

Technologie WAAM s využitím off-line 3D simulací robota

Tomáš Gurčík*, Karel Kovanda

ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie, Technická 4, 166 07 Praha 6, Česká republika

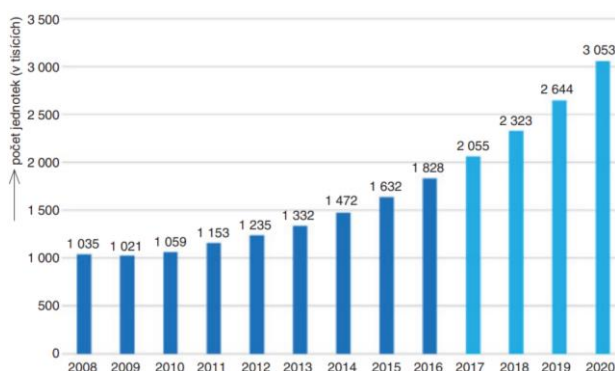
Abstrakt

WAAM (Wire + Arc Additive Manufacturing) je alternativní aditivní technologií, kombinující elektrický oblouk jako zdroj tepla a přídavný materiál ve formě drátu k navařování a vrstvení jednotlivých návarových housenek tak, aby bylo ve výsledku dosaženo co nejbližšího tvaru vyráběné součástky. V současné době, kdy je trendem digitalizovat výrobu, i tento výrobní proces je možné navrhnout pomocí nástrojů pro off-line programování a následné 3D simulace robota, který danou strukturu navaří. Tato studie se zabývá porovnáním dvou strukturovaných kontinuálních návarů s použitím dvou různých přenosů svarového kovu. Jako přídavný materiál byl použit poměděný drát pro zušlechťené a termomechanicky zpevněné jemnozrnné oceli s označením Union X 90 (G 89 6 M Mn4Ni2CrMo). Ze získaných vzorků byly provedeny standardní technologické zkoušky, z jejichž výsledků se očekává stanovení nových parametrů pro optimalizaci a zjištění limitů této technologie.

Klíčová slova: WAAM, aditivní technologie, robotizované navařování, off-line programování, FANUC ROBOGUIDE

1. ÚVOD

Dle výroční zprávy mezinárodní federace robotiky IFR (International Federation of Robotics) z roku 2017 představené na tiskové konferenci ve Frankfurtu nad Mohanem bude do roku 2020 ve výrobních podnicích po celém světě instalováno více než 3 miliony průmyslových robotů, přičemž počet těchto nainstalovaných jednotek ve světě vzroste od roku 2017 do roku 2020 až o 14 %. Tento vzrůstající trend nemusí být pouze reakcí na problém firm sehnat kvalifikované dělníky, na trend budoucnosti automatizovat malé a středně velké podniky koncepcí Industrie 4.0, ale také např. na využití robotizace pro nové technologie. [1]



Obr. 1. Počet nainstalovaných jednotek robotů (v tisících) ve světě do roku 2016 a předpoklad růstu do roku 2020 [1]

Jednou z těchto technologií může být i využití aditivní výroby v průmyslu na robotických linkách s využitím již v současnosti standardně aplikovaných zařízení – svařovací zdroj a robot. Touto alternativní aditivní technologií výroby je WAAM (Wire +Arc Additive Manufacturing). Spolu s využitím dostupných softwarových nástrojů, jako jsou např. off-line simulátory robotických pracovišť lze tento proces v budoucnosti reálně aplikovat ve

výrobě a současně nahradit neekonomické výrobní procesy pro konkrétní strojní součásti.

Cílem této studie je experimentálně ověřit základní parametry popisující chování této technologie. Na vzorcích získaných z navařených struktur byly provedeny zkoušky tahem. Proces navařování probíhal pomocí zkratového a modifikovaného zkratového přenosu svarového kovu (IAC) a po celou dobu byl monitorován měřicí soupravou Weldmonitor. Jako přídavný materiál byl použit poměděný drát s obchodním označením Union X 90. Získaná data poslouží k optimalizaci a stanovení nových parametrů pro další zkoumání WAAM.

2. TEORETICKÁ PŘÍPRAVA

2.1. Technologie WAAM

Aditivní výroba je v současné době jednou z nejrychleji rozvíjejících se výrobních technologií. Používá se pro výrobu prototypů či celých komponent strojů. Její princip tkví v kladení jednotlivých vrstev určitého materiálu tak, že ve výsledku získáváme tvar, který se co nejvíce blíží jeho CAD předloze. Na rozdíl od konvenčních výrobních technologií je zde výrazně méně odpadového materiálu, jelikož vstupním materiálem není plný profil. [2]

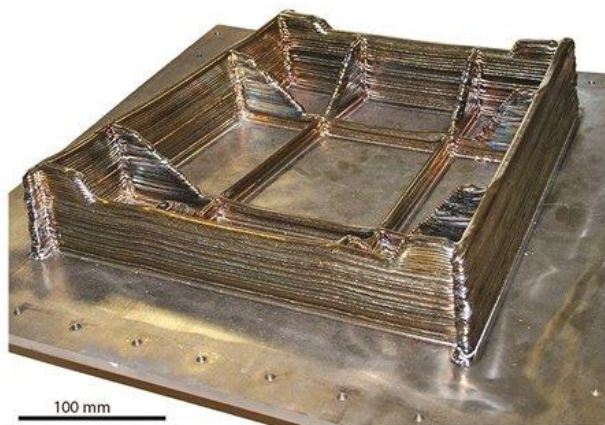
Za klasickou aditivní technologií v kovovýrobě považujeme 3D tisk či jinak SLS (Selective Laser Sintering), kdy je za pomoci laserového paprsku spékán (slinován) materiál ve formě prášku ve vrstvách o tloušťce cca 0,1 mm. Technologie WAAM je považována za alternativní aditivní technologii, jelikož z klasického SLS principem vychází, nýbrž svou investiční a provozní náročností je příznivější k její aplikovatelnosti. [3]

WAAM je technologie vyvinuta na Cranfield University. První zmínky o ní jsou uváděny od 90. let 20. století, ačkoliv první patent byl podán již v roce 1925. Pro její realizaci se v současné době používá klasického vybavení pro robotizované svařování – vícesý robot či portálový automat, svařovací zdroj současnosti, svařovací hořáky,

* Kontakt na autora: Tomas.Gurcik@fs.cvut.cz

systémy pro podávání drátu. Zdrojem tepla je elektrický oblouk, přídavný materiál je použit ve formě drátu, který je dodáván na cívkách či ve vysokokapacitních sudových baleních. Během procesu se vytváří jednotlivé návarové housenky, jejichž postupné kladení a vrstvení je naprogramováno do řídicí jednotky robota. [2; 4]

V současné době je vývoj WAAM směřován k jejímu využití v leteckém průmyslu, jelikož čím dál vyšší požadavky na snižování množství odpadu při výrobě leteckých komponent nutí nahradit současné výrobní postupy objemných konstrukcí. Měřítkem pro tuto optimalizaci je výrobní koeficient BTF (Buy-to-Fly ratio), který se zaměřuje na poměr objemu vstupního materiálu k výstupnímu, který je v současnosti často v rozmezí 10÷20:1. Pomocí této alternativní aditivní technologie se předpokládá snížení tohoto poměru o 35-45 % a ve výsledku snížit hmotnost letadla o 30 %, jeho cenu dokonce o 60 %. [2; 5]



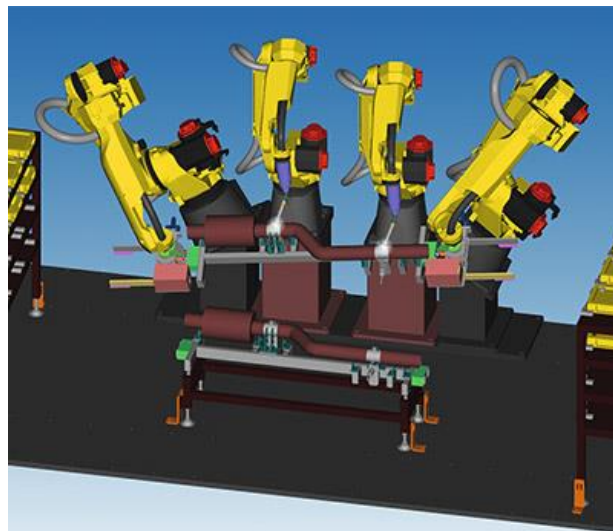
Obr. 2. Díl vyrobený pomocí technologie WAAM [2]

Tabulka 1. Porovnání materiálových poměrů pro výrobu dílu z Obr. 2 [2]

Technologie	Hmotnost vstupního materiálu	Hmotnost součásti	BTF	Odpad
Obrábění	240 kg	21 kg	11,4	91 %
WAAM	24 kg	21 kg	1,14	13 %

2.2. Off-line simulátory

Jak již bylo zmíněno, současný trend digitalizovat výrobu přináší na trh stále vyšší využití softwarových řešení pro předběžné plánování výroby. Programy pro off-line 3D simulace pohybu či průběhu aplikačních příkazů rapidně snižují dobu vytváření nových pohybových konfigurací. Standardně tyto programy podporují provázání s CAD modely, je proto možné navrhovat či digitalizovat stávající robotická pracoviště. Každý výrobce robotů má k dispozici svůj vlastní program, který je kompatibilní s jejich systémovým prostředím a knihovnou nabízených produktů. Tyto simulátory slouží pro všechny typy robotů s jejich konkrétními aplikacemi jako např. automatické odstraňování ořepů, manipulace s výrobky, lakování součástí, paletizace a právě svařování.



Obr. 3. Virtuální simulace pohybu v softwaru ROBOGUIDE [6]

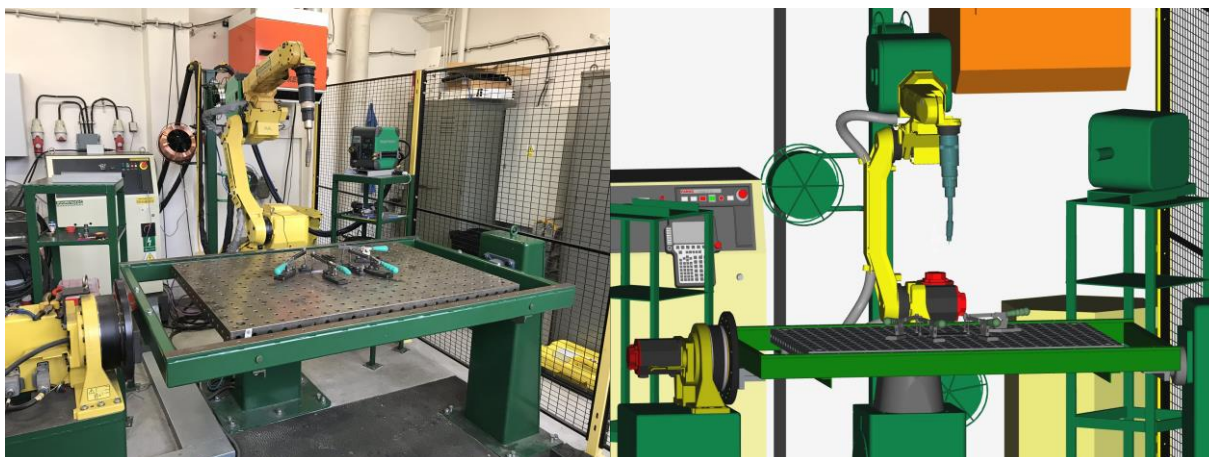
V těchto softwarech lze robotem pohybovat pomocí všech jeho os a programovat jednotlivé pohybové instrukce ještě před tím, než jsou nahrány do řídicí jednotky umístěné na skutečném pracovišti. Během on-line programování je nutné vytvářet pohybové instrukce za přítomnosti obsluhy přímo na pracovišti, a to s omezenou rychlostí pohybu robota a současně je zde vysoká pravděpodobnost jeho kolize s prostředím při zkušebním provozu. Zatím co pomocí off-line programování jsou pohybové instrukce vytvořeny citelně rychleji, předběžné simulace odhalí případné kolize a v neposlední řadě zvyšuje životnost drahého zařízení. Pomocí počítačového prostředí je také snadnější např. přesně dosáhnout sklonu svařovacího hořáku vůči svařenci.

S odkazem na koncepci Industrie 4.0 je možné simulační softwary v průmyslových podnicích využít k sledování reálných pohybů robota či řešit servisní problémy dokonce i v případech, kdy se operátor obsluhující tyto softwary v danou chvíli nepohybuje přímo na pracovišti.

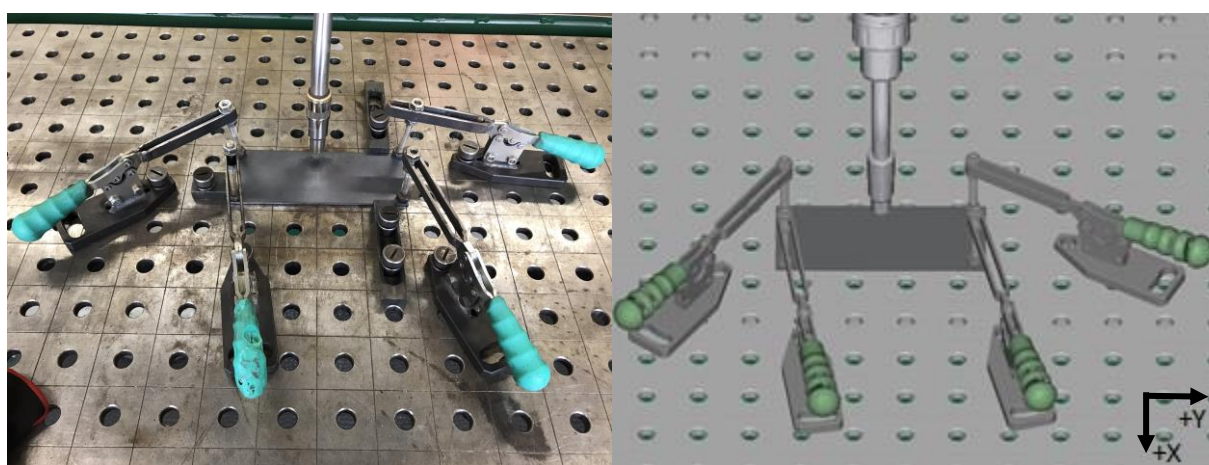
3. EXPERIMENT

3.1. Experimentální pracoviště

Hlavní část experimentu probíhala v mezifakultní Laboratoři výuky svařovacích technologií (LVST), která disponuje mimo jiného robotizovaným pracovištěm pro obloukové svařování. Toto pracoviště obsahuje univerzálního 6ti-osého robota FANUC Arc Mate 100iC s maximálním dosahem 1420 mm a opakovatelností $\pm 0,08$ mm a jeho řídicí jednotka R-J3iC. Dále je zde jednoosé polohovadlo FANUC P250, svařovací zdroj pro MIG/MAG a TIG svařování a jim příslušné podavače přídavného drátu od společnosti Migatronik, dále zásobníky svařovacího drátu a lahve s ochranným plynem. Samozřejmě pracoviště disponuje centrálním odsáváním a bezpečnostními prvky jako jsou světelné závory zamezující vstupu do pracovního prostoru, koncové spínače na dveřích zamezující osobám vstupu do prostoru operačního.



Obr. 4. Pohled na reálné pracoviště (vlevo), pohled na pracoviště v simulátoru FANUC ROBOGUIDE (vpravo)

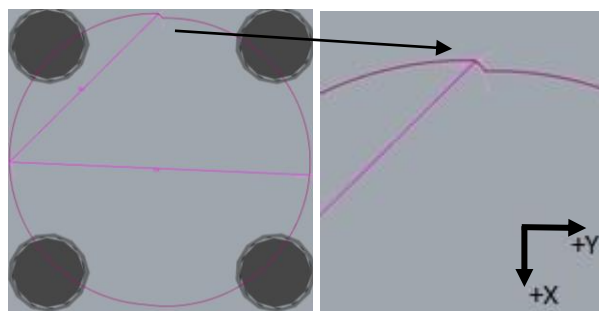


Obr. 5. Pohled na návrh upevnění základního plechu na svařovací stůl (vpravo), realizace v laboratoři LVST (vlevo)

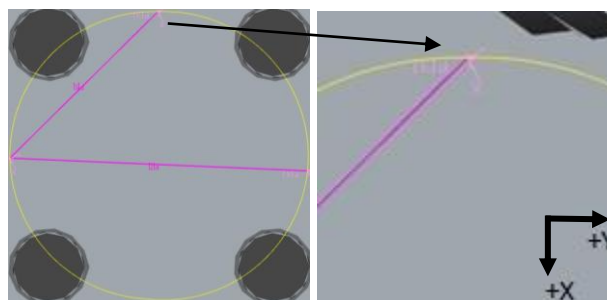
3.2. Virtuální pracoviště

Pro plné využití virtuálního pracoviště je nutné, aby bylo s tím reálným zkalibrováno. Pro aktuální pracoviště jsem vycházel z již vytvořeného modelu Ing. Pavlem Presem, který ho použil při řešení svého projektu (*Robotizované svařování mostního zábradlí metodou MAG, 2013*). Nicméně bylo nutné opět pracoviště zkalibrovat a ve virtuálním pracovišti přidat a pozměnit část komponent pro správnou funkčnost.

Při popisu off-line simulátorů jsem zmínil, že se nejčastěji používají pro předběžné tvorby programů. Při tomto experimentu byl použit opačný postup. Program sestaven on-line programováním byl importován do simulátoru a kontrolován. Při této kontrole bylo díky mapování trasy TCP (Tool Center Point) bodu svařovacího hořáku zjištěno, že počáteční a koncová pozice kruhové dráhy nesouhlasila a ve výsledku by v tomto místě, kde se hořák zvedá o jeden krok výšky mohly vznikat vady. Opravený program byl odsimulován a následně vyexportován zpět do řídicí jednotky robota pro jeho spuštění.



Obr. 6. Chybně vytvořený počáteční a koncový bod on-line programováním



Obr. 7. Opravená dráha robota pomocí off-line programování

3.3. Vstupní data pro experiment

Jako přídavný materiál pro navařování byl použit poměděný drát pro zušlechtné a termomechanicky zpevněné jemnozrnné oceli v průměru 1 mm s obchodním označením Böhler Union X 90, dle ČSN EN ISO 16834 označen G 89 6 M Mn4Ni2CrMo s následujícími vlastnostmi.

Tabulka 2. Minimální mechanické hodnoty drátu Union X 90 při běžné teplotě [7]

R_m [N/mm ²]	R_e [N/mm ²]	A_5 [%]	K_v [J]
950	890	15	90

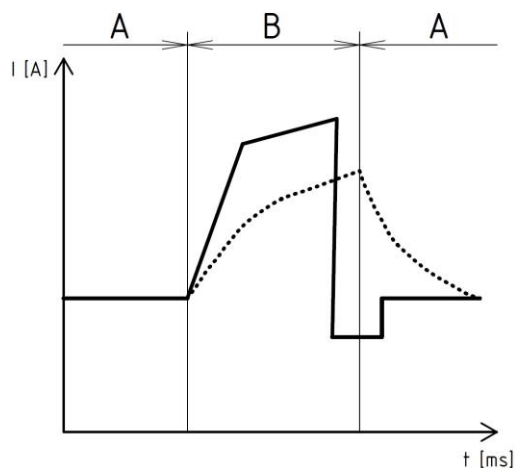
Tabulka 3. Chemické složení drátu Union X 90 v hm.% [7]

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni
0,1	0,8	1,8	0,35	0,6	2,3

Dalšími parametry byl svařovací proud 70 A, ochranný plyn M21 (82 % Ar, 18 % CO₂), rychlost posuvu svařovacího hořáku 30 cm/min, celý program byl nastaven na 50 cyklů (vrstev) s konstantní zvedáním hořáku po uběhnutí jednoho cyklu o 1,2 mm.

Součástí experimentu je také porovnání použitých dvou různých typů přenosu svarového kovu – zkratový a modifikovaný zkratový přenos IAC (Intelligent Arc Control) dostupný na svařovacích zdrojích Migatronic.

Motivací pro modifikaci svařovacích procesů jsou především snížení rozstříku a vneseného tepla. U klasického zkratového přenosu svarového kovu při MIG/MAG svařování je téměř celá energie využita pro roztavení drátu a následnému uvolnění kapky, během hoření oblouku současně vyzářená energie produkuje teplo přecházející jak do přídavného, tak do základního materiálu. Redukovaný rozstřík a vnesené teplo je regulováno modifikovaným zkratovým přenosem IAC, který je charakteristický vyšší intenzitou proudu při oddělení kapky. Vyšší intenzita zkratového proudu by ale za nezměněné doby zkratu způsobila ještě větší rozstřík. Pro IAC je typické zkrácení doby trvání zkratového proudu. [8]

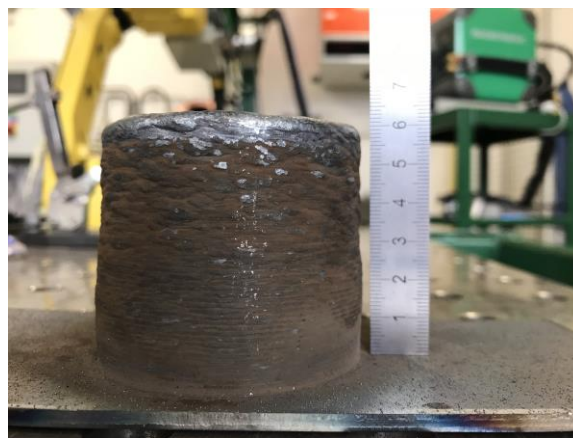


Obr. 8. Porovnání průběhu zkratového procesu (tečkovaná křivka) a teoretického průběhu IAC procesu (plná čára). Dle [8]

Na Obr. 8 je vyobrazeno porovnání těchto dvou procesů. Oblast A představuje oblast fáze oblouku, oblast B vyjadřuje fázi zkratu. Klasický zkratový proces je vyobrazen tečkovanou čarou a je možné pozorovat zvyšující hodnotu proudu až do chvíle oddělení kapky a následnému poklesu až do fáze následujícího zkratu. Teoretický průběh IAC je naznačen plnou čarou. Zde je vyobrazen výrazný nárůst proudu za kratšího času a následný rychlý pokles na nižší úroveň proudu, než která je při fázi oblouku – to zajistí zamezení rozstříku. Dále je proud udržován na nízké hodnotě až do oddělení kapky a následnému navýšení pro udržení stability oblouku. [8]

4. VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU

4.1. Vizualní posouzení návarů



Obr. 9. Strukturovaný návar vytvořený zkratovým procesem

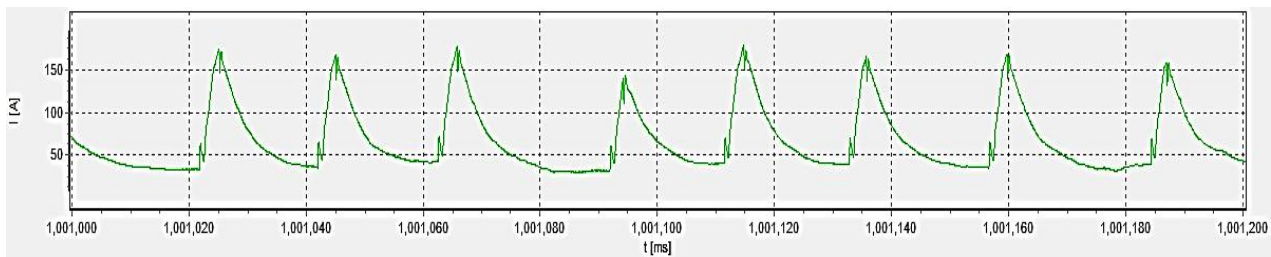


Obr. 10. Strukturovaný návar vytvořený IAC procesem

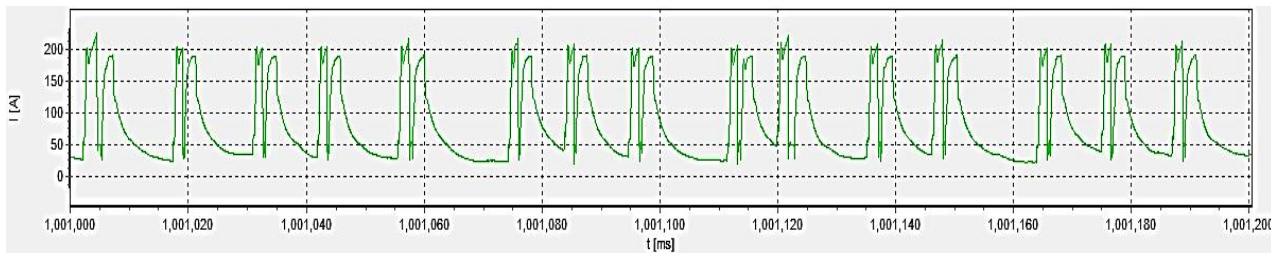
Na první pohled můžeme pozorovat značný rozdíl v konečné výšce návarů. Zatím co u zkratového přenosu kovu je konečná výška přibližně 60 mm, u přenosu IAC je výška přibližně 67 mm při stejném počtu návarových vrstev.

Naopak u obou vzorků pozorujeme pravidelné, vizuálně a geometricky vzhledné jednotlivé vrstvy přibližně do výšky 20 mm. Toto může být způsobeno příliš vysokou teplotou působící na tavnou lázeň, nevhodně zvoleným konstantním krokem zdvihu či vzdáleností místa navařování od základní desky.

4.2. Výstup z měřící soupravy Weldmonitor



Obr. 11. Záznam průběhu proudu zkratového přenosu



Obr. 12. Záznam průběhu proudu procesu IAC

Pro srovnání obou procesů jsou na Obr. 11 a Obr. 12 vyobrazeny průběhy svařovacího proudu na čase zaznamenané měřící soupravou Weldmonitor. Na první pohled je zřejmé, že hlavním rozdílem je počet zkratů v daném časovém úseku, který je u procesu IAC téměř dvojnásobný. Také proudové špičky se pohybují v blízkosti 200 A, zatímco u zkratového přenosu jde o hodnoty přibližně 150 A. Nicméně hlavním důvodem této části měření bylo získání dat, které charakterizují celý navařovací cyklus a sledovat jejich kolísavé chování. Tím pádem bylo možné identifikovat hodnoty, které mají zásadní vliv na konečnou kvalitu návarů. Těmito hodnotami jsou především svařovací napětí, proud a rychlost podávání drátu, která má zásadní vliv na spotřebu přídavného materiálu. Pro orientační zhodnocení byl pořízen výpis parametrů s frekvencí snímání 60 sekund. Tyto data byla rozdělena na 5 částí, které byly zprůměrovány v Tabulce 4.

Tabulka 4. Průměrné hodnoty v jednotlivých částech navařovacího procesu

Část	1	2	3	4	5
Napětí [V]					
Zkrat	20,4	20,3	20,4	20,5	20,5
IAC	20,5	20,5	20,8	20,6	21,0
Proud [A]					
Zkrat	77,8	78,9	77,3	76,9	76,3
IAC	101,2	102,4	104,4	106,3	109,9
Posuv drátu [m/min]					
Zkrat	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4
IAC	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0

Z těchto výsledků čteme mírně klesající tendenci u svařovacího proudu se zvyšující se výškou návaru u zkratového procesu. Naopak u procesu IAC se s výškou návaru proud značně zvyšuje. Každý z procesů má také jinou rychlost

podávání drátu, což ve výsledku značně ovlivňuje množství použitého materiálu. Na zkratový proces bylo využito 80,86 m drátu, u IAC tomu bylo 100,87 m. Kolísání svařovacího proudu může právě souviset s délkou výletu drátu. Toto je pravděpodobně reakce na výslednou výšku návarů, jelikož s větším výletem drátu se zvyšuje odpor a svařovací proud klesá.

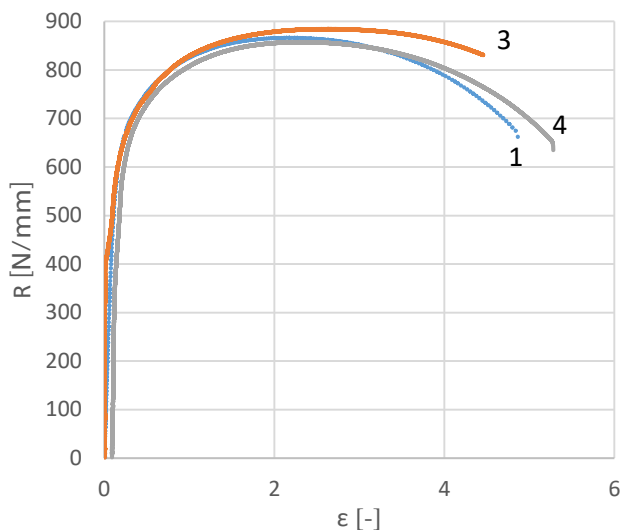
4.3. Výsledky tahové zkoušky

Vzorky pro tahovou zkoušku provedené dle norem ČSN EN ISO 6892-1 a ČSN EN ISO 5178 byly odebrány po 90° v obvodu návaru, první vzorek v obou případech pocházel z místa výškového nárůstu (vzorky 1 a 5).

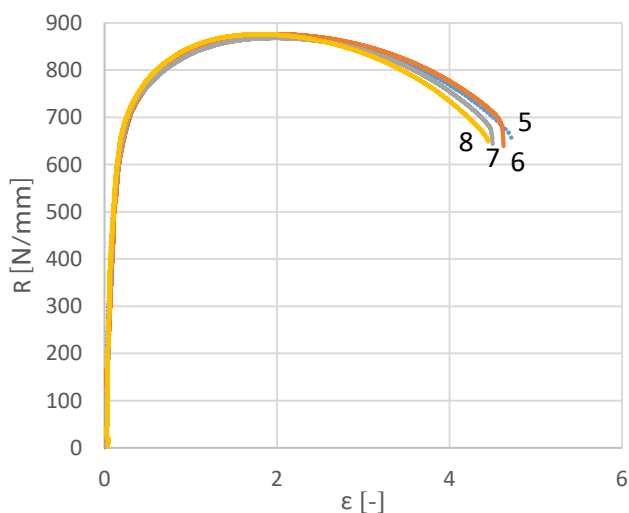


Obr. 13. Vzorky pro tahovou zkoušku

Hlavním cílem provedení tahové zkoušky je porovnání mechanických vlastností jednotlivých míst návaru. Především porovnání vzorku, kde dochází k výškovému nárůstu oproti ostatním místům, protože tyto výsledky mohou ukázat toto místo jako kritické.



Obr. 14. Smluvní diagram tahové zkoušky vzorků z procesu IAC



Obr. 15. Smluvní diagram tahové zkoušky vzorků ze zkratového procesu

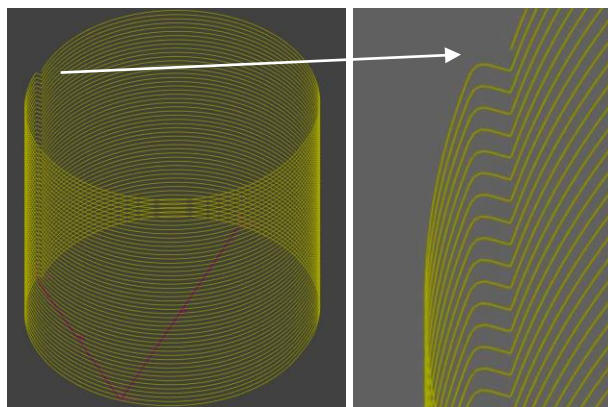
Během zkoušení vzorku číslo 2 měřící zařízení nezaznamenalo hodnoty prodloužení, proto není do porovnání tento vzorek zařazen.

Z grafického zobrazení výsledků je zjevné, že průběhy zkoušky jednotlivých vzorků se v zásadě neliší a lze je považovat za srovnatelné. Toto dokazuje, že pohyb zvedání svařovacího hořáku nemá zásadní vliv na mechanické vlastnosti daného místa v návaru.

4.4. Návrhy na optimalizaci

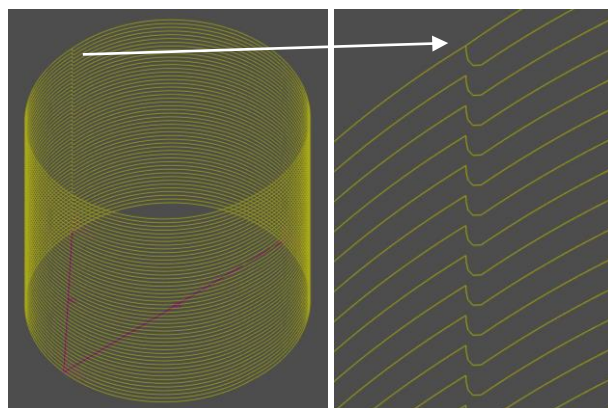
4.4.1. Změna pohybových instrukcí robota

První optimalizace, kterou lze provést je průběh dráhy robota při navařování. Z provedené simulace dráhy je možné si všimnout, jak probíhá zvedání svařovacího hořáku o jeden krok ve směru výšky. Během experimentu byl vyřešen problém se špatně zadanou dráhou navařování, která by způsobovala nepřesný tvar a s největší pravděpodobností i vznik vad v místě zdvihu.



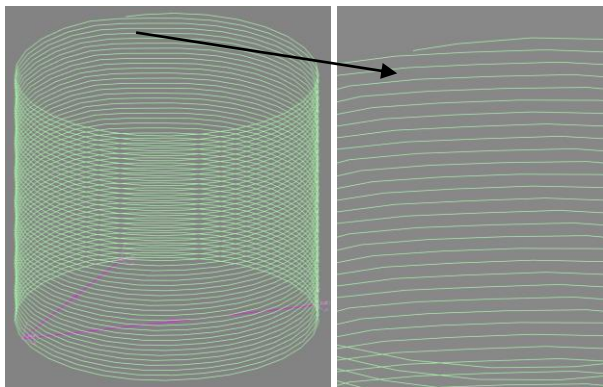
Obr. 16. Vykreslení nepříznivé geometrie původního programu

Touto optimalizací počátečního a koncového bodu je opravena geometrie návaru, nicméně charakter zdvihu během svařování může mít také vliv na konečnou kvalitu. Návary, které byly testovány v tomto experimentu, vznikaly při výškovém nárůstu, který probíhal vždy na začátku nové vrstvy, a to pokaždé skokově. To způsobí, že je v tomto místě naneseno více svařového kovu.



Obr. 17. Vykreslení skokového nárůstu vrstev

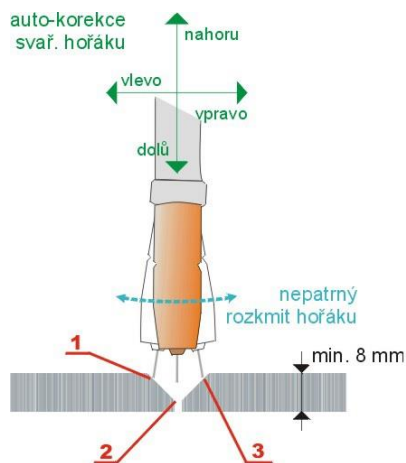
Tento problém je možné vyřešit vztahem mezi pohybem robota po naprogramované dráze a instrukcí, kdy se má dle pohybových registrů zvedat na další vrstvu. Je zde možnost nastavení plynulého zvedání tak, aby od začátku do konce během jedné vrstvy proběhl nastavený zdvih. Jinak řečeno, hořák bude vytvářet spirálovitou dráhu (Obr. 18). Druhou možností je, že se hořák bude do počátečního bodu následujícího návaru zvedat až z $\frac{3}{4}$ uběhlé dráhy návaru předchozího. Nicméně stejného efektu lze docílit zvýšením rychlosti navařování, jelikož si robot přepočítá plynulost výškového nárůstu.



Obr. 18. Vykreslení plynulého nárůstu vrstev

4.4.2. Použití senzorky během procesu

Kolísání svařovacího proudu jako reakce na rozdílný výlet drátu může být řešena pomocí dostupné senzorky. Hlavním nástrojem v této optimalizaci je senzor sledující hodnoty elektrického oblouku pod obchodními značkami TAST (Through Arc Seam Tracking) společnosti FANUC či COMARC od společnosti Yaskawa Motoman. Tento senzor přímo reaguje na změny přednastavených svařovacích parametrů korekcí dráhy robota. V tomto případě by senzor reagoval právě na změny délky výletu drátu a upravoval v reálném čase výškový přírůstek.



Obr. 19. Schématické znázornění funkce senzoru COMARC [9]

Standardně je tento typ senzorů používán pro dosažení přesnosti dlouhých svarů, kdy je požadován rozkmit svařovacího hořáku. Pro aplikaci v technologii WAAM je nutné tuto funkci softwarově upravit, aby nebyl rozkmit vyžadován a upravovala se pouze výšková souřadnice.

5. ZÁVĚR

Cílem této studie bylo získat vstupní údaje pro další optimalizaci a experimenty popisující technologii WAAM. Dle získaných dat měřicí soupravy Weldmonitor byla zjištěna závislost svařovacího proudu a rychlosti posuvu drátu na výslednou spotřebu materiálu a kolísání přednastavených parametrů.

Zkouška tahem jednotlivých vzorků ukázala, že pohyb zvedání svařovacího hořáku o jednu vrstvu směrem

vzhůru, který byl použit v tomto experimentu, neměl zásadní vliv na ovlivnění mechanických vlastností v jednotlivých částech návaru. Naopak při vizuálním posouzení je zjevné, že je v tomto místě nanese více svařového kovu, tudíž vzniká při obrábění více zbytečného odpadu. Výstupy z grafického vyobrazení pohybu robota, lze použít pro zkoumání vlivu výškového přírůstu na mechanické vlastnosti a kvalitativní posouzení strukturovaných návarů. Dále mohou být tyto hypotézy použity pro řešení vysokorychlostního navařování technologií WAAM při zachování požadovaných vlastností návarů.

Poděkování

Děkuji Ing. Štěpánu Ježkovi (ÚST ČVUT v Praze, Schäfer – Menk s.r.o.) za poskytnutí přídavného materiálu pro uskutečnění experimentu a Ing. Michalu Valešovi (ÚST ČVUT v Praze) za asistenci při provádění tahových zkoušek.

Tento výzkum proběhl díky financování z projektu "Udržitelný výzkum a vývoj v oboru strojírenských technologií" SGS16/217/OHK2/3T/12.

Literatura

- [1] KABEŠ, Karel. Již brzy budou na světě v provozu tři miliony průmyslových robotů. *Automa*. 2017, 23(10), 28-29. ISSN 1210-9592. Dostupné také z: http://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/11089.pdf
- [2] KOLAŘÍK, Ladislav, Jan SUCHÁNEK a Marie KOLAŘÍKOVÁ. Navařování metodou WAAM. *MM Průmyslové spektrum*. 2018, (1,2), 60. ISSN 1212-2572. Dostupné také z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/navarovani-metodou-waam.html>
- [3] BÜRGEROVÁ, Karla. Analýza defektů 3D tištěného kovového produktu. Praha, 2016. Bakalářská práce. ČVUT v Praze, Fakulta strojní. Vedoucí práce Ing. Aleš Herman, Ph.D. Dostupné také z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/65583/F2-BP-2016-Burgerova-Karla-Bakalarska%20prace.pdf?sequence=1>.
- [4] WIRE + ARC ADDITIVE MANUFACTURING [online]. Cranfield, Bedfordshire: Cranfield University, 2000-2018 [cit. 2018-03-26]. Dostupné z: <https://waam-mat.com/about/waam>
- [5] EBM® in Aerospace: Additive Manufacturing taken to unseen heights. Arcam EBM a GE Additive company [online]. Sweden, b.r. [cit. 2018-03-26]. Dostupné z: <http://www.arcam.com/solutions/aerospace-ebm/>
- [6] Inteligentní 3D simulace robotu. FANUC Czech s.r.o. [online]. b.r. [cit. 2018-03-26]. Dostupné z: <http://www.fanuc.eu/cz/cs/roboty/p/C5%99%C3%AD-slu%C5%A1enstv%C3%AD/roboguide>
- [7] Nejpoužívanější přídavné materiály pro svařování, navařování a pájení a přípravky pro moření nerezavějících ocelí. In: Voestalpine Böhler Welding [online]. b.r. [cit. 2018-03-26]. Dostupné z: <http://www.boehler-uddeholm.cz/media/nejpouzivanejsi-materialy-2015-2.pdf>
- [8] IACT™ Intelligent Arc Control – proces pro snižování rozstříku a vnesení tepla při zkratovém přenosu. Automig [online]. [cit. 2018-03-30]. Dostupné z: <http://auto-mig.cz/o-svarovani/funkce/iactm-intelligent-arc-control/>
- [9] HADYNA, Daniel. Přesné svařování nepřesných dílců na robotizovaných pracovištích. *Svět svaru*. 2006, 10(3), 16-17 [cit. 2016-03-01]. ISSN 1214-4983.