vertikální tříosá CNC frézka Bridgeport VMC 500 XP s řídicím systémem Heidenhain iTNC 530 (340 420), vybavená obloukovým agregátem Fronius a navařovacím hořákem. Oproti parametrům základního neupraveného (nehybridního) stroje je na upraveném testovacím stroji citelně zmenšen pracovní prostor. Důvodem je to, že svařovací hořák i nástroj ve vřetenu musí fungovat ve stejném pracovním prostoru. Finální pracovní prostor pro hybridní výrobu je tedy pouze průnikem dvou větších pracovních prostorů (samostatné frézování a samostatné navařování). Tento výsledný prostor je 200 mm v ose X, 300 mm v ose Y a 480 mm v ose Z. Ostatní parametry zůstaly zachovány. Princip fungování tohoto hybridního stroje lze částečně připodobnit k pracovišti na obrázku 7 v kapitole 3.1.3, bereme-li dvouosé křížové saně (x,y) jako polohovací manipulátor a hořák pohybující se ve třetí ose (z) jako svařovací robot.[6]

Název parametru	Hodnota	Název parametru	Hodnota
Řídicí systém	iTNC 530 (340 420)	Max. hmotnost dílce	500 kg
Pojezd v X	200 mm	Počet nástrojů	16
Pojezd v Y	300 mm	Max. otáčky vřetene	6000 ot/min
Pojezd v Z	480 mm	Příkon na vřetení	7.5 kw
Rychloposuv X a Y	43000 mm/min	Celkový příkon	15 Kva
Rychloposuv Z	20000 mm/min	Hmotnost stroje	2600 kg
Rozměry stolu	840 x 360 mm	Rozměry stroje	2300x2100x2290mm

Tabulka 3 Parametry CNC stroje



Obrázek 26 Zkušební stroj pro HM v laboratořích RCMT

4.2 Příslušenství instalované na stroji

Na obrázcích 27, 28 a 29 je k nahlédnutí kompletní svařovací příslušenství od firmy Fronius, které je instalováno na zkušebním stroji Bridgeport.

CMT Advanced 4000R



Obrázek 27 Svařovací agregát [10]

RCU5000i



Obrázek 28 Řídicí panel [10]

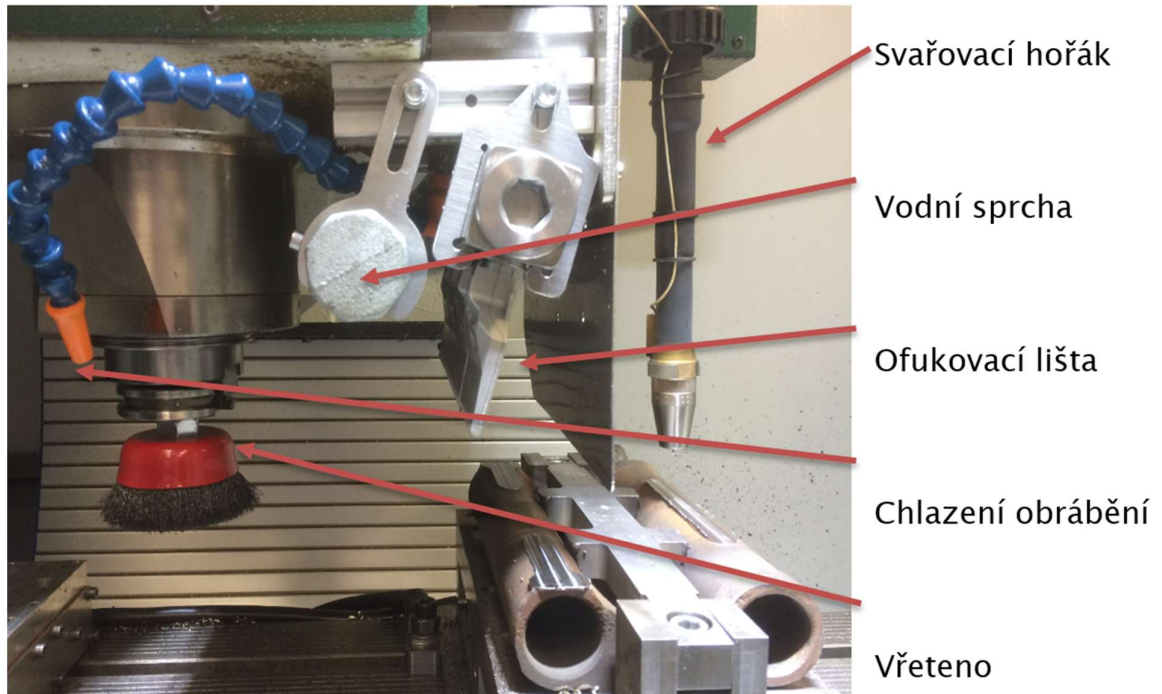
VR7000_CMT



Obrázek 29 Podavač drátu [10]



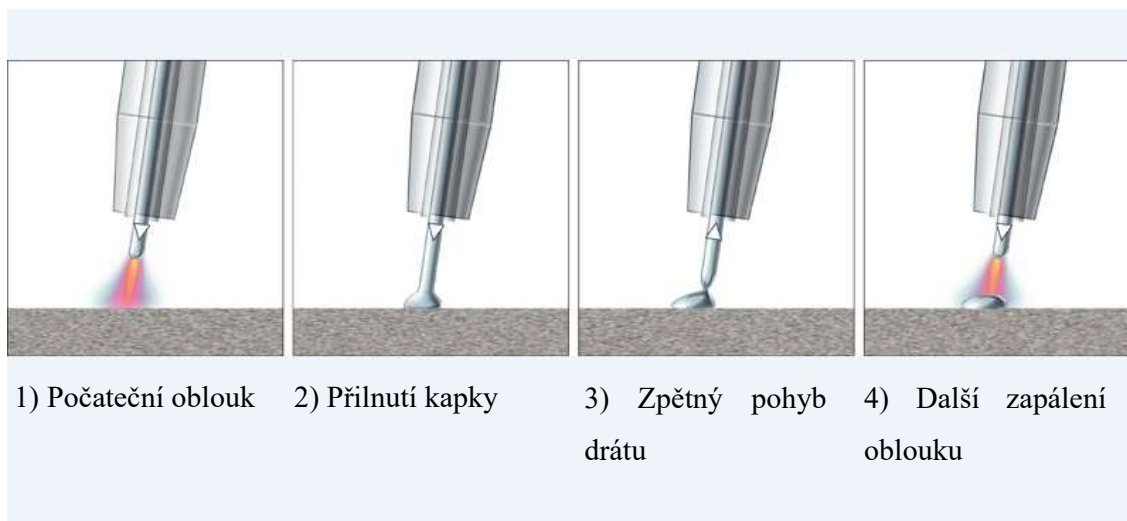
Tyto svařovací komponenty se běžně používají jako příslušenství k robotu se sériovou kinematickou strukturou, ale v laboratořích RCMT se podařilo nainstalovat toto příslušenství na konvenční obráběcí stroj, čímž vznikl hybridní stroj vhodný na technologické a jiné testy. Na obrázku 30 je vidět realizace upevnění hořáku ve stroji. Svařovací hořák je z boku připevněn k vřeteníku.



Obrázek 30 Umístění svařovacího hořáku

4.3 Metoda CMT

Byla vyvinuta primárně pro účely svařování hliníku s ocelí, nicméně její vlastnosti mají uplatnění v mnoha dalších aplikacích. Princip stojí na vysoké frekvenci zpětného zatahování drátu. Tím dochází k přenosu materiálu ve formě drobných kapek, které smáčí základní materiál. Protože při dopadu kapky na základní materiál chvilkově neprochází svarem elektrický proud, nazývá se metoda Cold Metal Transfer. Jak je uvedeno v knize [1], k přenosu taveniny pro svařovací technologii MIG/MAG dochází ve formě větších kapek. Při metodě CMT jsou kapky tvořeny sice trochu jiným způsobem, jak je vidět na obrázku 31 v kapitole 4.3, ale kvůli vysoké frekvenci kmitání hořáku je v porovnání s relativně malou rychlostí posuvu hořáku přenos taveniny spojitý a jednotlivé kapky nejsou na výsledné svarové housence patrné. Následující sekvence obrázků označená číslem 31 znázorňuje sekvenci tvorby jedné kapky u CMT svařování.



Obrázek 31 Princip CMT [10]

Hlavním důvodem použití svařovací metody CMT v hybridním navařovacím stroji je mnohem menší teplotní ovlivnění základního dílce než při běžné konvenční MIG/MAG metodě. Díky tomu je možné postupně vyvařovat tenkostěnné struktury o mnoha vrstvách, aniž by hrozilo roztavení předchozích nanesených vrstev.



4.4 Popis funkce svařovacího agregátu a parametry elektrického oblouku

Svařovací agregát lze nastavovat a ovládat buď pomocí řídicího panelu nebo přes připojený počítač pomocí softwaru Fronius Explorer. Agregát komunikuje se strojem po sběrnici AB Profibus Fronius. Kompletní uživatelský manuál lze stáhnout na internetových stránkách fronius.com [20]. Vzhledem k tomu, že tento manuál má 208 stran, není příhodné popisovat možnosti a funkce svařovacího agregátu do přílišných detailů. Bude zde uveden pouze základní princip funkcí a jak jsem je používal pro experimenty.

Paměť zdroje má jeden tisíc pozic pro ukládání specifických uživatelských nastavení svářecího procesu. Tyto nastavení se nazývají JOBy. Jako první je třeba nastavit vstupní materiál. Ten se vkládá jako cívka drátu. Do nastavení je třeba zadat průměr drátu a označení kovu, ze kterého je drát tvořen. Další důležitý parametr je svařovací reference. Protože přesná specifikace CMT svářecího procesu je složitá a obsáhlá, volba určité výrobcem ozkoušené reference dovoluje uživateli bez podrobných znalostí rozumně používat svařovací agregát. Po zvolení reference je možné měnit určité parametry, přičemž přesný kmitavý pohyb hořáku, napětí a proud jsou automaticky dopočítány z reference. Pro tento výzkum je vhodné uvažovat o referencích CMT1355, CMT1360 a CMT1370.

Parametry agregátu, které budou pro účely výzkumu proměnné, jsou dva. Přísun drátu a korekce dynamického pulzu. Jejich vliv na svarovou housenku je blíže vysvětlen v kapitole 7.1. Při jejich volbě se svařovací napětí a proud dopočítávají automaticky, proto není volba těchto dvou zásadních parametrů svařování dále diskutována.

5 Dosavadní výsledky experimentů a jejich nedostatky

Diplomová práce bude navazovat na výzkum prováděný v RCMT. Jako podklady pro tuto kapitolu slouží interní dokumenty RCMT, které nejsou volně dostupné. Cílem diplomové práce bude zejména to, aby bylo možné efektivně vytvářet objemové dílce s libovolnou vnější konturou. Pro navařování se používají dva různé principy. Těmi jsou bodovací metoda a kontinuální metoda.

1) *Bodovací metoda*

Principem bodovací metody je nanášení definovaného objemu materiálu na určené místo – bod. Velikost naneseného objemu (kapka) se odvíjí od nastavení svařovacího JOBu. Celá navařovaná vrstva se pak skládá z množství těchto kapek vedle sebe. Bodovací metoda je výhodná díky velmi malému teplotnímu ovlivnění dílce, známému výslednému tvaru kontury a také možnosti nanášet další vrstvu pod úhlem jiným než 90° . Její hlavní nevýhodou je prodloužení doby tisku dílce. Z tohoto důvodu je bodovací metoda využívána spíše pro tvorbu tenkostěnných prvků a ne pro objemové dílce.

2) *Kontinuální metoda*

Při kontinuální metodě je plynule nanášen materiál po definované trajektorii, čímž vzniká svarová housenka. Přestože kontinuální navařování je velmi produktivní, kromě zvýšení množství vneseného tepla do dílce se potýká ještě s dalšími technologickými problémy.

Oblast začátku a konce svarové housenky:



Obrázek 32 Oblast začátku a konce svarové housenky

Tento jev je způsoben nedokonalým nastavením zahájení svařování a ukončení oblouku. Tyto počáteční a ukončovací parametry jsou v současné době přednastaveny výrobcem (Fronius). Lze předpokládat, že v budoucnu se tyto oblasti podaří minimalizovat, ale nejspíš jen za určitých podmínek. Problém s nesterjností svarové housenky je velmi patrný na vyvařeném vzorku kvádrů. Na obrázku 33 je vyvařený kvádr vidět ze strany. Velmi patrný

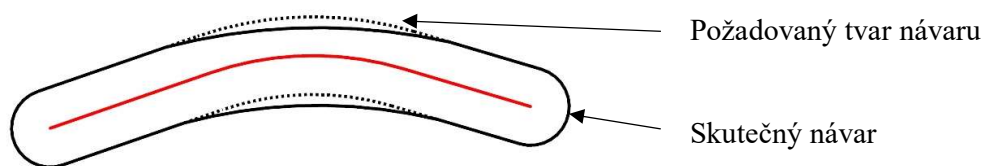
je jev znázorněný na obrázku 32. To vede k závěru, že pro zachování rovnoměrného přírůstku vrstev je vhodné zařadit po každé navařené vrstvě zarovnávací frézování.



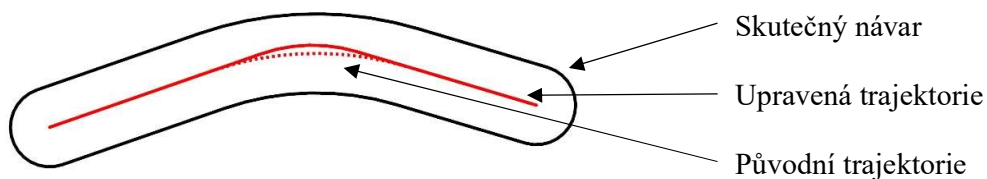
Obrázek 33 Vyvařený vzorek kvádrů

Odchýlení tvaru návaru v zařivené oblasti:

Další známou komplikací je to, že při menších poloměrech kontury se svarová housenka tvoří mohutněji z vnitřní strany oblouku než z vnější, jak je znázorněno na obrázku 34. Předmětem dalšího výzkumu a testu by mělo být korigování dráhy hořáku, tak aby se housenka tvořila správně – viz. obrázek 35. V diplomové práci se však tento problém blíže zkoumat nebude.



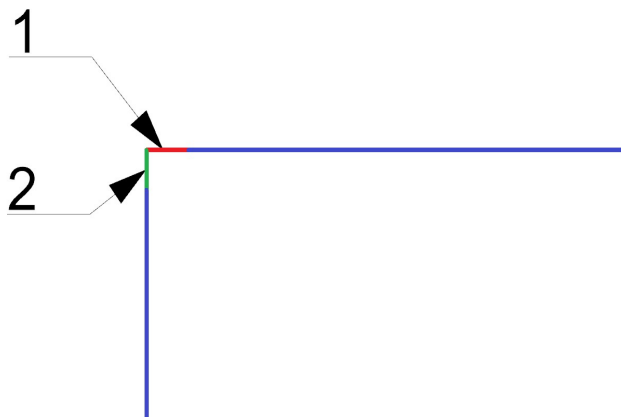
Obrázek 34 Nerovnoměrná tvorba svarové housenky



Obrázek 35 Korigovaná dráha hořáku

Ostrý roh

Pokud hořák navařuje konturu obsahující ostrý roh, neplatí pouze logický předpoklad, že by se v rohu tvořila kontura s rádiusem odpovídajícím tloušťce svarové housenky, ale výsledky jsou spíše ještě více nepříznivé. Již výzkumná zpráva [18] popisující částečně tento problém navrhuje řešení v podobě úpravy svařovacích parametrů poblíž rohu. Myšlenka je znázorněna na obrázku 36.



Obrázek 36 Myšlenka korekce svařovacích parametrů v rohu kontury

Výzkum a řešení tohoto problému je jednou z hlavních částí diplomové práce.

Navařování objemových dílců

Stejně jako u tenkostěnných dílců i objemové dílce se navařují po jednotlivých vrstvách. Pro tvorbu jedné vrstvy je nezbytné zvolit strategii, jak budou jednotlivé housenky pokládány vedle sebe, aby vytvořily plochu. Ve výzkumném ústavu RCMT byly testovány různé strategie pro tvorbu jedné plošné vrstvy. Tyto strategie principiálně vycházejí z frézovacích strategií, což v některých případech není vhodné. Zdokumentováno bylo 6 testů jednotlivých strategií a výsledky jsou vidět na následujících obrázcích 37 až 42.



Obrázek 37 Metoda 1 - řádkování



Obrázek 38 Metoda 2 - follow part inside kontinual



Obrázek 39 Metoda 3 - follow part outside



Obrázek 40 Metoda 4 - řádkování s konturou



Obrázek 41 Metoda 5 - follow part



Obrázek 42 Metoda 6 - follow part inside kontinual

Jako nejvhodnější pro navaření plochy vrstvy byla vyhodnocena první strategie „řádkování“, vyfocená na obrázku 37. Hlavním důvodem je to, že po odladění procesu neobsahuje chyby uvnitř plochy, ale pouze na vnější kontuře. Podobné lze říci i o čtvrté testované strategii, ale ta byla zavrhnuta z důvodu velmi velkého množství materiálu navíc na vnější kontuře, jak je vidět na obrázku 40. Volbou strategie „řádkování“ tedy vznikl požadavek řešit u vrstvy

problematickou vnější konturu. Vnější kontura může obsahovat nejen rádiusy, ale cílem práce je odladit proces i pro tvorbu ostrých rohů, tak aby byl technologický přídavek pro finalizaci dílce co nejmenší.

Předchozí experimenty pro navařování kontury na přímém úseku

Již před zadáním diplomové práce byly v laboratořích RCMT prováděny testy, kde se řešil problém navařování v přímém úseku kontury na „poličku.“ Tyto experimenty slouží jako zdroj užitečných počátečních informací pro výzkum v diplomové práci. Na obrázcích 43 a 44 je vyfocen jeden experimentální vzorek, jehož výsledný návar je nevyhovující.



Obrázek 43 Návar



Obrázek 44 Obrobené hrany

Použitý CAM software pro hybridní technologii

V kapitole 3.2 bylo shrnuto, že pro řešení zadaného problému zatím není k dispozici CAM software, který by plně dostačoval všem nárokům, kladeným hybridní technologií využívající navařování elektrickým obloukem.

V RCMT je pro tyto účely vyvíjen specifický modul do Siemens NX, který je zatím pojmenován jednoduše HM modul. Hlavním tvůrcem tohoto softwarového modulu je Ing. Tomáš Fornůsek, který mě naučil používat tento software a radil mi v průběhu akademického roku s veškerým výzkumem. HM modul je koncipován jako rozšíření základního NX pomocí UDE (User Defined Events). Jeho funkce a zároveň návod k instalaci a používání jsou popsány v manuálu pro Kovosvit MAS, na jehož tvorbě jsem se částečně také podílel. [4]

6 Výpočet vlivu geometrických a kinematických parametrů na svarovou housenku

V této kapitole je představen autorův návrh popisu umístování navařeného objemu pomocí zjednodušeného matematického popisu. Tento popis se užívá pro následný návrh korekcí a vizualizaci.

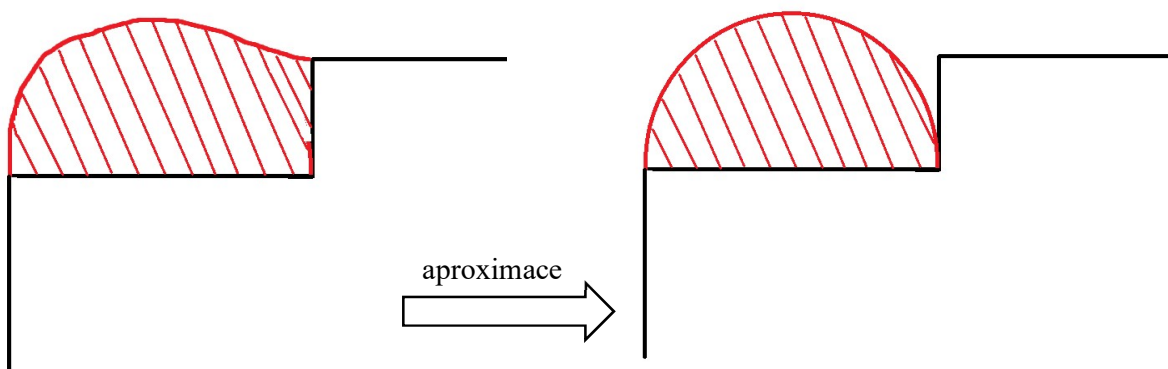
6.1 Popis návrhu výpočtů

Jednoduchý matematický model pro simulaci tvorby svarové housenky by měl být schopen dávat informace o geometrii svarové housenky v závislosti na čase a dráze hořáku. Jako vstupní data slouží jednotlivé parametry svařovacího zdroje a také kinematické parametry stroje. Vzhledem k tomu, že model je pouze geometricko – kinematický, uvažovanými parametry svařovacího zdroje budou pouze příslus drátu a průměr tohoto drátu. Napětí, proud a jiné „elektrické“ parametry do modelu zahrnuty nejsou.

Co se týče kinematických parametrů stroje, nejpodstatnějším parametrem je rychlost posuvu hořáku. V případě ostrého rohu je dále potřeba znát úhel v tomto rohu, zrychlení os stroje a toleranci dráhy v dráhovém řízení. Je sice možné nastavit, že stroj projede dráhu rohu přesně (na okamžik však v rohu vlastně zastaví), běžněji je definován velmi malý rádius, který usnadní práci pohonům stroje a zajistí plynulejší průjezd.

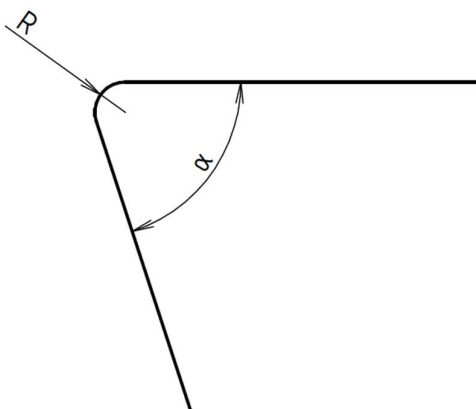
Není nezbytné určovat v této části práce naprosto přesný tvar průřezu svarové housenky, protože výpočetní model bude sloužit pouze pro návrh experimentů. Proto byl zvolen tvar půlkruhu jako zjednodušená aproximace skutečného tvaru průřezu svarové housenky.

Na obrázku 45 je znázorněn uvažovaný model průřezu svarové housenky.



Obrázek 45 Aproximace tvaru průřezu svarové housenky

Na obrázku 46 je vidět tolerovaná dráha průjezdu ostrého rohu.



Obrázek 46 Tolerovaná dráha průjezdu ostrého rohu

6.2 Získání kinematických parametrů stroje

Zatímco rychlost posuvu hořáku lze editovat v CAMu nebo přímo v NC kódu, zrychlení jednotlivých os a tolerovaný rádius je nutné zjistit jako strojní parametry v řídicím systému stroje. Pro řídicí systém Heidenhain iTNC 530 lze vyčíst z manuálu [15], že maximální zrychlení je uloženo v paměti stroje pod parametrem MP1060.x, tento parametr je u použitého stroje Bridgeport 2 m/s^2 pro všechny jeho tři osy x,y,z. Tolerance v rohu je nastavena na rádius 0,02 mm při pracovním posuvu. Tento údaj je uložen pod parametrem MP1096.

6.3 Návrh popisu aproximace

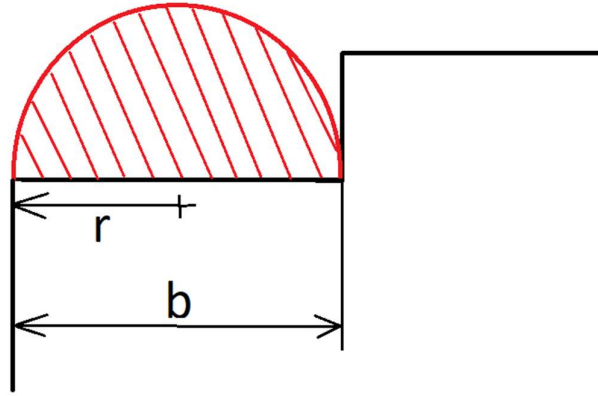
Pro simulaci tvorby housenky je nutné zavést pomocné výpočetní parametry. Nejprve se určí objem dodávaného materiálu (ve formě drátu), který je značen Q_t [mm^3/s]. Tato veličina je pro daný svařovací JOB konstatní.

$$Q_t = \frac{\pi \cdot d_{\text{drátu}}^2}{4} \cdot \text{přísun}_{\text{drátu}}$$

Dále je zaveden aktuální průřez svarové housenky Q_s [mm^2]. Vzorec vychází z rovnice kontinuity. Objem dodávaného materiálu je podělen aktuální rychlostí posuvu hořáku.

$$Q_s = \frac{Q_t}{f} \quad \left[\frac{\frac{\text{mm}^3}{\text{s}}}{\frac{\text{mm}}{\text{s}}} = \text{mm}^2 \right]$$

Protože v lineárním úseku je rychlost posuvu f konstantní, je pak konstantní i průřez Q_s . Z aproximovaného tvaru průřezu housenky je patrné, že pro zvolenou šířku poličky b [mm] platí v optimálním případě $r_{housenky} = \frac{b}{2}$ [mm].



Obrázek 47 Vyznačení rozměrů na průřezu svarové housenky

Q_s je brán zjednodušeně jako půlkruh, potom platí $Q_s = \frac{\pi \cdot r_{housenky}^2}{2}$

Spojením těchto rovnic je možné pro zadanou šířku b vypočítat optimální přísun drátu.

$$\begin{aligned} r_{housenky} &= \sqrt{\frac{2 \cdot Q_s}{\pi}} = \sqrt{\frac{2 \cdot Q_t}{\pi \cdot f}} = \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot d_{drátu}^2 \cdot \text{přísun}_{drátu}}{\pi \cdot f \cdot 4}} = \\ &= \sqrt{\frac{d_{drátu}^2 \cdot \text{přísun}_{drátu}}{f \cdot 2}} = \frac{b}{2} \\ \frac{b^2}{4} &= \frac{d_{drátu}^2 \cdot \text{přísun}_{drátu}}{f \cdot 2} \end{aligned}$$

$$\text{(optimální) } \text{přísun}_{drátu} = \frac{b^2 \cdot f}{2 \cdot d_{drátu}^2}$$

Hlavním úkolem výpočtu ovšem bude zjistit změny objemu v oblasti ostrého rohu v závislosti na úhlu α . Rozvahou zjistíme, že v rohu působí současně dva vlivy pro nadbytek či nedostatek materiálu. Prvním vlivem je zpomalení posuvové rychlosti na malém rádiu vlivem omezeného zrychlení. Druhým vlivem je vliv geometrie ostrého rohu.

6.3.1 Vliv zpomalení posuvové rychlosti

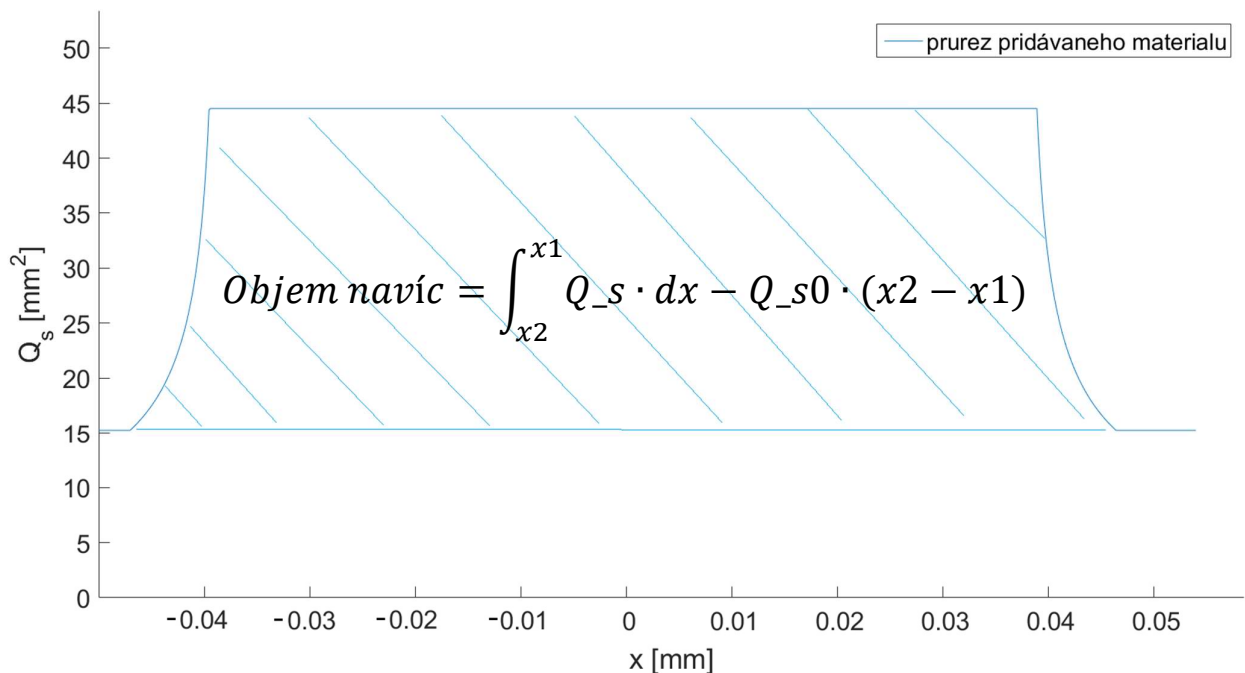
Při interpolaci rádiusu blížícího se nule dochází vlivem omezeného zrychlení ke zpomalení posuvové rychlosti hořáku. Toleranční rádius je značen R . Výpočet tohoto zpomalení pomocí derivace je naznačen v následujících rovnicích.

$$\begin{aligned}x &= R \cdot \sin(\omega \cdot t) \\ \dot{x} = f &= R \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot t) \\ \ddot{x} = a &= -R \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t)\end{aligned}$$

Časově proměnné části rovnic budou zanedbány, tudíž platí:

$$a = R \cdot \omega^2 \rightarrow \omega = \sqrt{\frac{a}{R}} \rightarrow f_{radius} = R \cdot \sqrt{\frac{a}{R}}$$

V oblasti, kde se hořák pohybuje menší rychlostí, než je předepsána v NC kódu, tedy rychlostí f_{radius} , se zvětší průřez přidávaného materiálu Q_s , protože platí stále rovnice z kapitoly 6.3. Z toho lze vyvodit, že zde vznikne nadbytek materiálu. Množství tohoto

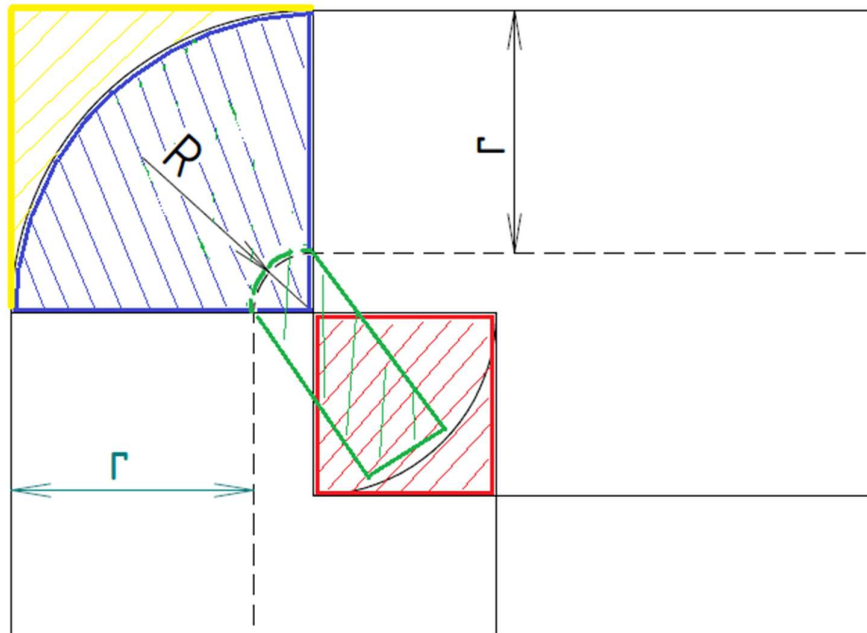


Obrázek 48 Graf znázorňující objem navíc při zpomalení posuvu

Je nutné podotknout, že oproti předpokladům se objem navíc vzniklý tímto zakolísáním posuvové rychlosti pohybuje v hodnotách menších než $0,2 \text{ mm}^3$. Vliv zpomalení posuvové rychlosti je tedy dosti zanedbatelný.

6.3.2 Vliv geometrie

Vliv geometrie na objem dodaného materiálu bude modelován takovým způsobem, že překryv housenek je objem navíc se znaménkem +, naproti tomu chybějící objem blíže vnější části housenky se znaménkem - . Tato situace je vysvětlena na obrázku 49.




Obrázek 49 Geometrie rohového návaru

Jednotlivé geometrické části jsou znázorněny svými příslušnými barvami. Pokud se dodrží toto značení, platí následující „rovnice.“

$$\text{Objem navíc} = + \text{ [green square]} + \text{ [red square]} - \text{ [blue square]} - \text{ [yellow square]}$$

Objem těchto jednotlivých geometrických částí v závislosti na úhlu rohu α již není příliš problematické vypočítat. Nebudou zde vypsány exaktní rovnice, pouze naznačení výpočtu, protože tyto tvary lze považovat za triviální.

 Kruhová výseč o úhlu 90° a poloměru r o tloušťce $t_z = R \cdot (180^\circ - \alpha)$

 Složitý geometrický tvar překryvu dvou půlkružnicových hranolů v prostoru, což bylo aproximováno funkcí: $\text{konstanta}_{\text{pro úhe}} \cdot r^3$, přičemž průběh hodnot konstanty byl zjištěn pomocí CAD softwaru Solid Edge



Kruhová výseč o úhlu $180^\circ - \alpha$ a tloušťce r

Rozdíl kosočtverce a kruhové výseče o úhlu $180^\circ - \alpha$ a tloušťce r

6.4 Realizace výpočtu v MS Excel

Celý výpočetní model byl sestaven kvůli možné vizualizaci v prostředí CAD softwaru Solid Edge v programu MS Excel. Kromě výpočtu bilance objemu materiálu v rohu svaru v závislosti na úhlu α také navrhuje optimální přísun drátu v lineárním úseku a z bilance objemu navrhuje v kritickém místě rohu upravený přísun drátu a souřadnici této změny. Záporné znaménko u proměnné $\text{objem}_{\text{navíc}}$ znamená, že objem chybí a je ho třeba dodat více. V tabulce 4 jsou vypsány vstupy a výstupy výpočetního modelu.

Vstupy	Výstupy
úhel rohu α [°]	optimální přísun drátu v lineární oblasti [m/min]
toleranční rádius R [mm]	poloměr housenky r [mm]
zrychlení stroje a [m/s ²]	objem navíc V [mm ³]
přísun drátu [m/min]	přísun drátu v rohu [m/min]
průměr drátu d_a [mm]	souřadnice změny přísunu drátu x [mm]
posuv hořáku f [mm/min]	
šířka poličky b [mm]	

Tabulka 4 Vstupy a výstupy výpočtu

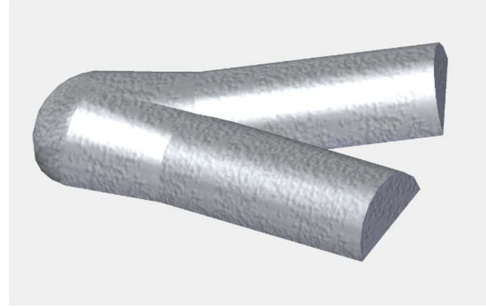
6.5 Vizualizace svarové housenky v rohu kontury

Zejména pro účely prezentace výpočtů byl excelovský soubor výpočetního modelu navázán na CAD model v programu Solid Edge. Solid Edge jsem upřednostnil na tuto část práce kvůli tomu, že jsem měl s propojováním CAD modelu a MS Excel souboru již určité předchozí zkušenosti.

Propojení funguje tak, že uživatel může pomocí posuvníků měnit vstupní parametry uvedené v tabulce 4. Ve vedlejším okně Solid Edge se v reálném čase mění vzhled rohové housenky. Na obrázcích 50 a 51 jsou vidět pouze dvě vybrané konfigurace.



Obrázek 50 - při 120° je změna v rohu nepatrná



Obrázek 51 - při 50° je materiál navíc patrný

6.6 Diskuze výsledků a jejich využití pro návrh experimentů

Podle očekávání je objem navíc při tupých úhlech velmi malý ($<1 \text{ mm}^3$), což je přibližně v řádech chyb, které vznikly aproximací geometrie. Při ostrých úhlech je patrná záporná bilance objemu, tudíž materiál v rohu chybí hodnota se pohybuje v řádu jednotek mm^3 (pro 50° je to přibližně -7 mm^3), což není zanedbatelné.

Navzdory předpokladům má zpomalení posuvu hořáku způsobené omezenou hodnotou zrychlení stroje malý vliv na vytvořený nadbytečný objem. Hodnota objemu vzniklého tímto jevem se pohybuje přibližně mezi $0,1$ a $0,2 \text{ mm}^3$, což je pro ostré úhly okolo 3%.



7 Experiment pro optimalizaci navařování na přímém úseku kontury

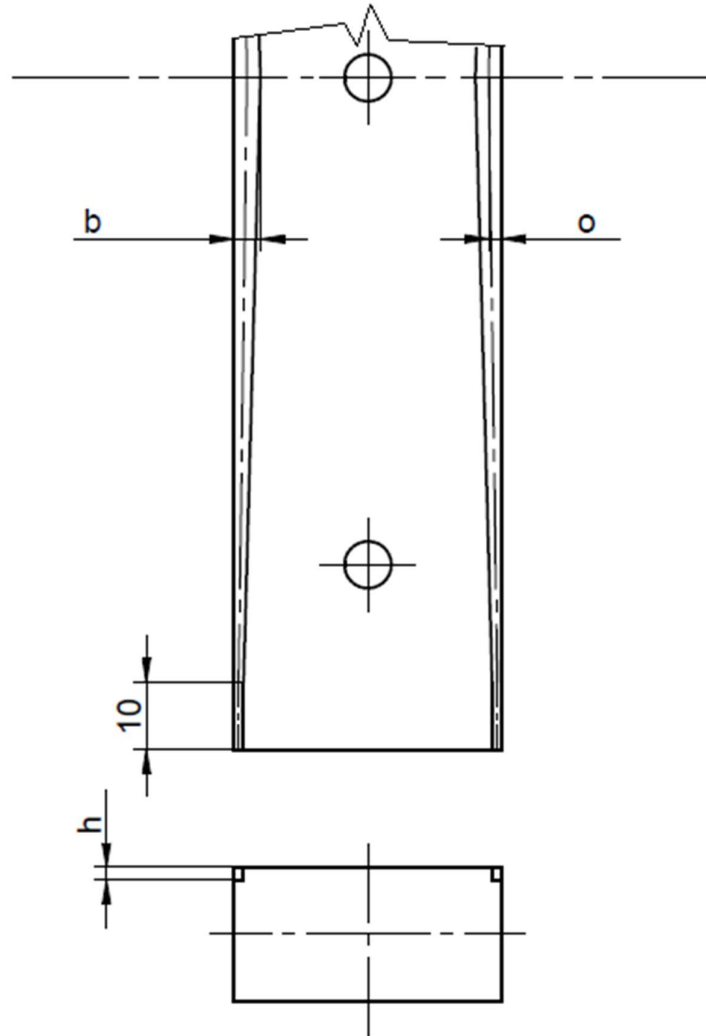
V diplomové práci se řeší správnost navaření kompletní kontury libovolného tvaru, jak bylo vysvětleno již v úvodu. Prvním krokem bude optimalizace navařovacích parametrů pro přímý úsek kontury. Cílem je dosáhnout stabilního navařovacího procesu, který správně vyplní materiálem poličku o šířce $b = 5$ mm a výšce $h = 2$ mm. Předem není jisté, jakých výsledků bude možné dosáhnout v rozích kontury a posléze při souvislém navařování celé kontury, proto je pro lineární úsek stanoveno kritérium spíše přísnější. Pro rohy a souvislé navařování je podmínkou minimálně $b = 4$ mm, ale třeba se podaří dosáhnout více.

7.1 Zahrnuté geometrické a technologické parametry

Parametry, ke kterým se bude přihlížet při experimentech, lze rozdělit do dvou skupin - parametry geometrické a parametry technologické.

Geometrické parametry jsou tři, viz obrázek 52

- 1) Výška poličky $h = 2$ mm. Tento parametr je pro všechny experimenty neměnný. Volba proběhla na základě předchozího výzkumu na RCMT. Pro stroj je již odladěná strategie plošného navařování, která má přírůstek po zarovnání právě 2 mm.
- 2) Šířka poličky b . Parametr šířky poličky bude během experimentů proměnný, ale jak již bylo řečeno, cílem je mít odladěny ostatní parametry tak, aby bylo $b = 5$ mm.
- 3) Poloha osy drátu o . Bylo zvoleno, že poloha osy hořáku je kótována od vnější hrany „poličky“. Správné určení tohoto parametru zajistí správný tvar návaru a využití materiálu.



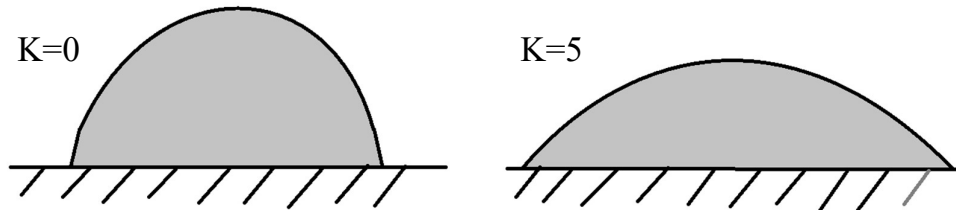
Obrázek 52 Výtisk vzorku pro přímý návar

Technologické parametry figurují v experimentech čtyři:

- 1) Reference svařovací strategie. Nastavení vnitřních referenčních parametrů svařovacího zdroje Fronius. Vybíralo se z referencí typu CMT, a to konkrétně CMT1370, CMT1355 a CMT1360, přičemž CMT1370 dodává do svaru nejméně tepla a CMT1360 zase nejvíce.
- 2) Přísun drátu. Svařovací zdroj automaticky umí upravovat hodnoty proudu a napětí podle přísunu drátu. Větší hodnotou přísunu drátu se tedy zvyšuje svařovací výkon. Minimální posuv drátu je 1,8 m/min a maximální 9,4 m/min. Proces funguje nejlépe poblíž středních hodnot 4 až 6 m/min. Proto budou experimenty započaty hodnotou 4m/min.
- 3) Posuv hořáku $f = 500$ mm/min. Z důvodu efektivity svařování byl zvolen parametr rychlosti posuvu hořáku jako neměnný. Dalším důvodem je to, že průřez housenky Q_s je

přímo úměrný přísunu drátu a zároveň nepřímo úměrný rychlosti posuvu hořáku. Tyto dva parametry jsou tím svázány, tudíž je vhodné měnit pouze jeden z nich.

4) Korekce dynamického pulzu **K** je parametr svařovacího zdroje ovlivňující množství tepla vnesené do svaru, podobně jako svařovací reference. Hodnota parametru je v rozmezí 0 až 5, kde 5 znamená nejvíce vneseného tepla. Teplo ovlivňuje tvar vzniklé housenky, která se jeho vlivem při navařování roztéká více do stran, jak je znázorněno na obrázku 53.



Obrázek 53 Vliv korekce dynamického pulzu

7.2 Návrh zdokonaleného zkušební vzorku

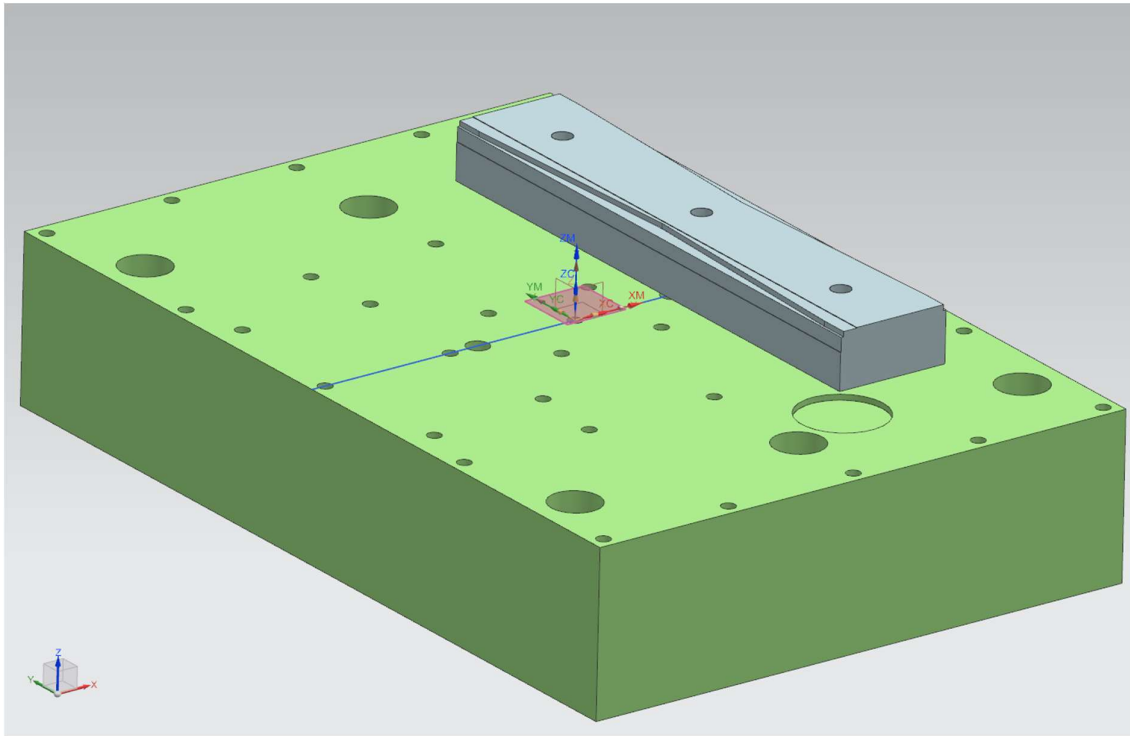
Zkušební vzorek pro optimalizaci svařovacích parametrů v lineárním úseku byl navržen tak, aby „polička“ měla v průběhu návaru proměnnou šířku **b**, případně i proměnnou polohu osy hořáku **o**. To umožní sledovat na hotovém vzorku, pro jaké rozmezí těchto parametrů jsou navržené technologické parametry vyhovující. Důležité je zde zdůraznit to, že na jednom vzorku budou provedeny dva návary s identickým nastavením všech parametrů, ale pouze jeden z těchto návarů bude frézováním zarovnán do finální polohy. Díky tomu bude na vzorku vždy vidět svarová housenka před i po tomto závěrečném obrobení.

Vzhledem k dostupnému vybavení na pracovišti RCMT byl vzorek převzat z již podobných předcházejících testů. Jedná se o hranol přišroubovaný přes drobnou podložku k funkční ploše stolu stroje.

7.2.1 CAD model v prostředí Siemens NX

V softwaru Siemens NX bylo nezbytné umístit vzorek do virtuálního prostředí tak, aby pozice odpovídala reálnému upnutí. CAM tedy může generovat NC kód ve správných souřadnicích.

Na obrázku 54 je zobrazení vzorku v souřadném systému stroje, který je označen indexem M. Zelený objekt je chladicí deska, sloužící k upínání. Podložka vzorku zde vidět není, neboť je skryta pod vzorkem. Připevňovací šrouby do virtuálního CAD modelu přidány nebyly. Jejich zobrazení by mělo pouze informativní význam.



Obrázek 54 CAD model vzorku

Pro experimenty v lineárním úseku navařování byly použity vzorky z předcházejících navařovacích testů probíhajících na RCMT.

Výkres vzorku a výkres podložky jsou součástí příloh, konkrétně výkres 00-01 a 00-02

7.3 Příprava experimentu

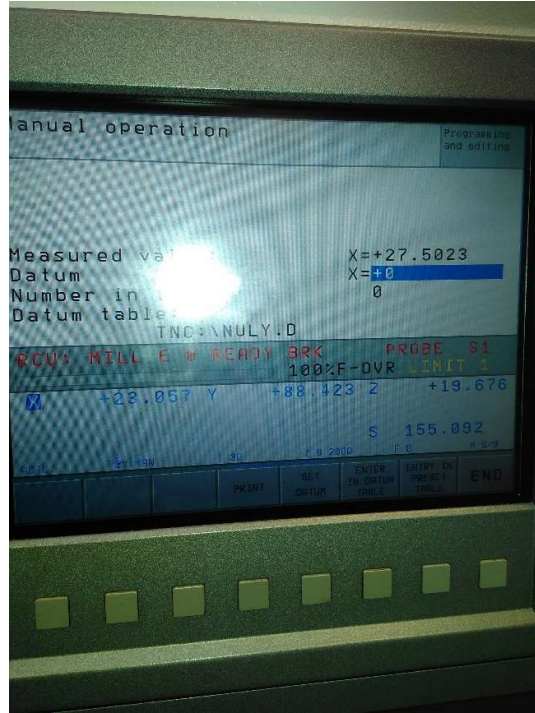
Vzorek byl pomocí tří šroubů se závitem M6 připevněn přes podložku k funkční ploše stolu stroje. Pro přesné ustavení byla použita dotyková sonda Heidenhain. Snímek z měření polohy dotykovou sondou vidíme na obrázku 55. Vzhledem k tomu, že finální polohy bylo dosahováno ťukáním gumového kladiva do vzorku při nedotažených šroubech, tolerance polohy byla přibližně $\pm 0,025$ mm, posunutí souřadného systému příkazem není možné. To proto, že hybridní stroj používá souřadné systémy dva – frézovací a navařovací. Jejich přesné seřízení vůči sobě zabere dost času, takže se s frézovacím souřadným systémem



nehýbe za účelem jednoho dílce. Na snímku 56 se ustavení povedlo přesněji než obvykle, neboť požadovaná vzdálenost od souřadného systému měla být 27,5 mm.



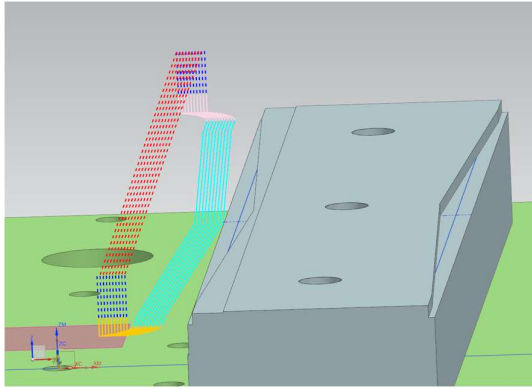
Obrázek 55 Měření polohy dotykovou sondou



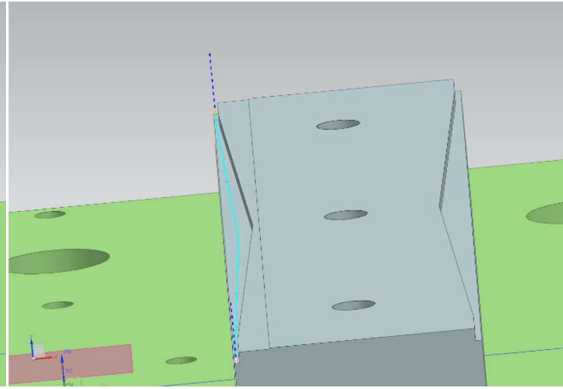
Obrázek 56 Obrazovka stroje při měření sondou

7.4 Generování příslušných NC kódů a nastavování parametrů svařovacího zdroje

Dráha nástroje byla naprogramována pomocí CAM softwaru Siemens NX. Zde se dají nastavit všechny potřebné strojní parametry tak, aby operace na stroji proběhla správně s ohledem na obráběný materiál a nástroj. Pro navařování se v CAMu nastavuje zejména rychlost posuvu hořáku a číslo JOBu svařovacího zdroje. Parametry navařování se pak nastavují v samotném svářecím zdroji pomocí desktopové aplikace Fronius Explorer. Na obrázku 57 je vidět, jak CAM vygeneroval dráhy frézování, na obrázku 58 je vygenerovaná dráha hořáku.



Obrázek 57 Vygenerovaná dráha frézování



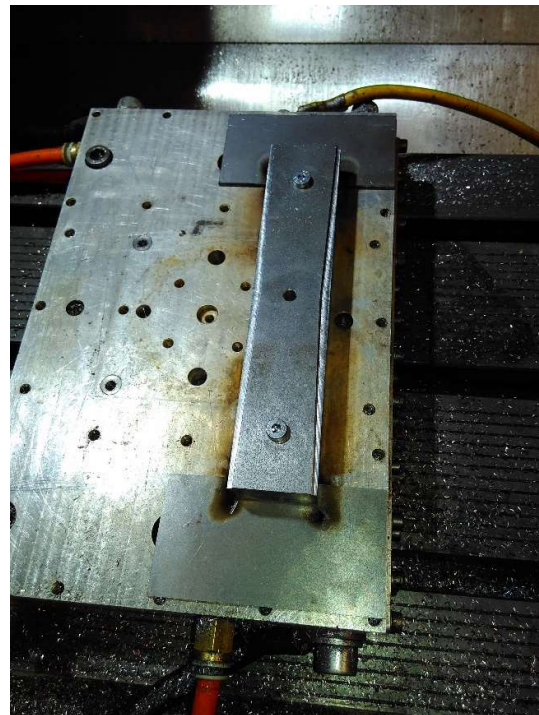
Obrázek 58 Vygenerovaná dráha navařování

7.5 Postup experimentu

Po přesném ustavení vzorku a dotažení šroubů je první operací frézování „poličky“. Podle předem připraveného NC programu stroj postupně vyfrézuje požadovanou poličku. Tato operace trvá přibližně 10 minut. Poté ofoukneme stlačeným vzduchem třísky ze vzorku (ručně). Vyfrézovaný a ofouknutý vzorek je vidět na obrázku 59.



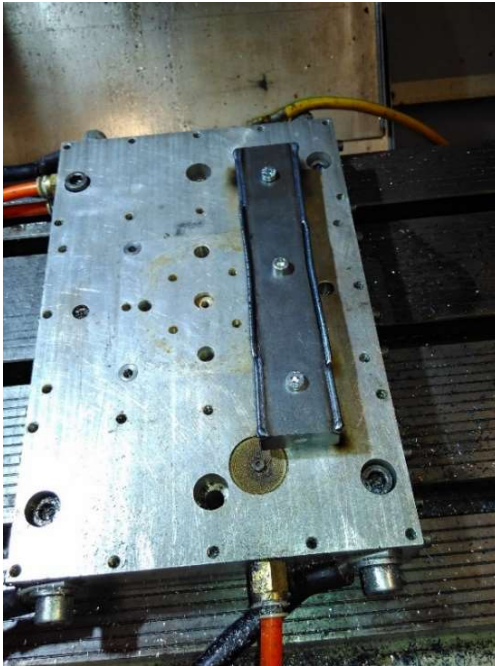
Obrázek 59 Vyfrézovaný vzorek



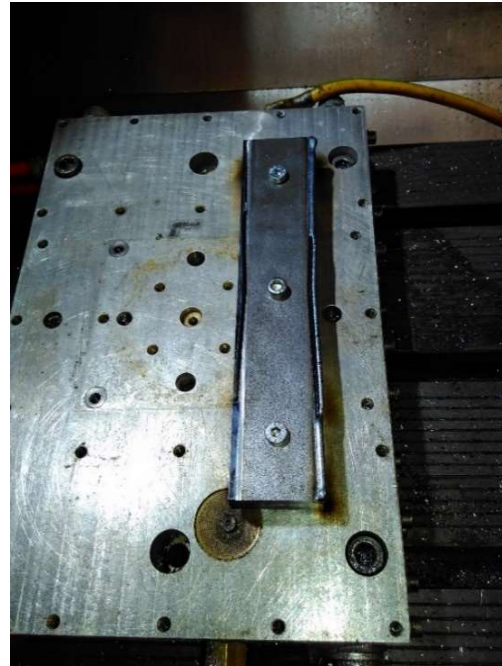
Obrázek 60 Destičky pro navařování

Následující operací je samotné navařování. Pro účel navařování je příhodné dát pod počátek a konec tenké plechové destičky, aby se nepoškodila upínací plocha od svařovacího procesu. Poloha destiček je zobrazena na obrázku 60.

Proběhne operace navařování se stejným nastavením parametrů pro jednu i druhou hranu vzorku – viz obrázek 61. Potom se frézou zarovná bok a vršek jedné ze svařových housenek – viz obrázek 62. Všechny tyto operace jsou krátké, trvají kolem jedné minuty. Nakonec se povolí šrouby a vyjme vzorek.



Obrázek 61 Navařeno



Obrázek 62 Hotový vzorek

7.6 Popis jednotlivých experimentů

Nyní se shrne, kolik je při experimentech celkem proměnných parametrů, což i s jejich možnými hodnotami ukazuje tabulka 5.

Proměnný parametr	Rozsah nebo možnosti
šířka poličky b [mm]	1 až 5 mm
poloha osy drátu o [mm]	0,5 až 2,5 mm
Reference svařovací strategie	CMT1370, CMT1355 nebo CMT1360
Přísun drátu [m/min]	1,8 až 9,4 m/min
Korekce dynamického pulzu K	0 až 5

Tabulka 5 Proměnné parametry



Je jisté, že k experimentální optimalizaci nelze přistoupit tím způsobem, že by se vyzkoušely všechny kombinace. Pokud by se geometrické parametry a přísun drátu stupňovaly po 0,1 své příslušné jednotky a korekce by se stupňovala po 1, znamenalo by to nesmyslné množství kombinací. Konkrétně:

$$\text{Počet možných kombinací} = 41 \cdot 21 \cdot 3 \cdot 77 \cdot 6 \cong 1,2 \text{ milionu}$$

Proto bude třeba začít s určitými parametry a posléze pozorovat jejich vliv, čímž bude možno se postupnou iterací parametrů dopracovat ke správnému nastavení. Pro první experiment byly zvoleny hodnoty z tabulky 6. Určené rozmezí znamená, že hodnota parametru se měnila po délce návaru.

šířka poličky b [mm]	1 až 5 mm
poloha osy hořáku o [mm]	0,5 až 2,5 mm (střed poličky)
Reference svařovací strategie	CMT1370
Přísun drátu [m/min]	4 m/min
Korekce dynamického pulzu K	0

Tabulka 6 Parametry prvního experimentu

7.7 Vyhodnocení experimentu – parametry pro další postup

Experimentů proběhlo pro lineární úsek 16. Postupným zhodnocováním probíhajících experimentů se postupnými iteracemi dospělo k optimální kombinaci parametrů, jak se předpokládalo. Všechny jednotlivé experimenty jsou popsány v příloze 3. Výsledné optimální podmínky jsou zde uvedeny v tabulce 7.

šířka poličky b [mm]	5 mm
poloha osy hořáku o [mm]	2,55 mm
Reference svařovací strategie	CMT1360
Přísun drátu [m/min]	7 m/min
Korekce dynamického pulzu K	5

Tabulka 7 Výsledné optimální parametry

Toto výsledné nastavení je vyhovující a bude dále použito pro další druh experimentů. Vzhledem k tomu, že vypočítaný přísun drátu je při těchto geometrických parametrech poličky 6,25 m/min, chyba výpočetního modelu je pro tento případ 10%. To lze považovat za dobrý výsledek, když se přihlédne k tomu, jaká jsou ve výpočetním modelu použita zaokrouhlení a zjednodušení.

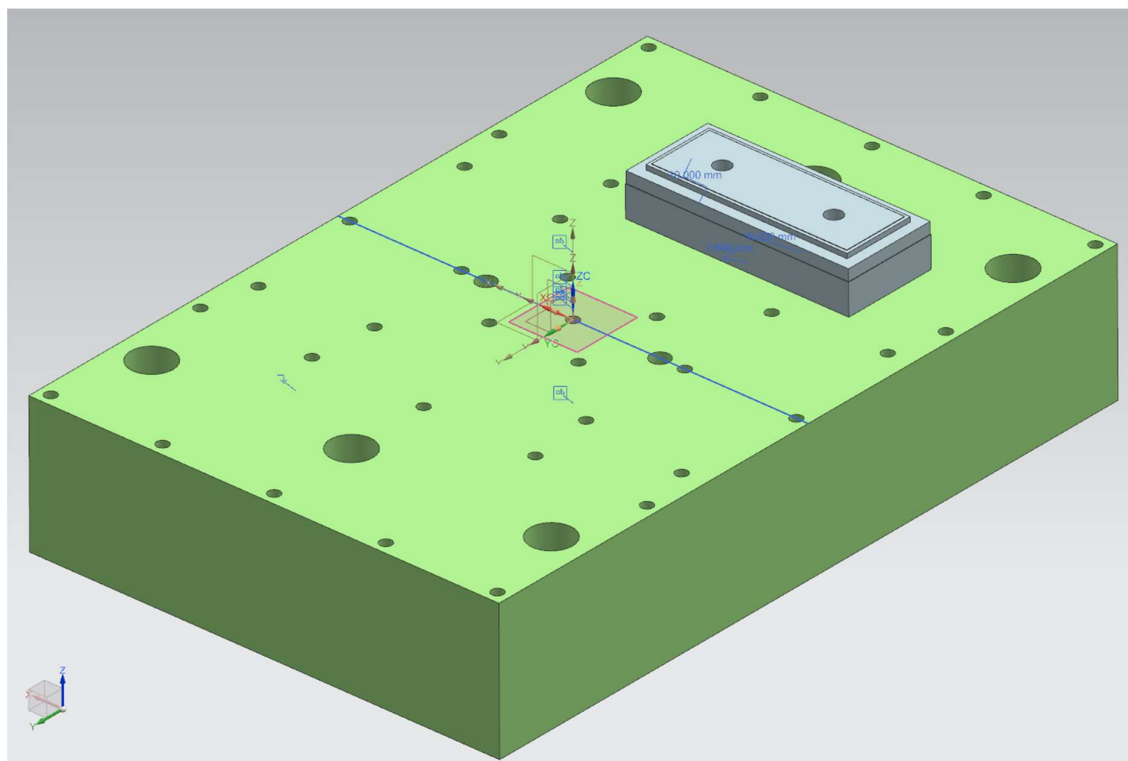
8 Experiment pro optimalizaci navařování v rohu kontury

8.1 Návrh zkušebního vzorku

Příprava vzorku pro rohy kontury byla přizpůsobena tomu, že zbyly hranolové polotovary. Jejich vzhled byl stejný jako polotovary pro experimenty na lineárním úseku, ovšem s tím rozdílem, že v nich nebyly vrtané díry pro šrouby. Po rozvaze se ukázalo jako nejsnazší a nejúspornější řešení rozřezat tyto hranoly na polovinu, zarovnat a poté vyvrtat díry pro šrouby.

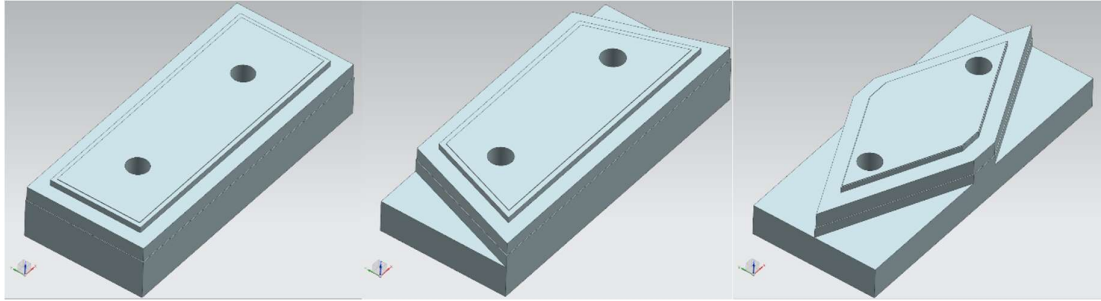
8.1.1 CAD model v prostředí Siemens NX

Byl vymodelován vzorek a jeho podložka. Umístění do pracovního prostoru stroje na funkční plochu stolu je znázorněno na obrázku 63.



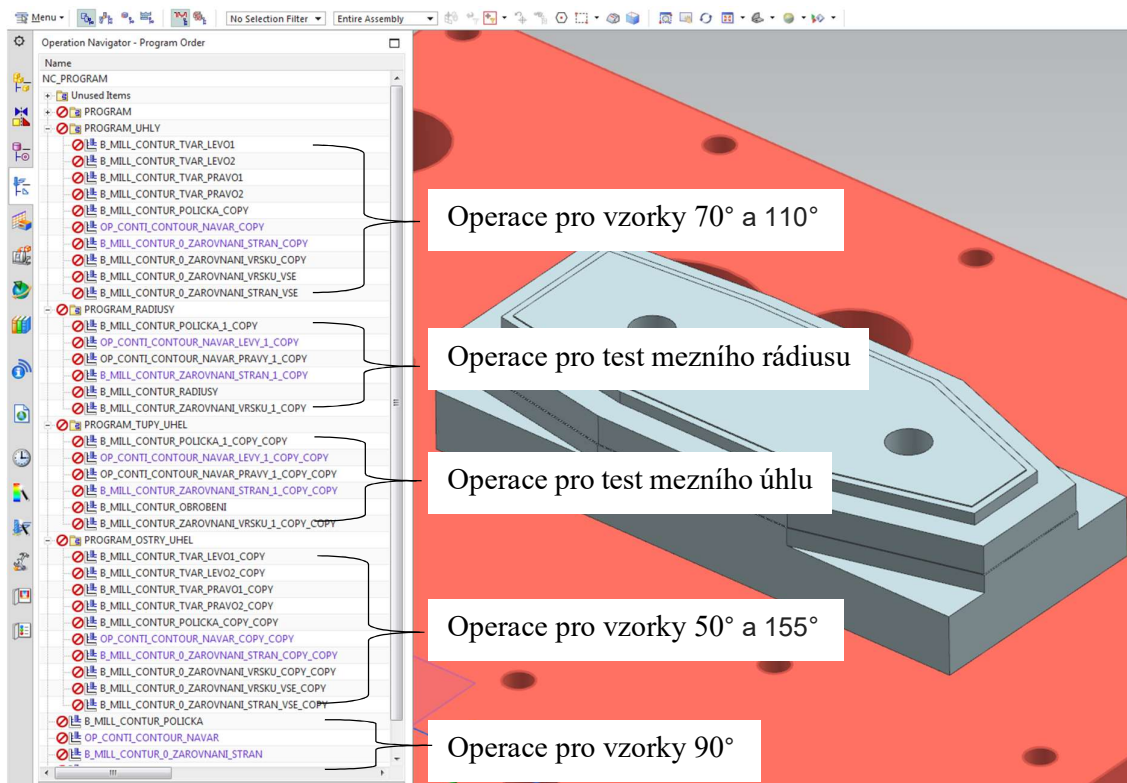
Obrázek 63 CAD model pro rohový experiment

Experimenty budou započaty nejdříve pro úhel rohu 90° , ale posléze i pro další úhly. Toho bylo docíleno ze stejného polotovaru, pouze se vyfrézovaly různé tvary, modely jsou zobrazeny na obrázcích 64, 65 a 66. Ke všem těmto modelům byly postupně vytvořeny frézovací NC programy pro stroj.

Obrázek 64 Vzorek pro 90° Obrázek 65 Vzorek pro 70° a 110° Obrázek 66 Vzorek pro 50° a 155°

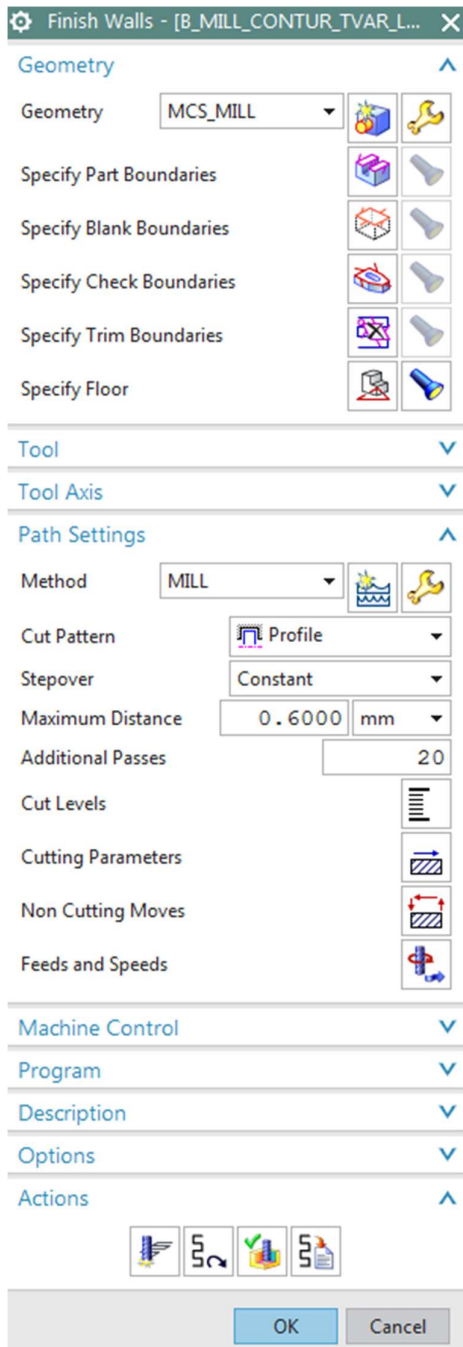
8.1.2 Příprava NC kódů

Veškeré funkce CAM byly realizovány pomocí jednoho PRT souboru, kde se měnila pouze konfigurace vzorku. To bylo nejpraktičtější řešení vzhledem k tomu, že vzorek byl vždy upnut na stejné podložce na stejném místě. Na obrázku 67 je zobrazena struktura operací pro jednotlivé konfigurace.

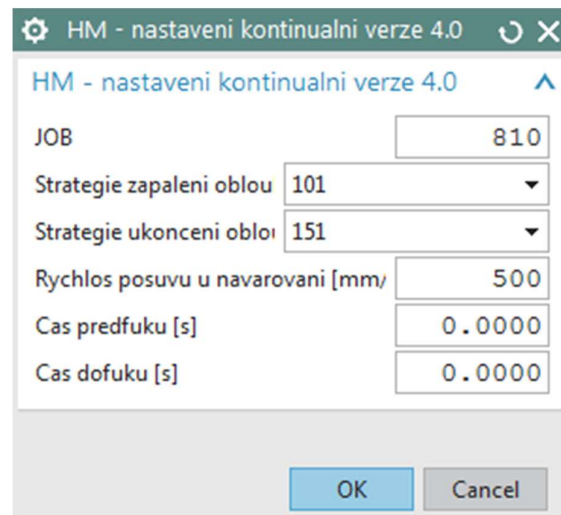


Obrázek 67 Struktura programů v CAM

Zatímco nastavení parametrů frézovacích operací se provádí ve svém vlastním dialogovém okně – viz obrázek 68, parametry navařování se nastavují v záložce Methods. Pravým tlačítkem se klikne na metodu → object → start events. Pak se objeví dialogové okno, které umožňuje nastavit parametry navařování – viz obrázek 69. Podrobnější informace jsou uvedeny v manuálu pro Kovosvit MAS. [4]



Obrázek 68 Dialogové okno frézování



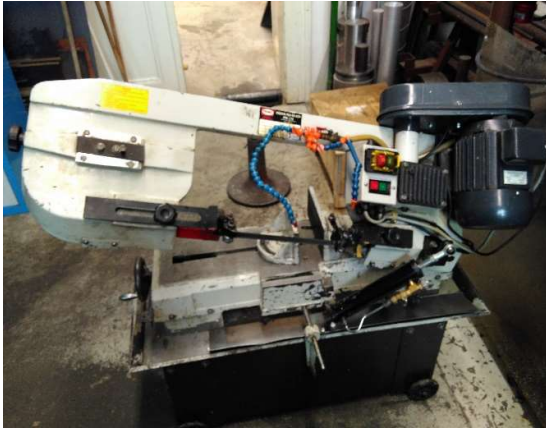
Obrázek 69 Dialogové okno pro navařování

8.2 Reálná příprava zkušebních vzorků

Jak bylo již částečně řečeno, nejprve bylo nutné hranoly nařezat na požadovanou délku. K tomu byla použita pásová pila dostupná na pracovišti RCMT, která je vyfocena na snímku



71. Posléze byly vzorky zarovnaný na přesný rozměr pomocí nástrojařské frézky zobrazené na snímku 72. Na téže frézce byly i vyvrtány díry pro šrouby.



Obrázek 71 Pásová pila



Obrázek 72 Nástrojařská frézka

Výkres vzorku a výkres podložky jsou součástí příloh, konkrétně výkres 01-01 a 01-02

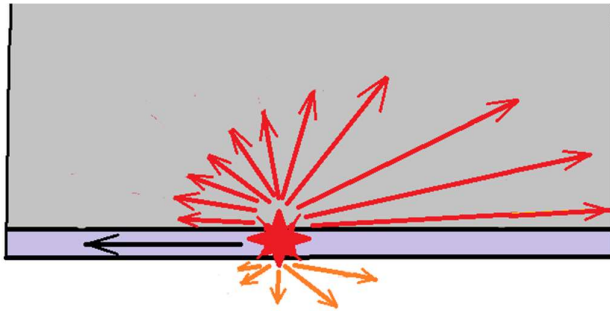
8.3 Počáteční experimenty pro navařování v rohu kontury

V původních předpokladech a ve výpočtovém modelu se s tepelnou energií nepočítalo. Složitost matematického modelu by v případě zahrnutí vedení tepla ze svaru do zbytku polotovaru a do okolí byla mimo možnosti tvůrce diplomové práce. Výpočet pro lineární úsek návaru byl směrodatný. To se ovšem nedá říci o výpočtu pro roh kontury. První čtyři experimenty pro rohovou konturu ukázaly, že vliv koncentrace tepla je stejně důležitý jako geometrie rohu.

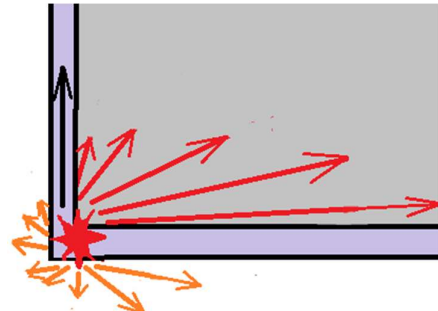
8.4 Tepelná energie a tepelná kapacita

8.4.1 Teoretické vysvětlení odvodu tepelné energie

Je zřejmým faktem, že ocel má ve srovnání se vzduchem o mnoho větší tepelnou vodivost. Dle zdroje [21] je součinitel tepelné vodivosti $\lambda_{\text{ocel}} = 73 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ zatímco $\lambda_{\text{vzduch}} = 0,026 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. To je přibližně 3000 krát více. Když se uváží i to, že zdroj tepla je pohyblivý (pohybující se hořák), lze načrtnout následující zjednodušená schémata odvodu tepla - na obrázku 73 pro lineární úsek a na obrázku 74 pro roh kontury.



Obrázek 73 Odvod tepla na přímém úseku



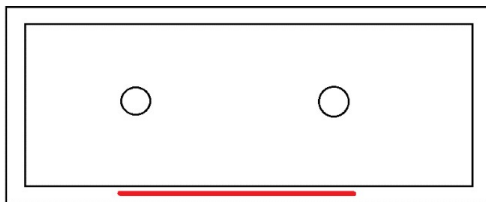
Obrázek 74 Odvod tepla v rohu kontury

Černá šipka znázorňuje směr pohybu hořáku. Červené šipky znázorňují odvod tepla do polotovaru a oranžové do okolí. Větší délka šipek znamená větší odvod tepla, ne však v měřítku (červené by měly být 3000 krát větší). Pouhým sečtením je zřejmé, že odvod tepla v rohu je přibližně dvakrát horší. Tuto skutečnost ještě posiluje fakt, že když hořák mění v rohu směr, odvádí se teplo do již prohřáté oblasti, čímž se teplota ještě více zvyšuje.

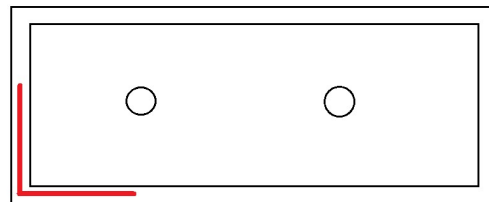
8.4.2 Experimentální posouzení odvodu tepelné energie

Kapitola 8.4.1 je sice podložena teoretickými znalostmi, ovšem je vhodné ověřit tuto myšlenku praktickým experimentem. Ten bude probíhat tak, že se provede stejně dlouhý návar na přímém úseku a posléze v rohu. K měření teploty bude využita termokamera, která ovšem nemůže snímat oblast návaru přímo při procesu navařování, neboť není přizpůsobena infračervenému záření vznikajícímu při tak vysoké teplotě. Postupovat se tedy bude tak, že se teplota bude snímat až těsně po ukončení navařování a otevření ochranného krytu stroje. Na snímcích 77 a 78 je vidět pozice kamery snímající vzorek ve stroji.

Schéma návarů na vzorek:



Obrázek 75 Schéma návaru na přímém úseku



Obrázek 76 Schéma návaru v rohu kontury

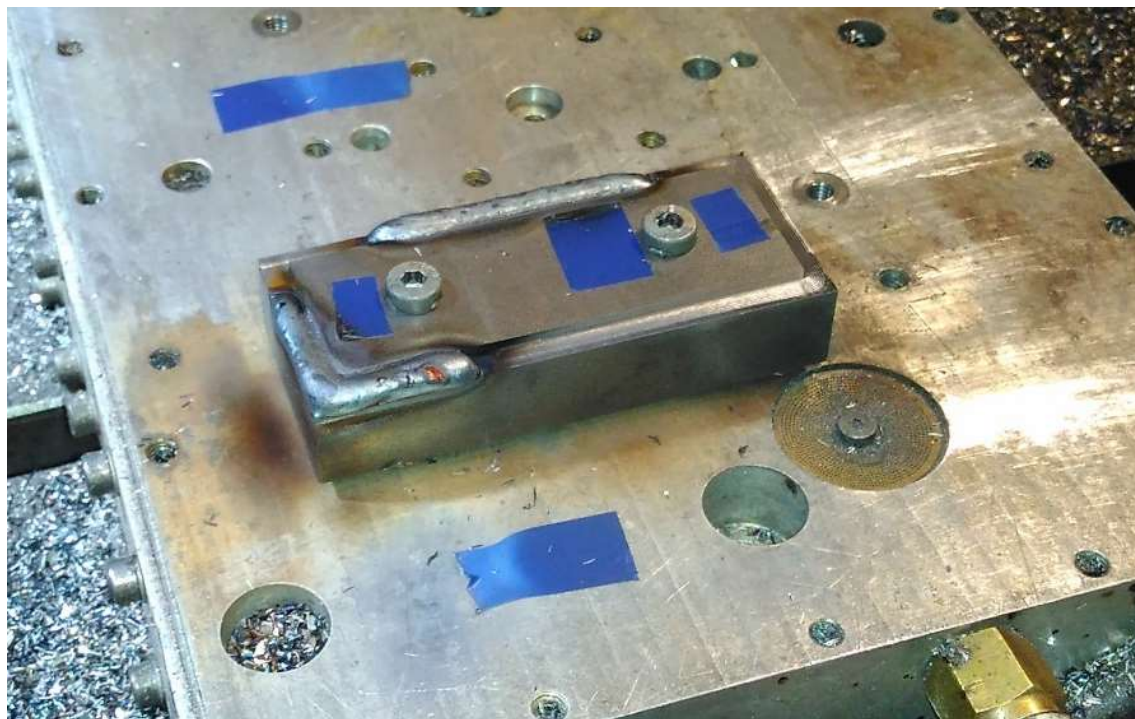


Obrázek 77 Umístění termokamery



Obrázek 78 Pohled termokamery

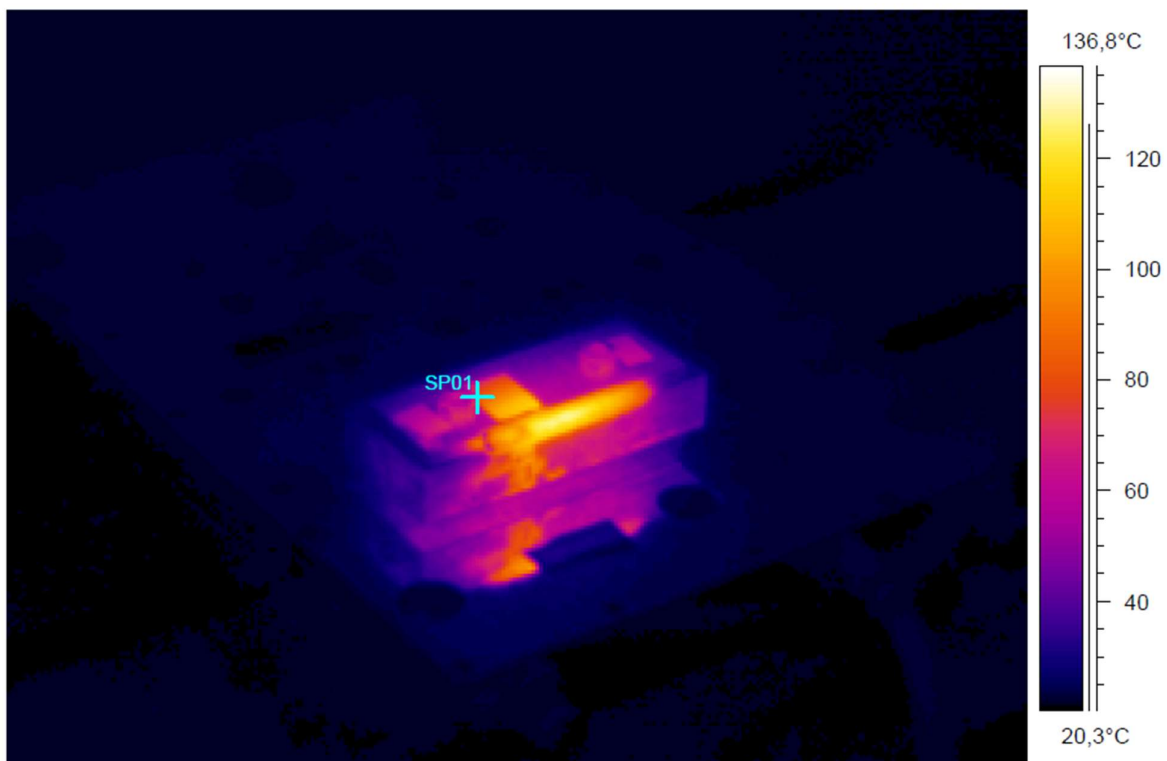
Vzorek po provedení experimentu je na snímku 79. Modré nálepky slouží jako referenční plochy pro přesné určení emisivity vzorku a tudíž následnému přesnému určení teploty.



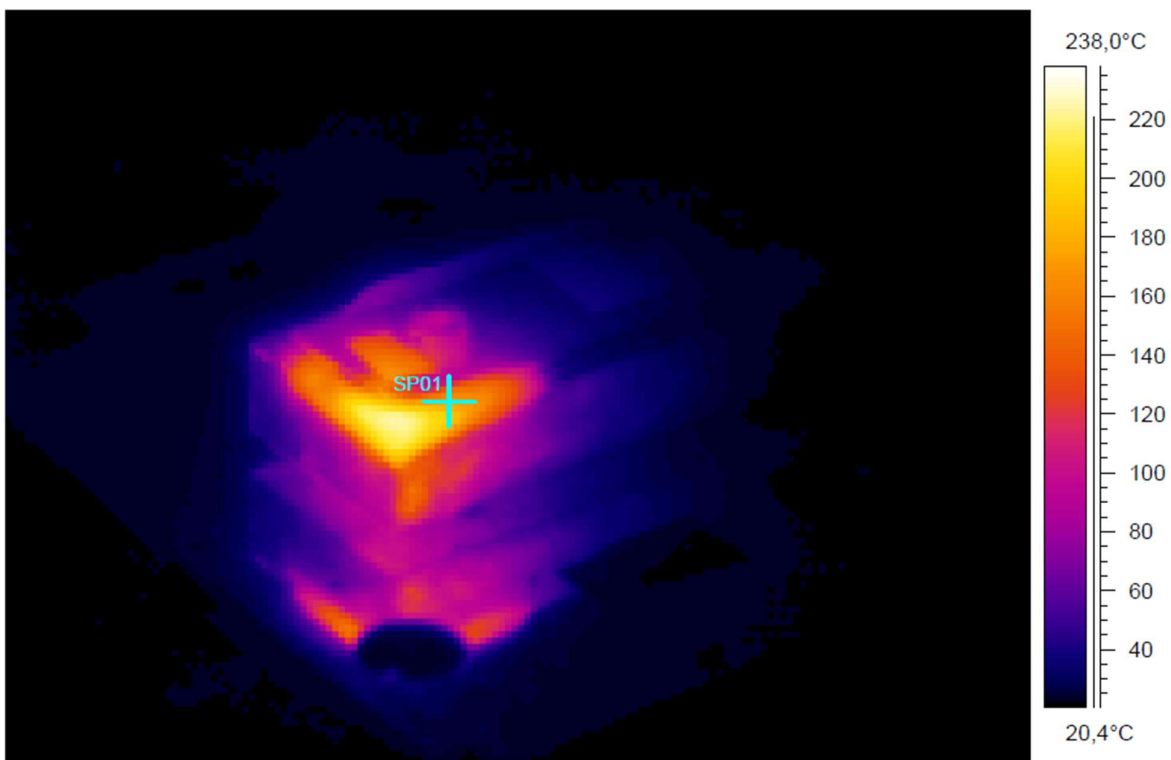
Obrázek 79 Vzorek po měření teploty



Kompletní vyhodnocení snímků je obsaženo v příloze 5. Níže na obrázcích 80 a 81 jsou zachyceny nejpodstatnější informace z měření termokamerou. Snímek 80 byl pořízen těsně po navaření přímého úseku kontury. Maximální teplota dosahuje $136,8^{\circ}\text{C}$. Vzorek stihl vychladnout na teplotu okolí během svého přeupínání, což je doloženo snímkem na straně 4 v příloze 5. Další zde uvedený snímek 81 byl pořízen těsně po navaření kontury v rohu. Maximální teplota dosahuje 230°C , což je přibližně 1,7 krát více než na přímém úseku. To je v souladu s teoretickými předpoklady, přihlédneme-li také k tomu, že několik málo sekund (odhadem kolem 3 sekund) byl okamžik mezi ukončením navařování, otevřením ochranného krytování stroje a pořízením snímku termokamerou. Je jisté, že teplejší vzorek chladne rychleji, neboť teplotní spád oproti okolí je vyšší. Tímto jevem se dá vysvětlit, proč poměr naměřených teplot není lehce větší než 2, jak bylo předpokládáno podle teoretických znalostí.



Obrázek 80 Snímek návaru přímého úseku z termokamery



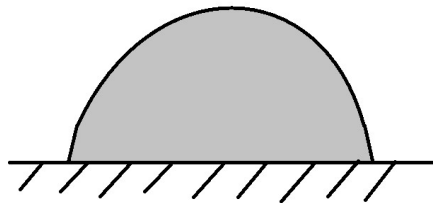
Obrázek 81 Snímek návaru rohu z termokamery

8.5 Provedení experimentů navařování v rohu kontury s přihlédnutím k tepelným jevům

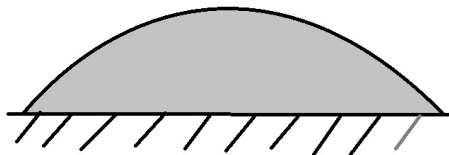
Experimenty zaměřené na rohovou oblast kontury byly prováděny postupně pro různé úhly. Ambicí bylo odladit návary pro ostré rohy kontury v rozmezí úhlu 50° až 180° (180° odpovídá zcela přímému úseku). Začalo se od pravého úhlu, tedy 90° . První 4 vzorky nebyly testovány s uvědoměním o silném vlivu teploty. Na vliv teploty se myslelo až od vzorku 5.

8.6 Vyhodnocení rohových experimentů

Vzorkem 5 počínaje bylo hlavní zásadou návrhu korekce snížení výkonu svařovacího zdroje tak, aby se teplo stíhalo odvádět a nedošlo k odtavení v místě rohu. Pro zachování přidávaného materiálu lze odvodit z rovnic uvedených v kapitole 6.3, že při snížení výkonu (\approx přísunu drátu) je třeba proporciálně snížit také rychlost posuvu hořáku tak, aby průřez housenky Q_s zůstal přibližně stejný. Spíše je cílem Q_s zvýšit, aby se pokryl geometrický nedostatek materiálu v rohu. Tímto způsobem byly vytvořeny vzorky 5 až 9. Ukázalo se však, že změnou výkonu svařování a rychlosti posuvu se mění tvar průřezu vytvořené housenky. Housenka je v tomto případě vyšší a užší. Podobně ovlivňovala tvar průřezu housenky také korekce dynamického pulzu K , jak je vysvětleno v kapitole 7.1.



nižší výkon + nižší rychlost posuvu



vyšší výkon + vyšší rychlost posuvu

Obrázek 82 Vliv kombinace parametrů na tvar svarové housenky



Zhodnocením vzorků 5 až 9 se tedy dospělo k závěru, že je potřeba tvořit svarovou housenku v kritickém místě širší. Nápadem bylo umělé prodloužení trajektorie hořáku v místech před začátkem rohů.

8.7 Návrh rohových korekcí pro zadané rozpětí úhlů

Postupně byly navrženy a otestovány korekce pro další úhly rohu. Vyhovujícím řešením se staly varianty takové, které pro ostré úhly mají větší umělé prodloužení trajektorie a naopak tupé úhly menší. Kvůli časové efektivitě byl tvar vzorků navržen tak, aby se zároveň testovaly dva různé úhly. Proběhly experimenty společně pro úhly 70° a 110° , dále pro dvojici 60° a 150° a potom pro 50° a 155° . Experimenty jsou podrobněji popsány v příloze 4.

8.8 Vyhodnocení mezních případů

Protože z experimentů vyplynulo, že i pro velmi tupý úhel kontury 155° jsou pro vyhovující geometrii návaru potřeba použít korekce, je vhodné exaktně stanovit mezní případy. Tedy od jakých hodnot je korekcí třeba.

8.8.1 Mezní úhel

Byl navržen vzorek obsahující konturu rohu s úhly 160° , 165° , 170° a 175° . Celá kontura byla navařena bez použití korekcí. Vyhovující byly rohy s úhly 165° , 170° a 175° . Kvůli postihnutí náhodných jevů při navařovacím procesu je doporučení takové, že korekce není třeba používat pouze pro úhly 170° až 180° .

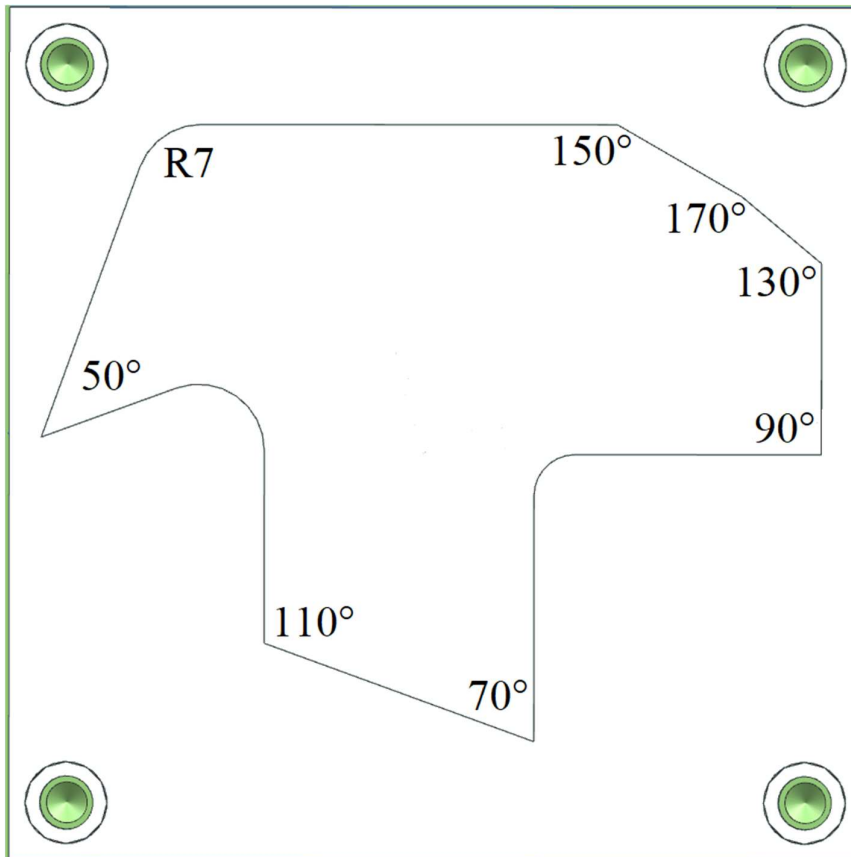
8.8.2 Mezní rádius

Pro určení mezního rádiusu byl vzorek takový, aby jeho vnější kontura obsahovala rádiusy 4,5mm; 5mm; 5,5mm a 6mm. Po navaření se ukázalo, že žádný roh není vyhovující, proto se udělal ještě jeden podobný experiment s rádiusy 6 mm; 6,5 mm; 7 mm a 7,5 mm. Rohy s rádiusem 6,5 mm; 7 mm a 7,5 mm byly vyhovující. Znovu kvůli postihnutí náhodných

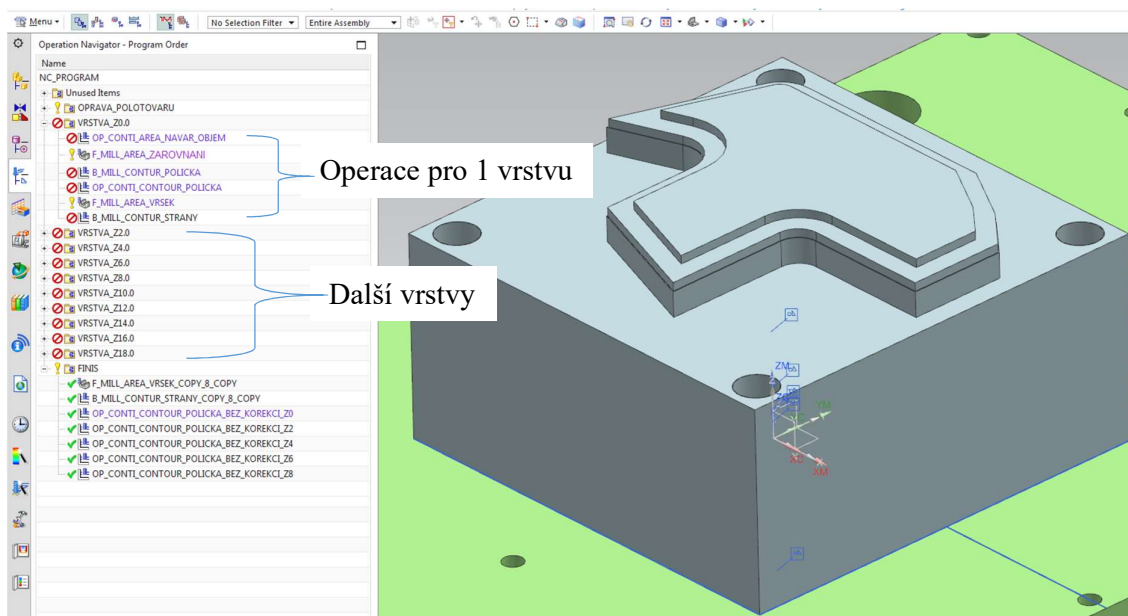
jevů při navařovacím procesu je doporučení takové, že korekce není třeba používat pro vnější rádius kontury větší nebo roven 7 mm.

8.9 Závěrečný zkušební test zahrnující reprezentanty všech typů korekcí

Ve všech doposud popsaných experimentech byly nejprve lineární úseky a potom rohy kontury testovány a vyhodnocovány jednotlivě nebo maximálně ve dvojicích. Je potřeba také otestovat, zda navařování celé komplexní kontury funguje jako celek. Pro tento účel byla navržena kontura obsahující všechny typy testovaných korekcí. Kontura, viz obrázek 83, obsahuje rádius 7mm, rohy s úhly 50°, 70°, 90°, 110°, 130°, 150°, 170° a samozřejmě lineární úseky. Tento tvar bude kombinací objemového navařování a konturového navařování vystavěn do výšky 25 mm.



Obrázek 83 Vnější kontura dílce pro závěrečný test



Obrázek 84 Virtuální model v NX

8.9.1 Postup závěrečného testu

Při tvorbě výrobku proces postupuje po jednotlivých vrstvách. Na následujících snímcích bude tento proces názorně ukázán po jednotlivých krocích pro jednu vrstvu. Pro další vrstvy se stejné operace opakují.

1) Plošný návar



Obrázek 85 Plošný návar

2) Zarovnání horní plochy frézováním



Obrázek 86 Zarovnání horní plochy

3) Vyfrézování poličky



Obrázek 87 Vyfrézování poličky

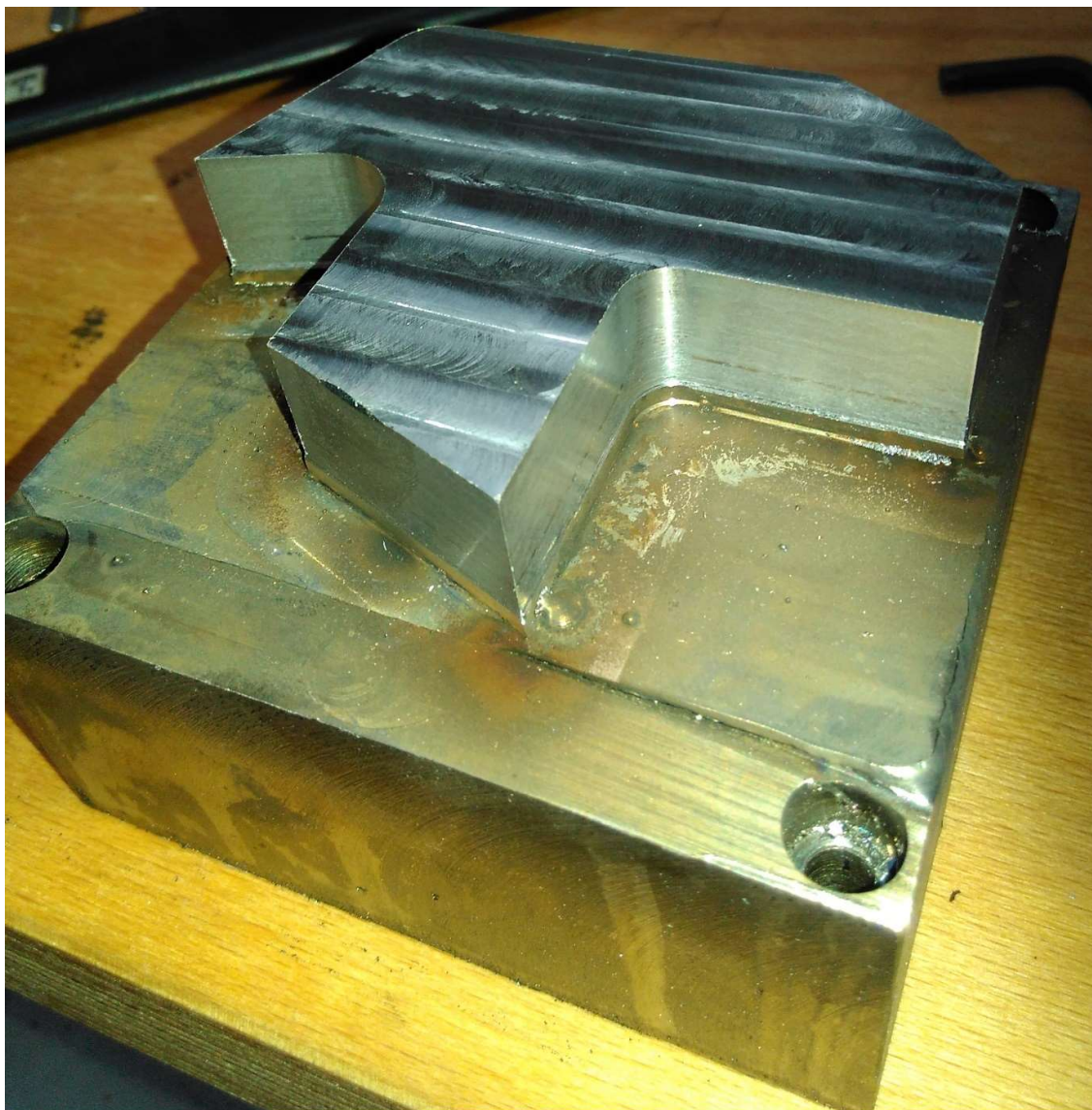
4) Navaření kontury s použitím korekcí



Obrázek 88 Navaření kontury

8.9.2 Zhodnocení závěrečného testu

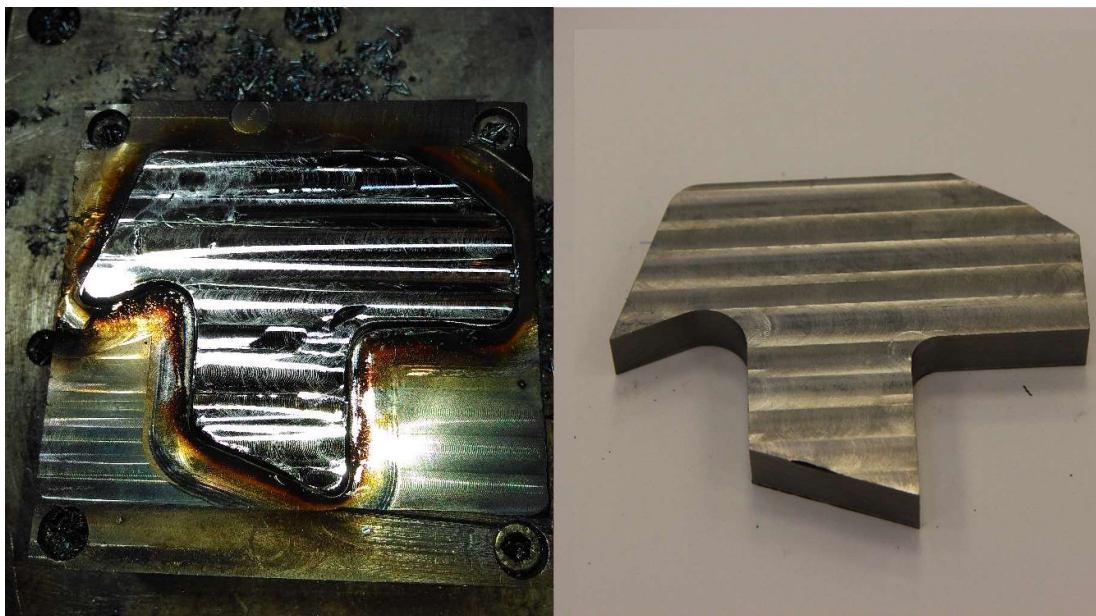
Výsledný výrobek splnil očekávání, neboť zejména u ostrých rohů bylo požadované kvality dosaženo na 100%. Pro celý výrobní proces platí, že vytváříme výsledný dílec s přídavkem přibližně 0,3 mm. Kromě poslední horní vrstvy, kde je třeba odebrat ve finalizaci více.



Obrázek 89 Hotový dílec na podložce

Vytvořený dílec byl posléze odříznut pásovou pilou od podložky, aby se podložka mohla v budoucnu používat pro další experimenty.

Pro porovnání byla vytvořena i vrstva bez použití korekcí, viz obrázek 90. Výsledný dílec s použitím korekcí je na obrázku 91. Z porovnání je patrné, že kvalita ostrých rohů je s použitím korekcí vysoká, zatímco bez korekcí se dosahuje rohů s rádiusem přibližně 7 mm.



Obrázek 90 Bez použití korekcí jsou rohy kontury zaoblené

Obrázek 91 S korekcemi jsou všechny rohy kontury ostré



9 Uplatnění získaných výsledků

Pro dílce z konstrukční ocele a s použitím drátu G3Si1 je se získanými znalostmi nyní možno vytvářet hybridní technologii navařování a frézování dílce obsahující ostré hrany s úhly vnější kontury větší nebo rovno 50° , a to s technologickým přídatkem pro finální obrábění pouze 0,3 mm.

Ruční programování testovaných korekcí je zdlouhavé a do budoucna je potřeba začlenit tyto korekce do některého automatizovaného procesu výroby. Ještě nebylo zcela jednoznačně rozhodnuto, zda budou znalosti získané v této diplomové práci funkčně zabudované do nadstavby CAM softwaru, do postprocesoru pro daný stroj nebo do PLC jednotky samotného stroje. Každá z těchto variant má své výhody a nevýhody

9.1 Návrh možností funkce technologického postprocesoru

Už v některých jiných funkcích nadstavbového modulu HM do CAMu Siemens NX byl použit ten princip, že program načítá některá data ze znalostní tabulky. Bylo by pravděpodobně možné stejný princip využít i pro dráhové korekce hořáku. Bude již úkolem programátora zajistit ze vstupní geometrie výpočet úhlu rohu a jeho radiusu a posléze správné načtení korigované dráhy ze znalostní tabulky.



10 Závěr

V diplomové práci byly nejprve shrnuty a utříděny znalosti potřebné k výzkumu zadaného problému. Potom byl pomocí výpočtů nastíněn přibližný odhad výsledku experimentů a tento odhad také posloužil jako výchozí bod pro počáteční volbu parametrů experimentu.

V první experimentální fázi byly optimalizovány geometrické a technologické parametry pro navařování kontury v přímém úseku. Výsledné optimální parametry pro navařování kontury v přímém úseku se shodují s teoretickým výpočtem přibližně na 85% až 90%. Lze říci, že teoretický výpočet měl v případě přímého úseku jistou vypovídající hodnotu.

V druhé experimentální fázi byly geometrické a technologické parametry optimalizovány pro navařování v rohu kontury v závislosti na úhlu rohu od 50° do 180° (kde 90° znamená pravoúhlý roh a 180° znamená přímý úsek). Optimální hodnoty parametrů se neshodují s teoretickým výpočtem, protože do výpočtu byly zahrnuty pouze vlivy geometrické a kinematické. Počáteční experimenty naznačily, že zásadní vliv na výsledný návar má koncentrace tepelné energie v rozích, čímž dochází k přehřátí a následně nevyhovujícímu návaru. Tento tepelný jev byl teoreticky vysvětlen a potvrzen pomocí experimentálního měření teploty termokamerou. Přestože tento tepelný jev vyvstal jako problém, se kterým se na počátku výzkumu zcela nepočítalo, podařilo se vhodnou změnou parametrů svařovacího agregátu a korekcí dráhy tento problém zdárně vyřešit v celém rozpětí možných úhlů rohu, tedy 50° až 180° .

Cílem posledního experimentu bylo ověřit funkčnost všech korekcí na komplexním tvaru a vytvořit tak celý dílec, který slouží jako ukázka správné funkčnosti a významu experimentálně vyzkoumaných dráhových korekcí. Závěrečný experiment se zdařil a na vytvořeném dílci je vidět, že korekce fungují správně.

Řešení všech úkolů zadání diplomové práce je popsáno v jednotlivých kapitolách a upřesněno v přílohách.



Seznamy

Seznam obrázků:

Obrázek 1 Náhled na řešený problém	9
Obrázek 2 DMLS [8]	11
Obrázek 3 LASERTEC 30 SLM [12]	11
Obrázek 4 LMD [14]	12
Obrázek 5 Navařování el. obloukem [14]	13
Obrázek 6 Schéma navařovací metody MIG/MAG [5]	14
Obrázek 7 Svařovací robot a polohovací manipulátor [6]	15
Obrázek 8 Stabilní svařovací automat a polohovací robot [6]	15
Obrázek 9 HM dílce [13]	16
Obrázek 10 Schéma CNC [11]	17
Obrázek 11 Interpolace polohy [9]	18
Obrázek 12 Subsystemy CNC s příslušným časováním [9]	18
Obrázek 13 Schéma přípravy NC kódu [9]	20
Obrázek 14 Schéma funkce postprocesoru [9]	20
Obrázek 15 Podíl CAM softwarů u uživatelů [16]	21
Obrázek 16 Volba nástroje - laser	23
Obrázek 17 Definice geometrie	23
Obrázek 18 Dialogové okno metody	24
Obrázek 19 Výběr operace	24
Obrázek 20 Objem vytvořený jednou operací	24
Obrázek 21 Vizualizace tvorby housenek	24
Obrázek 22 Dráhy druhé operace	25
Obrázek 23 Dráhy třetí operace	25
Obrázek 24 Vizualizace postupné tvorby dílce	25
Obrázek 25 Vizualizace hotového dílce	25
Obrázek 26 Zkušební stroj pro HM v laboratořích RCMT	28
Obrázek 27 Svařovací agregát [10]	28
Obrázek 28 Řídicí panel [10]	28
Obrázek 29 Podavač drátu [10]	28
Obrázek 30 Umístění svařovacího hořáku	29



Obrázek 31 Princip CMT [10]	30
Obrázek 32 Oblast začátku a konce svarové housenky	32
Obrázek 33 Vyvařený vzorek kvádrů	33
Obrázek 34 Nerovnoměrná tvorba svarové housenky	33
Obrázek 35 Korigovaná dráha hořáku	34
Obrázek 36 Myšlenka korekce svařovacích parametrů v rohu kontury	34
Obrázek 37 Metoda 1 - řádkování	35
Obrázek 38 Metoda 2 - follow part inside kontinual	35
Obrázek 39 Metoda 3 - follow part outside	35
Obrázek 40 Metoda 4 - řádkování s konturou	35
Obrázek 41 Metoda 5 - follow part	35
Obrázek 42 Metoda 6 - follow part inside kontinual	35
Obrázek 43 Návar	36
Obrázek 44 Obrobené hrany	36
Obrázek 45 Aproximace tvaru průřezu svarové housenky	37
Obrázek 46 Tolerovaná dráha průjezdu ostrého rohu	38
Obrázek 47 Vyznačení rozměrů na průřezu svarové housenky	39
Obrázek 48 Graf znázorňující objem navíc při zpomalení posuvu	40
Obrázek 49 Geometrie rohového návaru	41
Obrázek 50 - při 120° je změna v rohu nepatrná	43
Obrázek 51 - při 50° je materiál navíc patrný	43
Obrázek 52 Výkres vzorku pro přímý návar	45
Obrázek 53 Vliv korekce dynamického pulzu	46
Obrázek 54 CAD model vzorku	47
Obrázek 55 Měření polohy dotykovou sondou	48
Obrázek 56 Obrazovka stroje při měření sondou	48
Obrázek 57 Vygenerovaná dráha frézování	49
Obrázek 58 Vygenerovaná dráha navařování	49
Obrázek 59 Vyfrézovaný vzorek	49
Obrázek 60 Destičky pro navařování	49
Obrázek 61 Navařeno	50
Obrázek 62 Hotový vzorek	50
Obrázek 63 CAD model pro rohový experiment	52
Obrázek 64 Vzorek pro 90°	53



Obrázek 65 Vzorek pro 70° a 110°	53
Obrázek 66 Vzorek pro 50° a 155°	53
Obrázek 67 Struktura programů v CAM	54
Obrázek 68 Dialogové okno frézování	55
Obrázek 69 Dialogové okno pro navařování	55
Obrázek 71 Dialogové okno navařování	55
Obrázek 71 Pásová pila	56
Obrázek 72 Nástrojařská frézka	56
Obrázek 73 Odvod tepla na přímém úseku	57
Obrázek 74 Odvod tepla v rohu kontury	57
Obrázek 75 Schéma návaru na přímém úseku	57
Obrázek 76 Schéma návaru v rohu kontury	57
Obrázek 77 Umístění termokamery	58
Obrázek 78 Pohled termokamery	58
Obrázek 79 Vzorek po měření teploty	58
Obrázek 80 Snímek návaru přímého úseku z termokamery	60
Obrázek 81 Snímek návaru rohu z termokamery	60
Obrázek 82 Vliv kombinace parametrů na tvar svarové housenky	61
Obrázek 83 Vnější kontura dílce pro závěrečný test	63
Obrázek 84 Virtuální model v NX	64
Obrázek 85 Plošný návar	65
Obrázek 86 Zarovnání horní plochy	65
Obrázek 87 Vyfrézování poličky	65
Obrázek 88 Navaření kontury	65
Obrázek 89 Hotový dílec na podložce	66
Obrázek 90 Bez použití korekcí jsou rohy kontury zaoblené	67
Obrázek 91 S korekcemi jsou všechny rohy kontury ostré	67



Seznam tabulek:

Tabulka 1 Shrnutí technologií	10
Tabulka 2 Společnosti produkující CAM software	21
Tabulka 3 Parametry CNC stroje	27
Tabulka 4 Vstupy a výstupy výpočtu	42
Tabulka 5 Proměnné parametry	50
Tabulka 6 Parametry prvního experimentu	51
Tabulka 7 Výsledné optimální parametry	51



Použité zdroje a literatura

- [1] KRUML, Vincenc, ŠTEFL, Milan. Transformátory pro obloukové svařování, Praha: SNTL, 1979. DT 621.314.2:621.791.75
- [2] LIPPOLD John C., Welding Metallurgy and Weldability, Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons Inc, 2015.424s. ISBN 978-1-118-23070-1
- [3] BANDYOPADHYAY, Amit, BOSE Susmita. Additive manufacturing, Boca Raton, CRC Press 2016. ISBN 978-1-4822-2359-0
- [4] FORNŮSEK, Tomáš, DIVIŠ, Ivan, SMOLÍK, Jan, Projekt HM E2-U1 ve vazbě na smlouvu SOD/KMAS/2014-HM
- [5] KOLEKTIV AUTORŮ. Technologie svařování a zařízení. 1. vyd. Ostrava: Zeross, 2001, 395 s. ISBN 8085771810.
- [6] ANDRLÍK, Vladimír, Automatizace výrobních strojů a zařízení, ČVUT v Praze 2016
- [7] JISKRA Milan, Diplomová práce – Porovnání CMT Twin s ostatními MIG/MAG procesy, VUT v Brně 2014
- [8] JALŮVKA Jakub, Bakalářská práce – Aditivní technologie a jejich využití pro výrobu galvanické cely, VUT v Brně 2017
- [9] ČERNÝ, Richard, VAVRUŠKA Petr, Výukové prezentace k předmětu NC výrobních strojů
- [10] Fronius Česká Republika, cit. 8.11. 2017
http://www3.fronius.com/cps/rde/xchg/fronius_ceska_republika
- [11] Obecný úvod do problematiky CNC programování, cit. 10.11. 2017
<http://docplayer.cz/162827-Obecny-uvod-do-problematiky-cnc-programovani.html>
- [12] Lasertec 30 SLM, cit. 10.11. 2017
<https://en.dmgmori.com/products/machines/advanced-technology/additive-manufacturing/powder-bed/lasertec-30-slm>
- [13] Weldprint MCV 5X, cit. 10.11. 2017
<https://www.kovosvit.cz/weldprint-mcv-5x-p44.html#files>
- [14] Článek o aditivní technologii, cit. 13.11. 2017
<https://www.industrial-lasers.com/articles/print/volume-250/issue-6/features/laser-metal-deposition.html>
- [15] Manuál Heidenhain, cit. 3.12. 2017
http://content.heidenhain.de/doku/tnc_guide/html/en/index/1242135142456/1242135142480/1242135142481/1242135142481.html



- [16] Anketa o CAM software, cit. 18.2. 2018
<https://www.cnccookbook.com/results-2016-cnccookbook-cam-survey/>
- [17] Informace od Siemensu o aditivních funkcích NX, cit. 28.5. 2018
<https://community.plm.automation.siemens.com/t5/News-NX-Manufacturing/Additive-Manufacturing-with-NX/ba-p/394140>
- [18] Informace o Edgecam, cit. 28.5. 2018
<https://advancedmanufacturing.org/all-in-with-additive/>
- [19] Informace o MasterCAM, cit. 28.5. 2018
<http://www.camufacturing.com/aplus.cshtml>
- [20] Návod pro Fronius agregát, cit. 5.6.2018
<http://www.fronius.com/cs-cz/czech-republic/perfect-welding/vyrobky/ru%C4%8Dn%C3%AD-sva%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD/migmag/transpuls-synergic/transpuls-synergic-cmt/transpuls-synergic-4000-cmt>
- [21] Thermal Conductivity of common Materials and Gases, cit. 23.6.2018
https://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html



Seznam příloh

Textové

Příloha 1	Materiálový list použitého drátu pro navařování
Příloha 2	Seznam použitých nastavení svářečky - JOBů
Příloha 3	Experimenty lineárního úseku
Příloha 4	Experimenty rohu
Příloha 5	Fotky z termokamery

Výkresová dokumentace

00-01	Vzorek pro lineární úsek
00-02	Podložka vzorku pro lineární úsek
01-01	Vzorek pro roh
01-02	Podložka vzorku pro roh

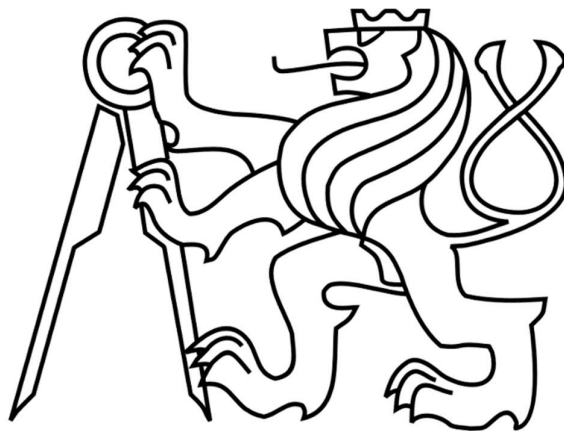
Elektronické

Všechny tištěné materiály jsou k dispozici také v elektronické formě v přiloženém souboru.

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



Diplomová práce

Návrh korekcí navařování konstrukční oceli pro
zlepšenou geometrii návaru na hranách

Textové přílohy

Příloha 1 Materiálový list použitého drátu pro navařování



MAG DRÁTY / *MAG PLNĚNÉ DRÁTY PRO NELEGOVANÉ OCELI			
Typ EN ISO 14341-A *17632-A AWS A5.18 *A5.36	min. mech. hodnoty při běžné teplotě (plyn M21)	chemické složení % Fe základ	vlastnosti a použití
Union K 40 G 35 A MZ G2Si ER70S-G / ER70S-3(mod.)	Rm 440 N/mm ² Re 360 N/mm ² A5 25 % Kv 80 J	C 0,1 Si 0,35 Mn 1,1	Poměděný drát se sníženým obsahem křemíku zejména pro svary elektrolyticky i žárově pozinkovaných tenkých plechů v ochranném plynu M12-M23. Ocel DC01 a DC01ZE až DC04 a DC04ZE, S220GD a S220GDZ až S350GD a S350 GDZ. Dodáván Ø 0,8-1,0-1,2.
Böhler EMK 6 Böhler EMK 6 - TOP G 42 4 M G3Si1 G 42 4 C G3Si1 ER70S-6	Rm 500 N/mm ² Re 420 N/mm ² A5 20 % Kv 100 J / 20°C Kv 47 J / -40°C	C 0,08 Si 0,9 Mn 1,45	Poměděný (EMK 6) a neproměděný (- TOP) přesně vlnutý drát pro svary nelegovaných ocelí ve směsném plynu i CO₂. Minimální rozstřík, výborné podávání, vyšší zatížitelnost usnadňuje svařování silnostěnných dílů. Např. pro zásobníky, kotle, konstrukce. Dodáván Ø 0,8-1,0-1,2-1,6. Schválení TÜV, DB, ABS, CWB, DNV, GL, LR, LTSS, SEPROZ, CE.
Böhler EMK 8 Böhler EMK 8 - TOP G 46 4 M G4Si1 G 46 4 C G4Si1 ER70S-6	Rm 530 N/mm ² Re 460 N/mm ² A5 20 % Kv 100 J / 20°C Kv 47 J / -40°C	C 0,1 Si 1 Mn 1,7	Poměděný (EMK 8) a neproměděný (- TOP) přesně vlnutý drát pro svary nelegovaných ocelí ve směsném plynu i CO ₂ . Minimální rozstřík, výborné podávání, vyšší zatížitelnost usnadňuje svařování silnostěnných dílů. Např. pro zásobníky, kotle, konstrukce. Dodáván Ø 0,8-1,0-1,2. Schválení TÜV, DB, ABS, DNV, G, LR, SEPROZ, CE, NAKS.
Böhler Ti 52 T-FD *T 46 4 P M 1 H5 *T 46 2 P C 1 H5 *E71T1-M21A4-CS1-H4 *E71T1-C1A2-CS1-H4	Rm 550 N/mm ² Re 460 N/mm ² A5 20 % Kv 100 J Kv 47 J / -40°C	C 0,05 Si 0,5 Mn 1,3	Plněný, rutilový, zcela uzavřený bezešvý drát s rychle tuhnoucí struskou pro nelegované a nízkolegované oceli ve všech polohách při vyšších parametrech. Výborná svařitelnost kořene na keramické podložce, výborné ovládnutí, klidný oblouk, minimální rozstřík, RTG čistý hladký svar bez vrubů, snadné odstranění strusky. Ochranný plyn M21-M35, C1. Dodáván Ø1,0-1,2-1,4-1,6. Schválení TÜV-D, DB, GL, DNV, ABS, LR, BV, RINA, RS, CE.
Böhler HL 51 T-MC *T 46 6 M M 1 H5 *T 42 5 M C 1 H5 *E70C-6MH4	Rm 530 N/mm ² Re 460 N/mm ² A5 20 % Kv 120 J 47 J / -40°C 47 J / -60°C	C 0,06 Si 0,7 Mn 1,6	Plněný, zcela uzavřený bezešvý drát s náplní kovového prášku pro nelegované a nízkolegované oceli. Vysoký výkon odtavení a výtěžnost, stabilní sprchový oblouk, velmi dobrý průvar, velmi nízká tvorba kouře, oxidů, RTG čistý hladký konkávní svar bez porů a rozstříku. Vysoká houževnatost při nízkých teplotách. Ochranný plyn M21, C1. Dodáván Ø 1,0-1,2-1,4-1,6. Schválení TÜV-D, DB, GL, DNV, ABS, LR, BV, RINA, CWB, CE.
Böhler Kb 52 T-FD *T46 6 B M 3 H5 *T42 4 B C 3 H5 *E70T15-M21A8-CS1-H4 *E70T15-C1A6-CS1-H4	Rm 550 N/mm ² Re 460 N/mm ² A5 20 % Kv 120 J 47 J / -40°C 47 J / -60°C	C 0,05 Si 0,6 Mn 1,4	Plněný, bazický, zcela uzavřený bezešvý drát pro houževnaté svary bez omezení tloušťky stěny. Výborné vlastnosti analogické k elektrodám typu 7018. Výborný dále pro odlitky, výplň pod tvrdé návary na nelegované oceli a spoje různých nelegovaných ocelí mezi sebou. Dodáván Ø 1,2-1,4-1,6. Ochranný plyn M21-M35, C1. Schválení TÜV, DB, GL, DNV, ABS, LR, BV, RINA, CE.
Böhler Ti 52 NG T-FD *T 46 Z Y N 1 *E71T11-AZ-CS3-H8	Rm 550 N/mm ² Re 460 N/mm ² A5 20 % Kv neměří se	C 0,25 Si 0,4 Mn 1 Al 1,5	Plněný, zcela uzavřený bezešvý drát pro svary nelegovaných a nízkolegovaných ocelí bez ochranného plynu ve všech polohách. Rychle tuhnoucí struska, hladký svar. Zejména montáže s nižšími nároky na vrubovou houževnatost a pro hobby použití. Dodáván Ø 0,8-0,9-1,0-1,2, Ø 0,8-0,9-1,0 i na malých cívkách. Schválení CE.

MAG DRÁTY / *MAG PLNĚNÉ DRÁTY PRO OCELI ODOLNÉ POVĚTRNOSTNÍM VLIVŮM A OCELI HOUŽEVNATÉ ZA NÍZKÝCH TEPLŮT			
Typ EN ISO 14341-A *17632-A AWS A5.28 *A5.18 **A5.36	min. mech. hodnoty při běžné teplotě (plyn M21)	chemické složení % Fe základ	vlastnosti a použití
Union Patinax G 42 3 C G0 G 46 4 M G0 *ER70S-G	Rm 590 N/mm ² Re 480 N/mm ² A5 24 % Kv 100 J Kv 47 J / -40°C	C 0,09 Si 0,85 Mn 1,5 Ni 0,5 Cu 0,4	Poměděný drát pro svary ocelí odolných povětrnostním vlivům, např. Corten, Patinax, Atmosf. Pro části budov, stožáry, mostní konstrukce, kolejová vozidla. Ochranný plyn M21, C1. Dodáván Ø 0,8-1,0-1,2. Schválení TÜV, DB.
Union K 5 Ni G 46 3 C G3Ni1 G 50 5 M G3Ni1 ER80S-G	Rm 600 N/mm ² Re 500 N/mm ² A5 25 % Kv 130 J Kv 47 J / -50°C	C 0,1 Si 0,7 Mn 1,4 Ni 1,4	Poměděný drát pro svary s vysokou čistotou a vysokou houževnatostí za nízkých teplot. Pro oceli S355NL-S500QL, 15MnNi63 atd. Ochranný plyn M1-M3, C1. Dodáván Ø 1,0-1,2. Schválení TÜV, DB.
Böhler 2,5 Ni-IG G 46 8 M G2Ni2 G 46 6 C G2Ni2 ER80S-Ni2 / ER55S-Ni2	Rm 550 N/mm ² Re 470 N/mm ² A5 20 % Kv 120 J Kv 47 J / -80°C	C 0,08 Si 0,6 Mn 1 Ni 2,4	Poměděný drát pro svary niklem legovaných ocelí, jemnozrných ocelí houževnatých za nízkých teplot, houževnatých konstrukčních a speciálních lodních ocelí. Výsoce jakostní spoje zásobníků a potrubních systémů až do -80°C. Ocel 12Ni14, 14Ni6, 10Ni14, 13MnNi6-3, P355NL1-P460NL1, P355NL2-P460NL2, S255N-S460N, S355NH-S460NH, S255NL-S460NL, S255NL1-S380NL1. Ochranný plyn M21, C1. Dodáván Ø 1,0-1,2. Schválení TÜV, DB, ABS, BV, DNV, GL, LR, SEPROZ, CE.
Böhler HL 53 T-MC *T50 6 1 Ni M M 1 H5 **E80T15-M21A8-Ni1-H4	Rm 570 N/mm ² Re 500 N/mm ² A5 18 % Kv 110 J Kv 47 J / -60°C	C 0,06 Si 0,5 Mn 1,3 Ni 1	Plněný, zcela uzavřený bezešvý drát s náplní kovového prášku pro ne- a nízkolegované a jemnozrné oceli s vysokou houževnatostí za nízkých teplot. Výborná svařitelnost, vysoká zatížitelnost, hladký a čistý svar s vysokými mechanickými hodnotami. Oceli až S500QL. Ochranný plyn M21. Dodáván Ø 1,0-1,2-1,4-1,6. Schválení TÜV-D, GL, DNV, CE.
Böhler Ti 60 T-FD *T50 6 1 Ni P M 1 H5 *T46 4 1 Ni P C 1 H5 **E81T1-M21A8-Ni1-H4 **E81T1-C1A4-Ni1-H4	Rm 560 N/mm ² Re 500 N/mm ² A5 18 % Kv 110 J Kv 47 J / -60°C	C 0,07 Si 0,45 Mn 1,3 Ni 0,85	Plněný, rutilový, zcela uzavřený bezešvý drát s rychle tuhnoucí struskou pro ne- a nízkolegované a jemnozrné oceli s vysokou houževnatostí za nízkých teplot. Vynikající svařitelnost ve všech polohách při vyšších parametrech, hladký a čistý svar s vysokými mechanickými hodnotami. Oceli až S500QL. Ochranný plyn M21. Dodáván Ø 1,0-1,2. Schválení TÜV-D, DB, GL, DNV, ABS, LR, BV, RINA, RS, CWB, CE.

Příloha 2 Seznam použitých nastavení svářečky – JOBů

JOB	Strategie	Prisun drátu [m/min]	Korekce dyn. pulzu
800	1370	4	0
801	1370	4.5	0
802	1370	5	0
803	1370	5	2.5
804	1370	5	5
805	1370	5.5	5
806	1370	6	5
807	1360	6	5
808	1355	6	5
809	1360	6.5	5
810	1360	7	5

811	1360	3.5	5
812	1360	5	5
813	1360	1.8	5
814	1360	2	5

Příloha 3 Experimenty lineárního úseku

Číslo pokusu	Výška poličky h [mm]	Rozsah šířky poličky b [mm]	Poloha osy drátu o [mm]	Svařovací JOB	Pracovní posuv vf [mm/min]	Fotografie	Zhodnocení
1	2	1 až 5	0.5 až 2.5	800	500	1n a 1ob	odlehlo od vnitřní stěny málo materiálu na vnější hraně
2	2	1 až 5	0.5 až 2.5	801	500	2n a 2ob	odlehlo od vnitřní stěny málo materiálu na vnější hraně
3	2	1 až 5	0.5 až 2.5	802	500	3n a 3ob	odlehlo od vnitřní stěny vnější hrana docela v pořádku
4	2	1 až 5	0.5 až 1.75	802	500	4n a 4ob	dobré přilnutí k vnitřní stěně málo materiálu na vnější hraně
5	2	2.5 až 5	1.25 až 1.75	803	500	neni	odfrezovano
6	2	2.5 až 5	1.25 až 1.75	803	500	6n a 6ob	přilnutí k vnitřní stěně těsně nevyhovující málo materiálu na vnější hraně
7	2	2.5 až 5	1.25 až 1.75	804	500	7n a 7ob	přilnutí k vnitřní stěně těsně nevyhovující málo materiálu na vnější hraně
8	2	2.5 až 5	1.25 až 1.75	805	500	8n a 8ob	přilnutí k vnitřní stěně špatné jen těsně u středu málo materiálu na vnější hraně
9	2	2.5 až 5	1.25 až 1.75	806	500	9n a 9ob	dobré přilnutí k vnitřní stěně málo materiálu na vnější hraně
10	2	3 až 5	1.5 až 2	806	500	10n a 10ob	dobré přilnutí k vnitřní stěně málo materiálu na vnější hraně
11	2	3 až 5	1.75 až 2.25	806	500	11n a 11ob	přilnutí k vnitřní stěně těsně nevyhovující málo materiálu na vnější hraně
12	2	3 až 5	1.75 až 2.25	807	500	12n a 12ob	přilnutí k vnitřní stěně špatné jen těsně u středu málo materiálu na vnější hraně
13	2	3 až 5	1.75 až 2.25	808	500	13n a 13ob	přilnutí k vnitřní stěně těsně nevyhovující málo materiálu na vnější hraně
14	2	3 až 5	1.75 až 2.25	809	500	14n a 14ob	dobré přilnutí k vnitřní stěně drobný nedostatek materiálu na vnější hraně
15	2	3 až 5	1.75 až 2.5	809	500	15n a 15ob	vyhovující
16	2	5	2.25	809	500	16n a 16ob	dobré přilnutí k vnitřní stěně málo materiálu na vnější hraně
17	2	5	2.4	810	500	17n a 17ob	dobré přilnutí k vnitřní stěně drobný nedostatek materiálu na vnější hraně
18	2	5	2.5	810	500	18n a 18ob	dobré přilnutí k vnitřní stěně drobný nedostatek materiálu na vnější hraně
19	2	5	2.55	810	500	19n a 19ob	vyhovující



1n



1ob



2n



2ob



3n



3ob



4n



4ob



6n



6ob



1n



7ob



8n



8ob



9n



9ob



10n



10ob



11n



11ob



12n



12ob



13n



13ob



14n



14ob



15n



15ob



16n



16ob



17n



17ob



18n



18ob



19n





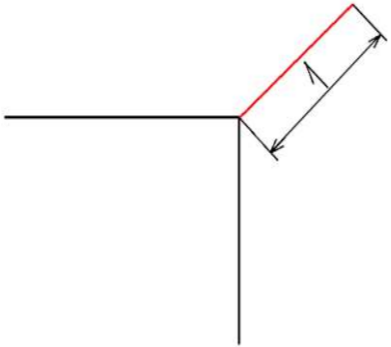


19ob

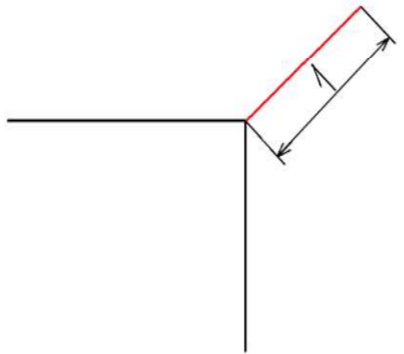


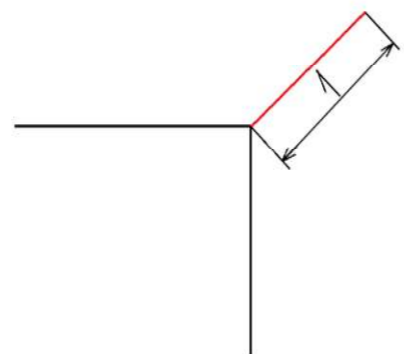


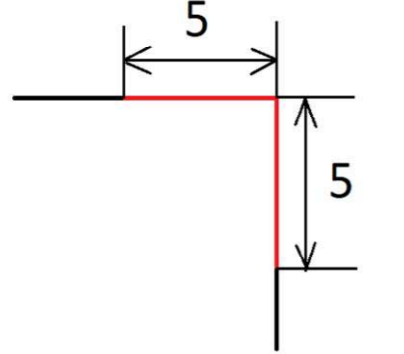


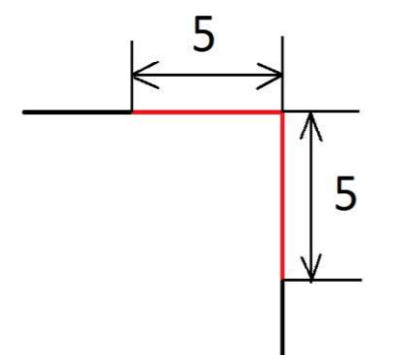


Příloha 4 Experimenty rohu

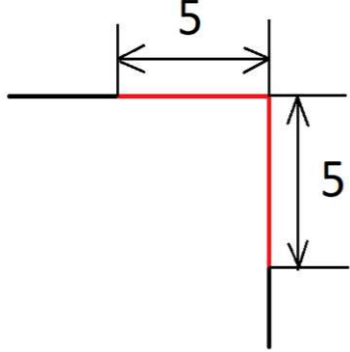


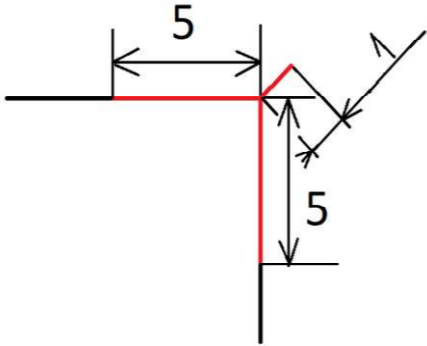


Úhel kontury - 70°

Číslo pokusu	Svařovací JOB	Pracovní posuv v kritické oblasti v_f [mm/min]	Dráhová korekce	Fotografie		Popis a zhodnocení
1	814	80	žádná			Na levé fotografii na levé straně je vidět, že bez korekce je návar jasně nevyhovující.

Úhel kontury - 90°

Číslo pokusu	Svařovací JOB	Pracovní posuv v kritické oblasti v_f [mm/min]	Dráhová korekce	Fotografie		Popis a zhodnocení
1	základní	základní	žádná			Jak je vidět na straně vzorku označené "1" Tvořit ostrý roh bez korekce dráhy nelze.
2	811	základní				Prvním nápadem bylo dostat více materiálu do oblasti rohu delším pobytem hořáku v oblasti rohu. Proto zde bylo vytvořeno "kmitnutí" malou rychlostí a upraveným výkonem hořáku tam a zpět, jak je zobrazeno na schématu dráhové korekce. Byla tímto pricipem vyzkoušena tři různá nastavení parametrů výkonu navařování a rychlosti posuvu hořáku. Žádné z těchto řešení návar v rohu nezlepšuje.

3	základní	základní				viz. Číslo pokusu 2
4	812	základní				viz. Číslo pokusu 2
5	813	125				<p>Další možností pro experiment bylo snížení posuvu hořáku při současném snížení výkonu svařovacího zdroje. Toto nastavení bylo provedeno tak, že teoretický průřez tvořené housenky Q_s je větší než průřez Q_s v lineárním úseku, aby se pokryl nedostatek materiálu v rohu. Výsledek ukázal to, že změnou výkonu svařování a rychlosti posuvu se mění tvar průřezu vytvořené housenky. Housenka je v tomto případě vyšší a užší. V rohu se pak tvoří mezery, jak je vidět na fotografii.</p>
6	814	100				<p>Postupné ladění parametrů výsledný návar zlepšuje, ale ne dostatečně.</p>

7	814	80				viz. Číslo pokusu 6
8	814	80				Kombinace "kmitnutí" a změněného výkonu má pozitivní vliv, ale výsledek je stále nedostatečný. Odlehnutí v lineárním úseku bylo způsobeno špatným seřízením souřadného systému navařovacího hořáku. Chyba seřízení byla však zjištěna a podchycena až později.



Úhel kontury - 110°

Číslo pokusu	Svařovací JOB	Pracovní posuv v kritické oblasti v_f [mm/min]	Dráhová korekce	Fotografie	Popis a zhodnocení
1	814	80	žádná		Na prvním vzorku je jasně patrné, že pro úhel kontury 110 stupňů nelze navařováním bez korekce vytvořit požadovaný tvar ostrého rohu. Viz pravá fotka, pravá dolní část vzorku.

Úhel kontury - 160° až 175°

Číslo pokusu	Svařovací JOB	Pracovní posuv v kritické oblasti vf [mm/min]	Dráhová korekce	Fotografie	Popis a zhodnocení
1	810	základní	žádná		Návar v rohu kontury je podle experimentu vyhovující pro úhly 165, 170 a 175 stupňů. Kvůli postihnutí náhodných jevů při navařovacím procesu je závěr takový že, pro úhel 170 až 180 stupňů není třeba používat korekce.

Radiusy

Číslo pokusu	Svařovací JOB	Pracovní posuv v kritické oblasti vf [mm/min]	Dráhová korekce	Fotografie	Popis a zhodnocení
1	810	základní	žádná		Obráběné poloměry byly na tomto vzorku 4,5; 5; 5,5 a 6 mm. Žádný z nich není vyhovující
2	810	základní	žádná		Obráběné poloměry byly na tomto vzorku 6; 6, ; 7 a 7,5 mm. Poloměry 6,5 ; 7 a 7,5 jsou vyhovující. Aby byly postihnuty i náhodné jevy při navařovacím procesu, lze s jistotou prohlásit, že pro radius 7mm a větší není třeba korekce dráhy.



Preventive Maintenance Inspection

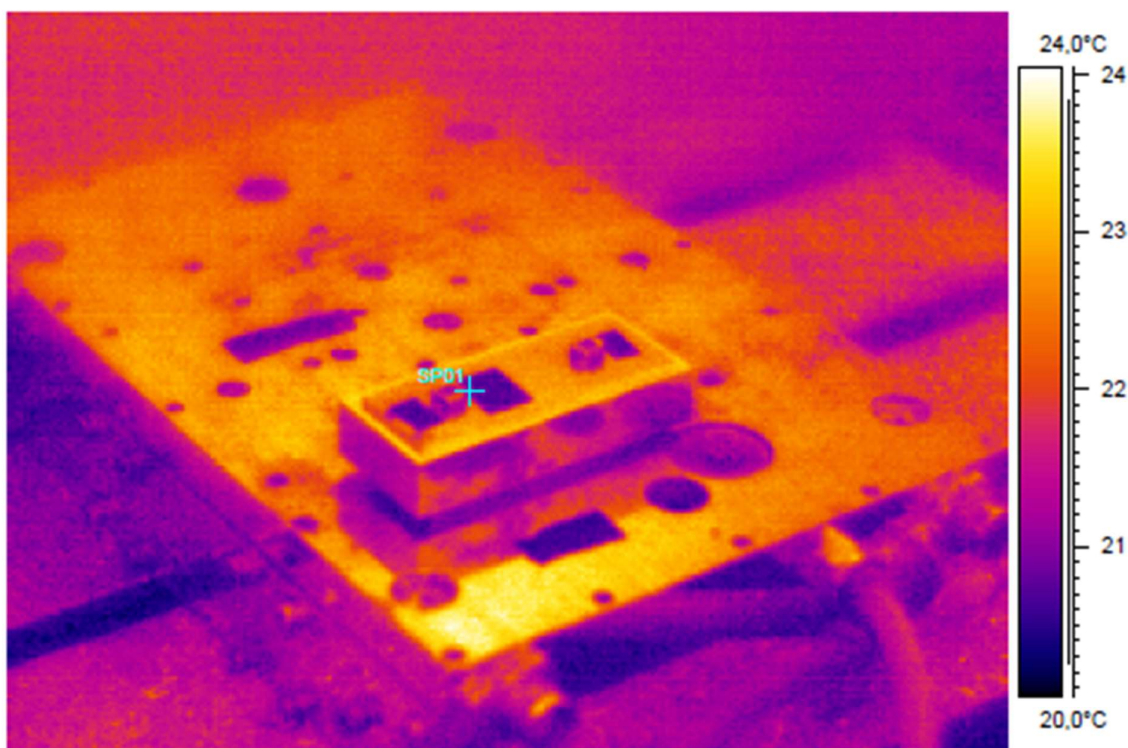
Date:

27.4.2018

This report was made with a ThermaCAM from FLIR Systems AB.

See the summary at the end for details.

File name	Time	Date
I0405-03.img	10:15:13	5.4.2018



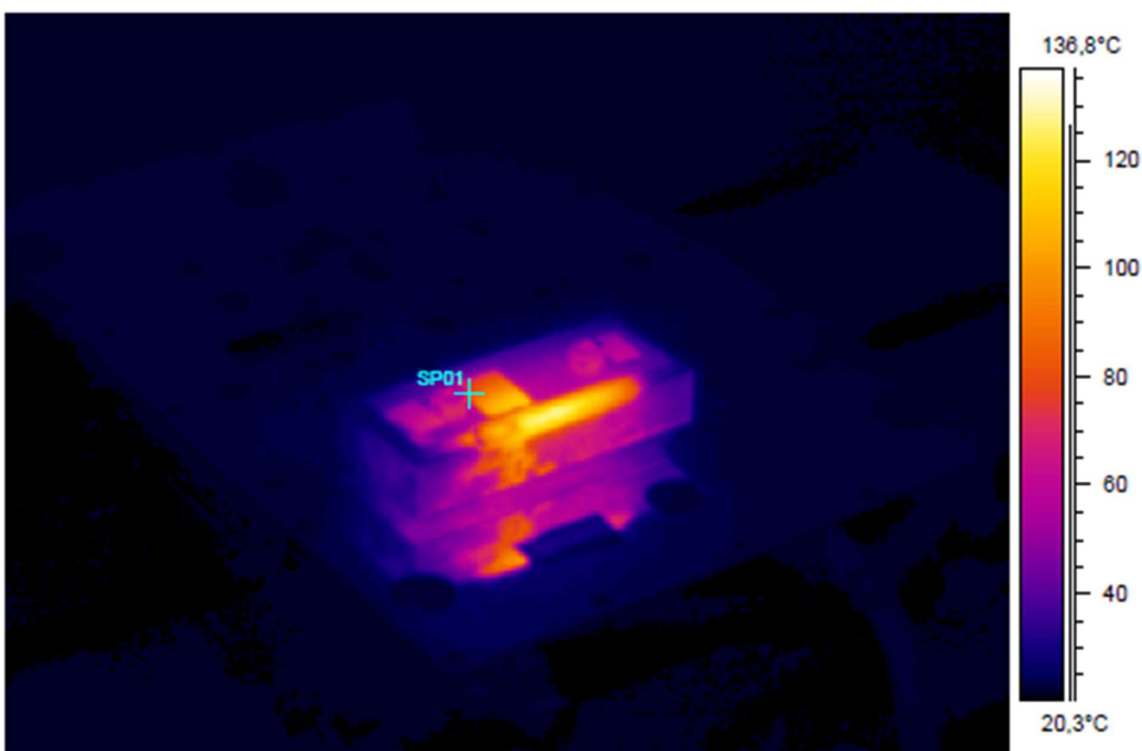
IR Text Comment	Value
Section	Room
Equipment	
Additional information	
Fault	
Recommendation	No action

Object parameter	Value	
Emissivity	0,96	-
Object distance	2,0 m	-
Ambient temperature	20,0°C	-
Reference temperature	*	-
Label	Value	Diff temperature
IR : max	24,0°C	-
IR : min	20,2°C	-
SP01	21,0°C	*

Description

Place for individual description.

File name	Time	Date
I0405-05.img	10:16:12	5.4.2018



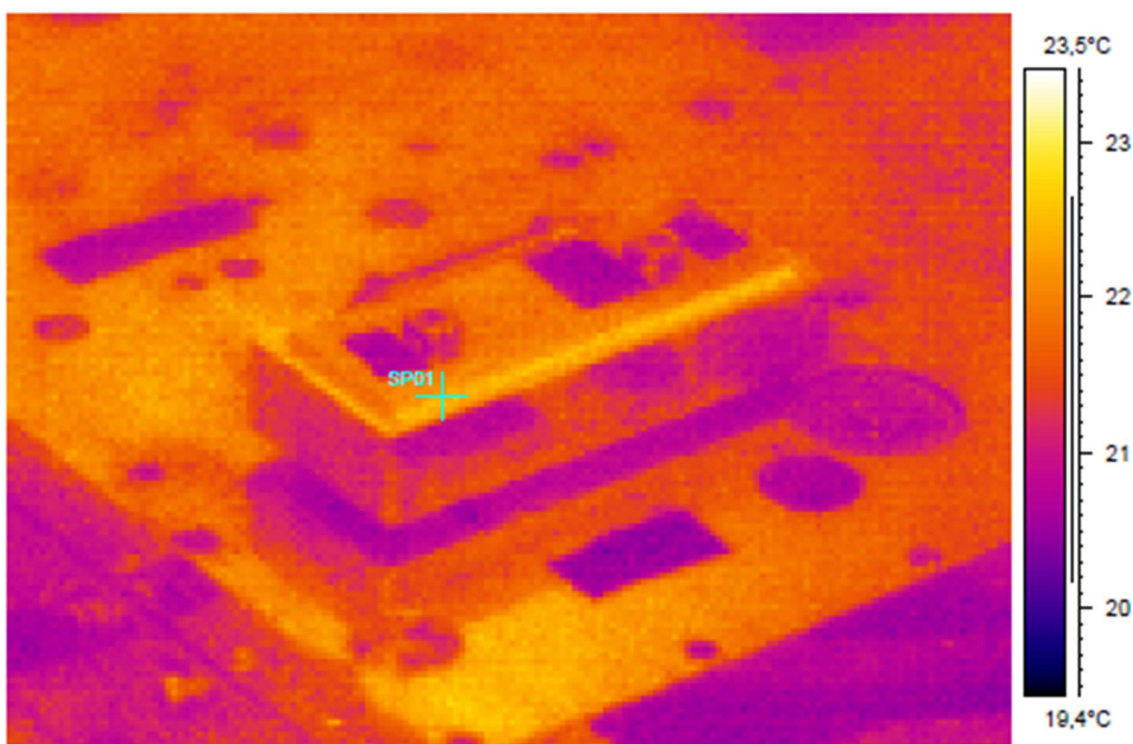
IR Text Comment	Value
Section	Room
Equipment	
Additional information	
Fault	
Recommendation	No action

Object parameter	Value	
Emissivity	0,96	-
Object distance	2,0 m	-
Ambient temperature	20,0°C	-
Reference temperature	*	-
Label	Value	Diff temperature
IR : max	128,6°C	-
IR : min	20,1°C	-
SP01	78,0°C	*

Description

Place for individual description.

File name	Time	Date
I0405-16.img	10:34:09	5.4.2018



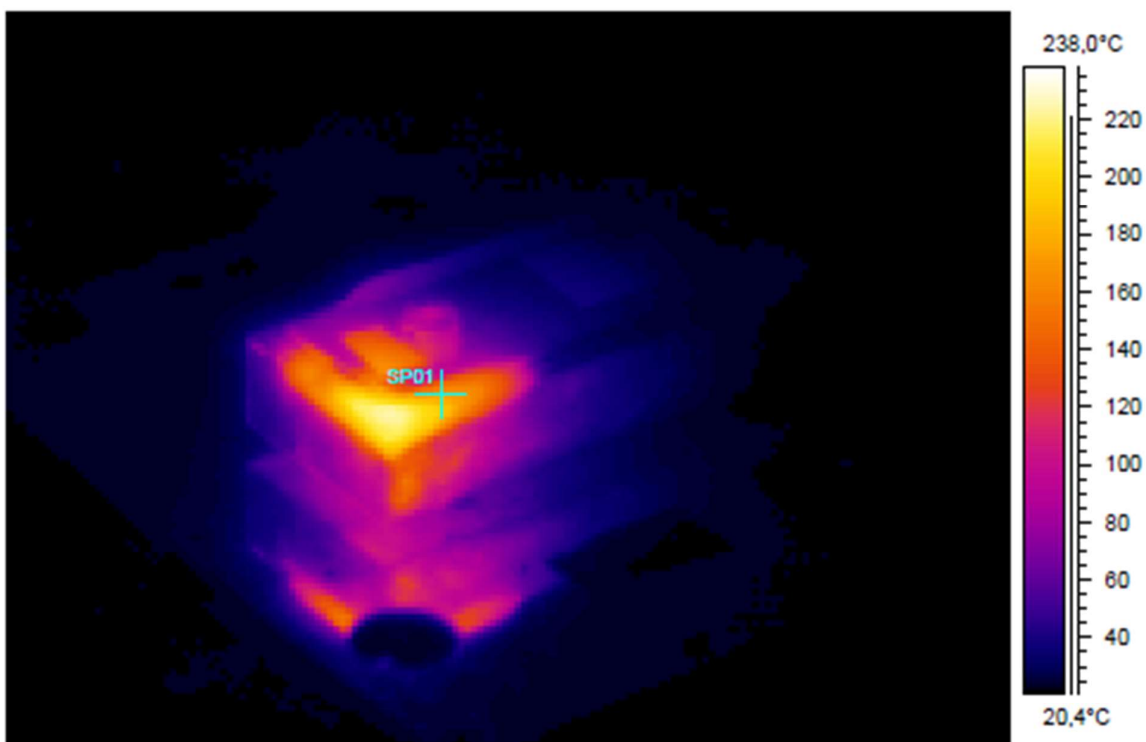
IR Text Comment	Value
Section	Room
Equipment	
Additional information	
Fault	
Recommendation	No action

Object parameter	Value	
Emissivity	0,96	-
Object distance	2,0 m	-
Ambient temperature	20,0°C	-
Reference temperature	*	-
Label	Value	Diff temperature
IR : max	23,1°C	-
IR : min	20,1°C	-
SP01	22,4°C	*

Description

Place for individual description.

File name	Time	Date
I0405-18.img	10:34:59	5.4.2018



IR Text Comment	Value
Section	Room
Equipment	
Additional information	
Fault	
Recommendation	No action

Object parameter	Value	
Emissivity	0,96	-
Object distance	2,0 m	-
Ambient temperature	20,0°C	-
Reference temperature	*	-
Label	Value	Diff temperature
IR : max	*226,3°C	-
IR : min	20,0°C	-
SP01	180,5°C	*

Description

Place for individual description.