

# Korekce dráhového řízení a výkonu pro optimalizaci polohy a tvaru návaru metodou WAAM

Vojtěch Votruba

ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav výrobních strojů a zařízení, Technická 4, 166 07 Praha 6, Česká republika

## Abstrakt

Práce se zabývá návrhem korekcí navařování pro aditivní, resp. hybridní výrobu metodou WAAM. Téma doktorské práce navazuje na vlastní diplomovou práci z roku 2018. Experimenty navařování probíhají v laboratořích RCMT za použití svařovacího agregátu Fronius CMT Advanced 4000R a 3osého CNC stroje Bridgeport VMC 500 XP s řídicím systémem Heidenhain iTNC 530. Nezbytná tvorba NC programů je zajištěna softwarem Siemens NX.

*Klíčová slova:* WAAM, dráhové korekce, hybridní technologie

## 1. Úvod

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 práce zkoumá možnost využít korekci polohy dráhy navařování a nastavení procesních parametrů elektrického oblouku pro spolehlivé zajištění objemu navařeného materiálu v celé kontuře.

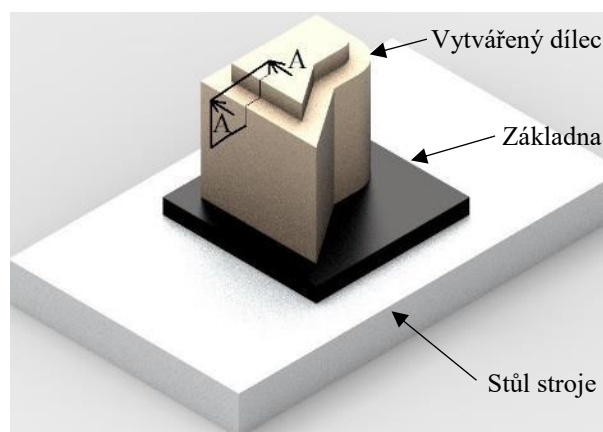
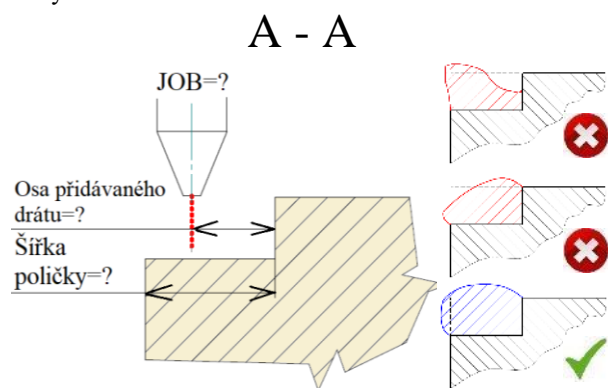
Diplomová práce z roku 2018 [5] se zabývala zejména situacemi, které vyžadovaly změnu množství přidávaného materiálu. Tyto situace nastávají v místech kontury, kde se nachází ostrý roh a navařovací hlava se tudíž pohybuje sníženou rychlostí. Již nyní je technologicky zvládnutá strategie bodového navařování, práce se bude zabývat kontinuální svařovací strategií. Jedním z problémů kontinuálního navařování je fakt, že kromě nejnovějších svařovacích agregátů nelze řídit spojitě množství materiálu dodávaného navařováním na dílec. Standartně je k dispozici pouze konečné množství odladěných kombinací navařovacích parametrů čerpající z referenčních nastavení výrobce. Tyto odladěné kombinace svařovacího agregátu se nazývají „JOBy“. Cílem diplomové práce bylo navrhnout a experimentálně ověřit korekci dráhy navařovacího hořáku a sekvenci „JOBů“, která by byla technologicky vhodná pro kritická místa, jako jsou například ostré rohy. Experimentální výzkum probíhal 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 umístit materiál. Tohoto principu je možné s výhodou využít právě u kontur. Před každým navařováním

kontury jsou přesně obrobeny plochy, na které je návar kontury umísťován. 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 svařových housenkách vedle sebe, je vhodné okraj vrstvy vyfrézovat, čímž vznikne „polička“. Cílem výzkumu bylo najít optimální parametry pro návar kontury v oblasti poličky.

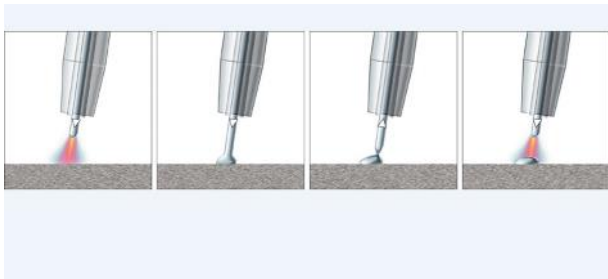


Obr. 1 Náhled na řešený problém

## 2. Technologie WAAM

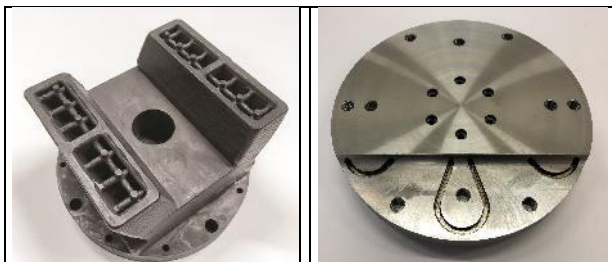
Je zřejmé, že aditivní technologie nemůže nyní ani v blízké budoucnosti zcela nahradit všechny ostatní konvenční metody jako slévání, tváření či obrábění. Nicméně aditivní výroba postupně zaujímá svou pozici mezi konvenčními metodami, protože dovoluje vyrábět dílce velmi složitých tvarů (konvečně nevyrobitelných) nebo z těžko obrobitelných materiálů. Další uplatnění je možné i v opravárenství opotřebovaných dílců.

Metod aditivní výroby kovových dílců je v dnešní době celá řada [3], zde se řeší pouze metoda WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing). Jak již název napovídá, jedná se o navařování kovu za pomoci elektrického oblouku, nejčastěji metodou MIG/MAG. Speciální formou této metody je CMT (Cold Metal Transfer). 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. Při dopadu kapky na základní materiál chvilkově neprochází svarem elektrický proud. Jak uvádí literatura [1] [2], 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 2, 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 2 znázorňuje sekvenci tvorby jedné kapky u CMT svařování. [6]



Obr. 2 Princip CMT [5]

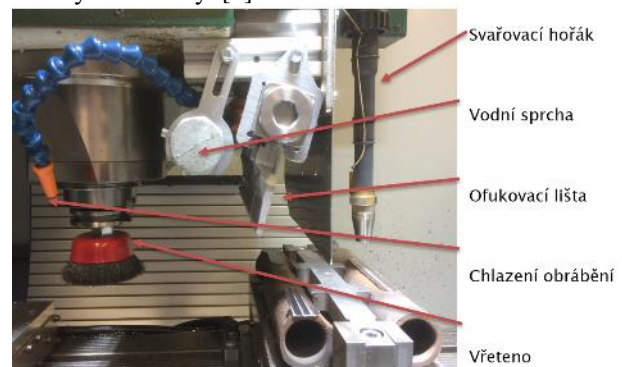
Hlavním důvodem použití svařovací metody CMT v hybridním navařovacím stroji je mnohem menší teplotní ovlivnění základního dílce než při běžné konvenční MIG/MAG metodě. Díky tomu je možné postupně vyvařovat tenkostěnné struktury o mnoha vrstvách, aniž by hrozilo roztavení předchozích nanesených vrstev.



Tab. 1 Ukázkové dílce hybridní výroby WAAM

### 3. Technické podmínky pro vývoj korekcí navařování

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 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. [4]



Obr. 3 Pracovní prostor hybridního stroje [4]

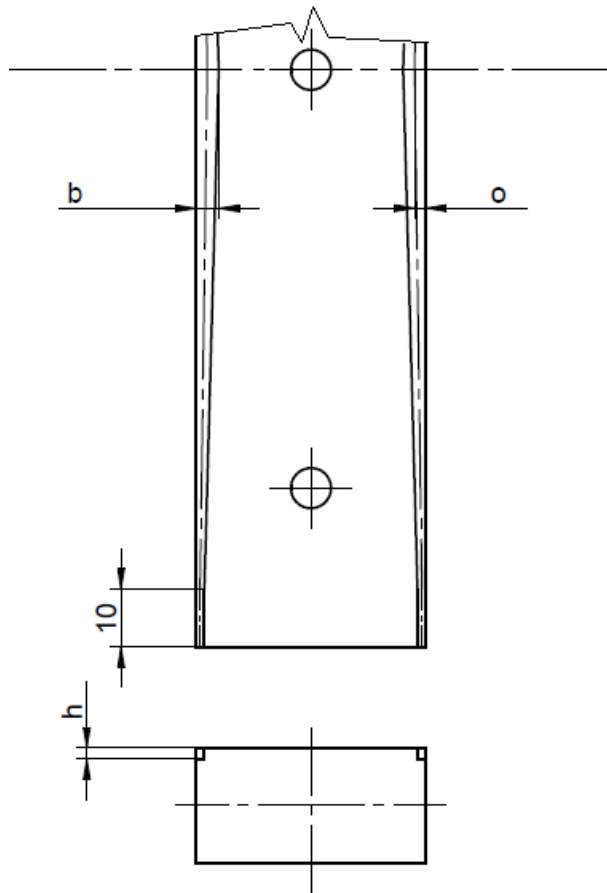
Svařovací agregát lze nastavovat a ovládat buď pomocí řídicího panelu nebo přes připojený počítač pomocí softwaru Fronius Explorer. Agregát komunikuje se strojem po sběrnici AB Profibus Fronius. Nastavení agregátu funguje na bázi referencí. Protože přesná specifikace CMT svařovacího procesu je složitá a obsáhlá, volba určité výrobce 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.

### 4. Experimenty navařování

#### 4.1. Experiment pro optimalizaci navařování na přímém úseku kontury

Prvním krokem byla optimalizace navařovacích parametrů pro přímý úsek kontury. Navařovacím materiálem byl drát Böhler G3Si1 a podkladovým materiálem byla konstrukční ocel 11 373. Cílem je dosáhnout stabilního navařovacího procesu, který správně vyplní materiálem poličku o šířce  $b = 5$  mm a výšce  $h = 2$  mm. Optimalizovanými parametry byla poloha osy hořáku  $o$ , svařovací výkon a korekce dynamického pulzu navařování  $K$  (parametr svařovacího zdroje, který ovlivňuje množství tepla vneseného do návaru). Posuv stroje při navařování byl zvolen  $f = 500$  mm/min kvůli zachování dostatečné produktivity procesu. Reference svařovacího procesu se tes-

tovala CMT1355, CMT1360 a CMT1370, což jsou reference doporučené výrobcem (Fronius) pro navařování konstrukční oceli.



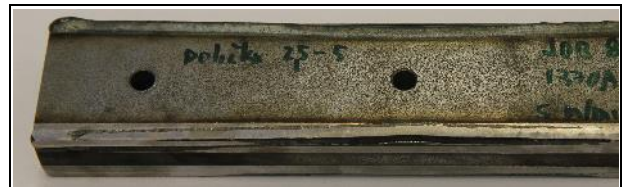
Obr. 4 Návrh zkušební vzorku pro lineární úsek

Testovací vzorek byl navržen tak, aby se šířka poličky **b** i poloha osy hořáku **o** plynule měnila v průběhu návaru. Pozorovatel tedy může po provedení experimentu rychle vyhodnotit jaká šířka poličky byla správně vyplněna návarem. Z toho se pak usuzovalo, jaké navařovací parametry měnit. Počáteční odhad navařovacích parametrů byl proveden výpočtem za použití rovnice kontinuity (posuv stroje a požadovaný průřez návaru odpovídá posuvu drátu a průměru tohoto drátu).

Bylo vytvořeno 16 testovacích vzorků pro přímý úsek konturového návaru. Každý vzorek obsahuje 2 návary s identickými parametry, z nichž 1 návar je obroben, aby se posoudilo správné vyplnění materiálem. Postupně se dospělo k optimálním parametrům. Pro názornost jsou v tabulce 2 ukázány i vzorky s nevyhovujícími navařovacími parametry.



Vzdálenost hořáku od stěny je příliš velká, dochází ke vzniku vady.



Výkon navařování je příliš malý. Materiál chybí na vnější hraně i ani není spojen se stěnou poličky.



Materiál chybí na vnější hraně. Pro správné vyplnění materiálem je třeba zvýšit navařovací výkon, nebo zvětšit osovou vzdálenost hořáku **o**.



Správné vyplnění materiálem.

Tab. 2 Experimenty navařování přímého úseku

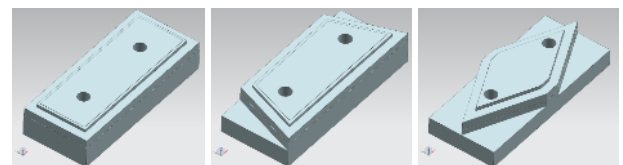
Parametry, kdy byla geometrie správně vyplněna navařeným materiálem jsou uvedeny v tabulce 3.

šířka poličky <b>b</b>	5 mm
výška poličky <b>h</b>	2 mm
poloha osy hořáku <b>o</b>	2,55 mm
reference svařovací strategie	CMT1360
přísun drátu	7 m/min
korekce dynamického pulzu <b>K</b>	5

Tab. 3 Optimální parametry pro lineární úsek

#### 4.2. Experiment pro optimalizaci navařování v rohu kontury

Navařovaly se vzorky s různými úhly v rohu kontury tak, aby se pokrylo co nejširší spektrum úhlů. Prakticky se daly realizovat úhly rohu od 50° do 180°.

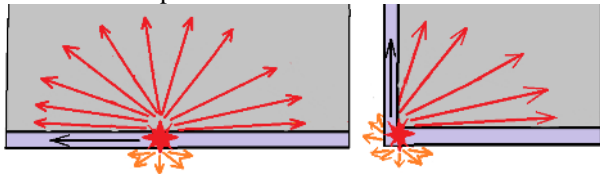


Obr. 5 Vzorky pro různé úhly rohu kontury

V původních předpokladech se s tepelnou energií nepočítalo. Složitost matematických výpočtů by v případě zahrnutí vedení tepla ze svaru do zbytku polotovaru a do okolí byla mimo možnosti tvůrce diplomové práce. První čtyři experimenty pro rohovou konturu ukázaly, že vliv koncentrace tepla je stejně důležitý jako geometrie rohu.

Je zřejmým faktem, že ocel má ve srovnání se vzduchem o mnoho větší tepelnou vodivost. Dle zdroje [7] je součinitel tepelné vodivosti  $\lambda_{ocel} = 73 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  zatímco

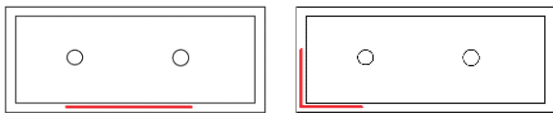
$\lambda_{\text{vzduch}} = 0,026 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ . To je přibližně 3000 krát více. Když se uváží i to, že zdroj tepla je pohyblivý (pohybující se hořák), lze načrtnout následující zjednodušená schémata odvodu tepla.



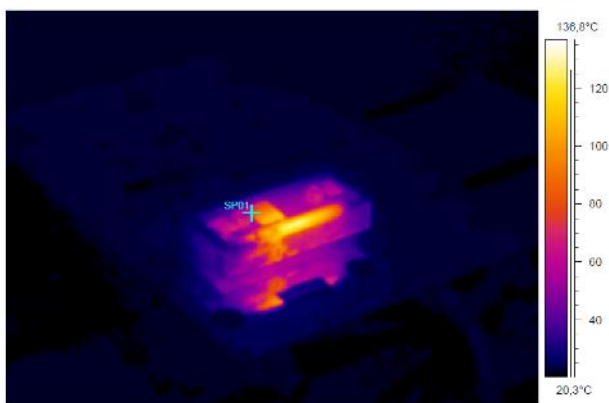
Obr. 6 Schéma porovnávající odvod tepla

Černá šipka znázorňuje směr pohybu hořáku. Červené šípky 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 sečením 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.

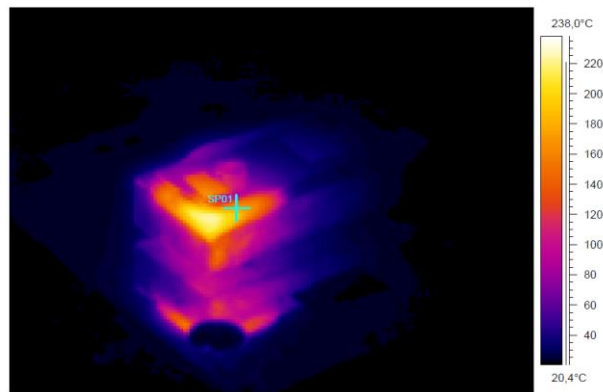
Tato tvrzení jsou podložena teoretickými znalostmi, ovšem bylo vhodné ověřit tuto myšlenku praktickým experimentem. Ten probíhal tak, že se provedl stejně dlouhý návar na přímém úseku a posléze v rohu. K měření teploty byla využita termokamera, která ovšem nemůže snímat oblast návaru přímo při procesu navařování, neboť není přizpůsobena infračervenému záření vznikajícímu při tak vysoké teplotě. Postupovalo se tedy tak, že se teplota snímala až těsně po ukončení navařování a otevření ochranného krytu stroje.



Obr. 7 Schéma návaru pro porovnání teploty



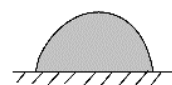
Obr. 8 Teplota vzorku na přímém úseku byla těsně po navařování přibližně 137°C



Obr. 9 Teplota vzorku v rohu byla těsně po navařování přibližně 238°C

Maximální teplota u rohového návaru dosáhla 238°C, což je přibližně 1,7 krát více než na přímém úseku, kde byla teplota jen 137°C. 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 přesně 2, jak bylo předpokládáno podle teoretických znalostí.

Počínaje pátým vzorkem 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 při snížení výkonu ( $\approx$  přísunu drátu) je třeba proporcionalně 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. 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  $K$ .



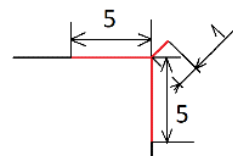
nižší výkon + nižší rychlost posuvu



vyšší výkon + vyšší rychlost posuvu

Obr. 10 Vliv kombinace navařovacích parametrů na tvar průřezu housenky

Po dalších testech se dospělo k závěru, že je potřeba tvořit svarovou housenku v kritickém místě širší. Nápadem bylo umělé prodloužení trajektorie hořáku v místech rohů při sníženém výkonu navařování.



Obr. 11 Příklad korigované dráhy v rohu - červená značí snížený výkon navařování a snížený posuv hořáku.

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°. Vybrané experimenty jsou zobrazeny v tabulce 4. Optimální výkon pro navařování rohu kontury a optimální posuv hořáku vychází dle experimentů takto:

korigovaný přísun drátu	3 m/min
korigovaný posuv hořáku $f$	70 mm/min



Bez snížení výkonu navařování a posuvové rychlosti hořáku je návar v rohu kontury nevyhovující.



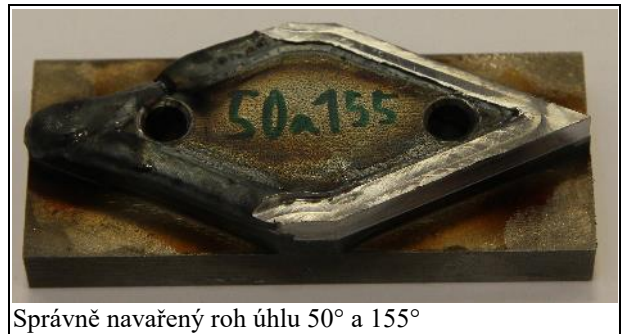
Na tomto vzorku bez korekcí dokonce došlo k roztavení části dílce.



Správně navařený roh úhlu 90°



Správně navařený roh úhlu 70° a 110°



Správně navařený roh úhlu 50° a 155°

Tab. 4 Experimenty navařování v rozích kontury

Na závěr byl otestován vzorek, na kterém byla navařována kontura komplexního tvaru, který obsahoval všechny testované úhly rohů. Byly použity korekce.

1) Plošný návar



2) Zarovnění horní plochy



3) Vyfrézování poličky

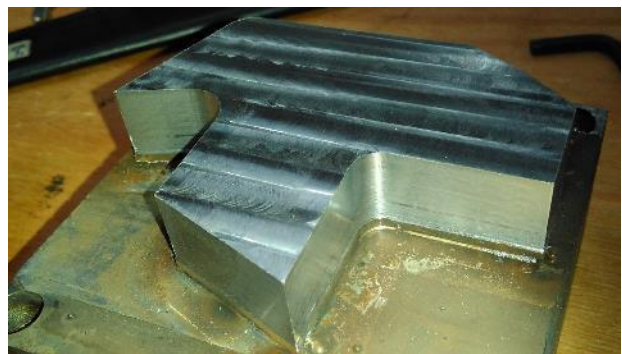


4) Korigovaný návar kontury



Obr. 12 Postup navaření jedné vrstvy dílce s komplexním tvarem vnější kontury

Tímto způsobem byl navařen celý dílec, nakonec byly obrobena boky dílce. 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.



Obr. 13 Dílec je po obrobění zcela bez vad

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 získané znalosti funkčně zabudované do nadstavby CAM softwaru.

- [7] Thermal Conductivity of common Materials and Gases, cit. 23.6.2018  
[https://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d\\_429.html](https://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html)

## Závěr

Výsledkem práce jsou optimalizované geometrické a technologické parametry pro navařování přímých úseků kontur a rohů kontury. Nepředpokládané problémy související s menším odvodem tepla při navařování v rozích se podařilo úspěšně vyřešit prodloužením trajektorie hořáku a snížením výkonu navařování tak, aby se teplo stíhalo odvádět a jakost návaru byla dodržena ve vynikající kvalitě.

## Poděkování

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu práce Ing. Janu Smolíkovi, PhD. a svému školiteli specialistovi Ing. Tomáši Fornůskovi za pomoc a užitečné rady.

This work was supported by the Grant Agency of the Czech Technical University in Prague, grant No. SGS19/165/OHK2/3T/12"

## Literatura

- [1] KRUMML, 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] Votruba, V. Návrh korekcí navařování konstrukční oceli pro zlepšenou geometrii návaru na hranách. Praha, 2018. [Diplomová práce]. ČVUT FS.
- [6] Fronius Česká Republika, cit. 8.11. 2017  
[http://www3.fronius.com/cps/rde/xchg/fronius\\_ceska\\_republika](http://www3.fronius.com/cps/rde/xchg/fronius_ceska_republika)