

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

FAKULTA STROJNÍ



**ZÁVĚREČNÁ
PRÁCE**

2018

Borodin Evgenij

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Borodin** Jméno: **Evgenij** Osobní číslo: **438580**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Navařování 3D struktur metodou WAAM

Název bakalářské práce anglicky:

3D structures surfacing by WAAM method

Pokyny pro vypracování:

- Popis technologie WAAM - používané metody, zařízení a technologie
- Rozbor současného stavu v oblasti navařování 3D struktur
- Návrh experimentu - vytvoření zkušebních vzorků vícevrstevných návarů
- Vyhodnocení vlastností vytvořených návarů z hlediska struktury a mechanických vlastností
- Závěr - zhodnocení výsledků

Seznam doporučené literatury:

- [1] Kolařík, L. Navařování metodou WAAM, MM Průmyslové spektrum, 1/2018
- [2] Chen Shen. Application of wire-arc additive manufacturing (WAAM) proces in in-situ fabrication of iron aluminide structures, university of Wollongong, Thesis, 2016
- [3] Firemní materiály ? Cranfield University

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

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

Ing. Karel Kovanda, Ph.D., ústav strojírenské technologie FS

Datum zadání bakalářské práce: **23.04.2018** Termín odevzdání bakalářské práce: **10.08.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: **10.08.2018**

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

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

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Abstrakt

Borodin Evgenij: Navařování 3D struktur metodou WAAM

Projekt vypracovaný v rámci bakalářského studia ukazuje možnosti 3D navařování pro robotizované svařování. Hlavní část práce se věnuje rozboru metody svařování MAG, automatizace, robotizace, a 3D navařování. Byla provedena experimentální část, v průběhu které byly porovnány výsledky navařovaných struktur konvenčním MAG metodou (zkratovým procesem) a metodou CMT (Cold Metal Transfer).

Abstrakt

Borodin Evgenij: WAAM welding 3D structures

The project developed in the bachelor study shows the possibilities of 3D welding for robotic welding. The main part of the thesis deals with the analysis of the MAG welding method, automation, robotization and 3D welding. An experimental part was performed during which the results of the welded structures were compared with the conventional MAG method (short-circuit) and CMT (Cold Metal Transfer).

Pracoviště: Ústav strojírenské technologie

Počet stran: 47

Počet obrázků: 35

Počet tabulek: 4

Počet příloh: 1

Klíčová slova:

Svařovací robot, 3D navařování, metoda WAAM, CMT, svařování

Keywords:

Welding robot, 3D welding, the WAAM method, welding

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že předkládanou bakalařskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalařské práce.

Podpis autora:

Obsah:

Název kapitoli	strana
1) Úvod	6
2) Historie a vývoj metod svařování	6
3) Popis metody MAG/MIG.....	9
3.1. Způsob značení metod svařování.....	11
3.2. Rozdíl mezi MIG a MAG svařováním.....	13
3.3. Ochranné plyny a jejich vlastnosti.....	13
3.4. Podavací mechanismus.....	16
4) Automatizace ve svařování.....	19
4.1. Rozdíl mezi automatizace,mechanizace a robotizace.....	19
4.2. Cíle automatizace.....	20
4.3. Svařovací automaty.....	20
4.4. Svařovací roboty.....	22
5) Současný stav v oblasti navařování 3D struktur.....	25
5.1. Princip metody WAAM	25
5.2. Použití WAAM.	26
5.3. Výhody robotického 3D navařování.....	27
5.4. Zaměření robotického 3D navařování“	28
6) Praktická část.....	30
6.1. Popis pracoviště.....	30
6.2. Svařování zkratem.....	34
6.3. Svařování metodou CMT.....	40
7) Závěr.....	46

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

1. Úvod

Svařování nebo sváření je proces, který slouží k vytvoření trvalého, nerozebíratelného spoje dvou a více součástí. Obecným požadavkem na proces svařování je vytvoření takových termodynamických podmínek, při kterých je umožněn vznik nových meziatomárních vazeb.

Svařovat lze kovové i nekovové materiály, materiály podobných i různých vlastností. Ale pro různé typy spojů a materiálů jsou vhodné jiné metody svařování. Při svařování (zejména u tavných metod) dojde vždy ke změně fyzikálních nebo mechanických vlastností základního materiálu (spojovaného) v okolí spoje.

V mé práci je uvedeno využití robotizovaného pracoviště pro svařování metodou MAG a jejího použití k navařování 3D struktur, což je dnes aktuální problematika, která má za podstatně cenově příznivějších podmínek (investičních i provozních), rozšířit možnosti v současné době velmi zkoumaného odvětví – 3D tisku kovových materiálů.

Práce obsahuje praktickou část, kde na jednoduchém experimentu jsou demonstrovány výhody speciálních procesů, které vedou k minimalizaci množství vneseného tepla, oproti konvenčnímu MAG procesu.

2. Historie a vývoj metody MAG svařování

Jako první metoda svařování v ochranných atmosférách byla ve 30. letech minulého století vyvinuta pro potřeby leteckého průmyslu a pro svařování korozivzdorné ocelí metoda TIG (Tungsten Inert Gas) = svařování elektrickým obloukem neodtavující se wolframovou elektrodou v inertním ochranném plynu. Metoda TIG však neumožňovala svařovat produktivně materiály s velkou tepelnou vodivostí o větších tloušťkách, zejména hliník a jeho slitiny. Nutný předehřev svarových spojů komplikoval technologii výroby. Proto byla v roce 1948 vyvinuta technologie označená později mezinárodní zkratkou MIG (Metal Inert Gas) = svařování elektrickým obloukem odtavující se kovovou elektrodou v inertním ochranném plynu (např. Argon, Helium). Tato technologie umožnila nejen svařování hliníku a jeho slitin o větších tloušťkách, ale i řady dalších neželezných kovů a jejich slitin. Přinesla také podstatné zvýšení produktivity práce při svařování, mechanizaci podávání přídavného

(holého) svařovacího drátu – elektrody, který zároveň slouží jako přídavný materiál. Velmi brzy se začala metoda používat i pro svařování legovaných i nelegovaných ocelí. [12]

Další vývoj této technologie směřoval k náhradě inertních plynů jinou cenově dostupnější ochrannou atmosférou. Vývojoví pracovníci se vrátili k patentu Johna C. Lincolna, který již v roce 1918 ve svém patentu navrhl použít jako ochrannou atmosféru oxid uhličitý (CO_2). Takto upravená technologie se začala od roku 1955 průmyslově využívat pro svařování ocelí.

Vzhledem k tomu, že se oxid uhličitý při teplotách nad $700\text{ }^\circ\text{C}$ rozkládá na oxid uhelnatý (CO) a volný atomární kyslík (O), který intenzivně reaguje s ostatními prvky (oxidickou reakcí), zejména při zvýšených teplotách – tzn. aktivně působí na ostatní prvky, tedy i na tekutý svarový kov, byla tato metoda označena mezinárodní značkou MAG (Metal Active Gas). [12]

V dalších letech se technologie MIG/MAG velmi dramaticky rozvíjela a rozšiřovaly se také její průmyslové aplikace. Podstatným způsobem se zkvalitnilo zařízení pro svařování technologií MIG/MAG, včetně regulace procesu. Modernizovaná zařízení umožňovala dopravovat svařovací drát (elektrodu), na velké vzdálenosti (vícekladková podávání, zdvojené podávání, push-pull system apod.). [12]

Došlo k řadě mechanizovaných a automatizovaných průmyslových aplikací této technologie včetně jejího použití pro robotizaci svářečských prací. Byly vyvinuty nové varianty přenosu kapek svarového kovu do tavné lázně – zkratový, sprchový a pulzní. Použitím „směsných plynů“, jako ochranné atmosféry, např. $\text{Ar} + \text{CO}_2$, $\text{Ar} + \text{O}_2$, $\text{Ar} + \text{CO}_2 + \text{O}_2$ a $\text{Ar} + \text{H}_2$ se zvýšila stabilita hoření oblouku a snížil se rozstřík při svařování.

Tento pokrok způsobil, že se technologie MIG/MAG stala koncem 80. let minulého století dominantní. V devadesátých letech došlo k dalšímu zvýšení produktivity práce při svařování a zvýšení stability technologie MIG/MAG použitím svařování s vysokými rychlostmi podávání drátu (svařování rotujícím obloukem) a použitím vícekomponentních ochranných plynů např. $\text{Ar} + \text{He} + \text{CO}_2 + \text{O}_2$. Tyto nové varianty technologie MIG/MAG jsou známé pod různými obchodními názvy (např. T.I.M.E. process = Transferred Ionized Molten Energy, od firmy Fronius). Při těchto procesech se svařuje s vysokým proudem od 450 do 800 A a vysokým napětím 45 až 65 V. Posuv drátu při těchto metodách se pohybuje mezi 20 až 35 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ a výkony navaření 10 až 25 kg/hod . Přenos kovu odráží vysoké proudové zatížení, velké rychlosti vlastního svařování (velká produktivita) a nutnost automatizace

resp, robotizace procesu. Při vysokovýkonných metodách se dnes používá plynová ochrana Ar + 8% CO₂.

V devadesátých letech byly také vyvinuty synergické MIG/MAG zdroje svařovacího proudu, které umožnily podstatné zjednodušení nastavování svařovacích parametrů (tzv. jednoprvkové ovládání). [12]

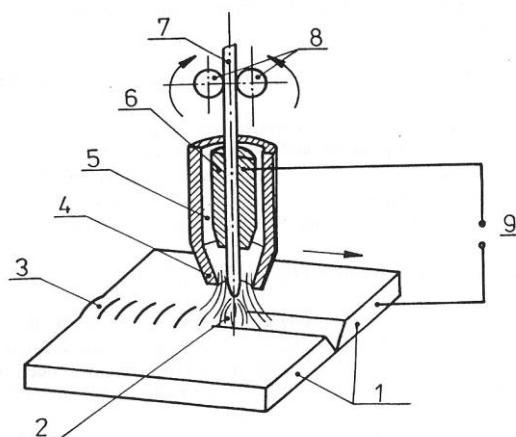
V současné době jsme svědky nebývale široké nabídky vysoce sofistikovaných technik MIG/MAG svařování, které zvyšují produktivitu svařování, kvalitu svarových spojů, usnadňují svařování v polohách, kořenů svarů, překlenutí velkých mezer v kořenech svarů, svařování pozinkovaných plechů a pájení oceli s hliníkem.

Mezi tyto nové techniky můžeme zařadit například: Speed Pulse, Cold Arc, Speed-Twin Puls, Root Arc, Speed Up, Pipe Solution, Speed Arc, Super Puls, Speed Root, IACTM, Speed Cold. Tyto modifikace MIG/MAG procesů v současné době směřují dvěma základními směry: Vysokovýkonné svařování velkých tloušťek materiálů (tím se zabývají procesy jako T.I.M.E.) a metody jako CMT, IAC apod., které směřují naopak k co nejmenšímu vnesenému teplu a pro svařování tenkých a velmi tenkých tloušťek – tento směr je aplikován i při navařovacích procesech, kterým je věnována tato bakalářská práce.

Komfort při svařování těmito novými technikami MIG/MAG svařování zvyšuje dále možnost kombinace více technik na provedení jednoho svaru (např. kombinace pulz/zkrat, double pulse aj.). Vysoká produktivita práce, univerzálnost metod MIG/MAG, možnost mechanizace a robotizace svařování, cenová dostupnost a nové techniky svařování způsobily, že metody svařování MIG/MAG jsou dnes dominantními metodami elektrického obloukového svařování a jejich podíl ve výrobě svarenců ve světě je větší než 50 %. Předpokládá se, že jejich využití dále poroste s rozvojem elektroniky, větším použitím plněných elektrod jako přídavného materiálu a v kombinaci s metodami laserového svařování (tzv. hybridní svařovací procesy). [12]

3. Popis metody MAG/MIG

1. Základní materiál
2. elektrický oblouk
3. svar
4. plynová hubice
5. ochranný plyn
6. kontaktní průvlak
7. přídavný materiál (svařovací drát)
8. podávací kladky
9. zdroj proudu



Obr.1 Princip metody MAG/MIG

Tyto technologické metody jsou založeny na principu svařování v ochranných atmosférách aktivního plynu u MAGu (metal active gas) a inertního plynu u MIGu (metal inert gas), kdy dochází k hoření oblouku mezi tavicí se kovovou elektrodou ve formě drátu a základním materiálem.

Jako ochranná atmosféra pro metodu MAG se používá aktivní plyn – oxid uhličitý CO_2 nebo stále častěji používané vícesložkové směsné plyny na bázi argonu - nejčastěji argon oxidem uhličitým nebo kyslíkem. U metody MIG se většinou využívá čistý inertní plyn: argon nebo helium, popřípadě jejich směs. [3]

Ochranná atmosféra se volí podle druhu svařovaného základního materiálu. Pro kvalitní svařování ocelí jsou nutné oxidační reakce. Zaručí čistý svarový kov s dobrými mechanickými vlastnostmi a stabilní hoření el. oblouku. Argon jako inertní plyn má dobrou ionizační schopnost a zajistí vyšší stupeň ochrany (především před zmíněnou oxidací), proto se nejčastěji používá pro neželezné kovy a jejich slitiny (např. slitiny hliníku), u kterých

nesmí dojít k oxidaci. Oxid uhličitý jako aktivní plyn má relativně obtížnou ionizační schopnost a je tedy vhodný u běžných konstrukčních ocelí.[3]

Jako přídatný materiál (PM) se používá materiál ve formě drátu plného průřezu (nejčastěji o průměru 0,8 mm až 1,4 mm), případně plněné elektrody o podobných průměrech, které mohou být bezešvé nebo tvarově uzavřené. Náplň plněných elektrod tvoří bazické, kyselé, rutilové případně fluoridové struskotvorné přísady, které vytvoří na povrchu svaru tenkou vrstvu strusky (případně se dnes používají i plněné elektrody s kovovým práškem, kde se struska na povrchu v podstatě netvoří). PM je zpravidla navinutý na cívce a přepravován v lepenkovém balení (případně pro robotické aplikace lze využít i velkokapacitní zásobníky).

Pro svařování metodami MIG/MAG se používají zdroje se stejnosměrným výstupem proudu, kde kladný pól zdroje je připojen na drátovou elektrodu (tzv. zapojení na nepřímou polaritu, což dává výhodu v max. účinku tzv. čistícího efektu el. oblouku, který je vhodný pro svařování hliníku a jeho slitin). [12]

Současné zdroje mají řadu nadstandardních funkcí, které výrazně zlepšují svařovací proces, jako jsou: horký start pro zajištění natavení začátku svaru, databáze svařovacích programů pro velkou většinu přídatných materiálů a synergické řízení svařovacího procesu. Při synergickém řízení jsou jedním manuálně nastaveným parametrem – např. tloušťkou materiálu, proudem nebo rychlostí podávání svařovacího drátu, ovládány všechny ostatní svařovací parametry.

Charakter přenosu kovu el. obloukem (z tavící se elektrody do svarové lázně) závisí na parametrech svařování a prostředí v kterém je realizován el. oblouk, zejména na typu ochranného plynu, přičemž běžný je zkratový přenos pro malé tloušťky materiálů a sprchový přenos pro větší tloušťky materiálů. U vysokých svařovacích proudů se mění charakter přenosu kovu el. obloukem a vlivem elektromagnetických sil se dosahuje rotujícího oblouku. « Teplota kapek se při MAG svařování pohybuje v rozmezí 1700 až 2500 °C a teplota tavné lázně se v závislosti na technologii, parametrech svařování, chemickém složení a vlastnostech materiálu pohybuje mezi 1600 až 2100 °C. V důsledku vysokých svařovacích proudů se svařovací rychlosti blíží hranici 150 cm/min a rychlost kapek přenášených obloukem přesahuje 130 m/s.»[7].

Uplatnění těchto metod v průmyslu je obrovské. Metoda MAG patří k nejrozšířenějším metodám pro svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí. Svařování MIG získává na důležitosti vlivem růstu objemu svařovaných konstrukcí vyráběných z neželezných slitin, především hliníku.

Technologické výhody metod MIG/MAG:

- vysoká efektivita
- snadný start oblouku bez nárazu svařovacího drátu do svařence (obecně snadná metodika provádění i při použití ručních svařovacích hořáků)
- velmi dobrý profil svaru v závislosti na použitém typu ochranného plynu
- malá tepelně ovlivněná oblast (TOO) především u vysokých rychlostí svařování
- vysoká proudová hustota
- vysoký výkon odtavení PM
- možnost nastavení široké škály svařovacích parametrů pro jeden průměr elektrody
- malý nebo žádný rozstřík kovu elektrody v závislosti na typu přenosu svarového kovu a ochranného plynu (např. u čistého CO₂ je rozstřík vždy poměrně velký)
- snadná aplikace metody na robotizované a mechanizované systémy

3.1 Způsob značení používaných metod obloukového svařování

Obecně lze říci, že v ČR (resp. v EU) by mělo být značení v souladu s ČSN EN ISO 4063. V následující tabulce (tabulka č. 1) jsou dále ukázány i další možnosti značení nejčastěji používaných metod obloukového svařování (evropské zkratky metod jsou primárně používány v textu této bakalářské práce).

Tab. 1 – Značení metod svařování

Značení metody dle EN ISO 4063	Evropská zkratka (E)	Americká zkratka (A)	Celý název
111	MMA	SMAW	E: Manual Metal Arc Welding A: Shielded Metal Arc Welding
114	FCAW	FCAW	E: Flux-cored wire metal arc welding without gas shield A: Flux-cored arc welding
12 (121)	SAW	SAW	E: Submerged Arc Welding A: Submerged Arc Welding
131	MIG	GMAW	E: Metal Inert Gas Welding A: Gas Metal Arc Welding
135	MAG	GMAW	E: Metal Active Gas Welding A: Gas Metal Arc Welding
136	MAG	FCAW	E: Flux-cored wire metal arc welding with activ gas shield A: Flux-cored arc welding
141	TIG (WIG)	GTAW	E: Tungsten (Wolfram) Inert Gas Welding A: Gas Tungsten Arc Welding
138	MAG		E: Obloukové svařování plněnou elektrodou s kovovým práškem electrode v aktivním plynu A: MAG welding with metal cored electrode

Uvedené číselné označení metod (viz tabulka 1) česky znamená:

111 – Ruční obloukové svařování obalenou elektrodou (ROS)

114 – Obloukové svařování plněnou elektrodou (trubičkovým drátem) bez ochranného plynu

12 (121) - (Automatické) Svařování pod tavidlem (APT)

131 – Obloukové svařování tavící se elektrodou v inertním plynu (MIG)

135 – Obloukové svařování tavící se elektrodou v aktivním plynu (MAG)

136 – Obloukové svařování plněnou elektrodou (trubičkovým drátem) v aktivním plynu

141 - Obloukové svařování netavící se (Wolframovou) elektrodou v inertním plynu – TIG (WIG)

138- Svařování plněnou elektrodou s kovovým práškem

3.2 Rozdíl mezi MIG a MAG metodami svařování

V principu metod a konstrukci používaného svařovacího zdroje není žádný rozdíl. Metody svařování MIG a MAG jsou zcela totožné. Rozdíl je pouze v tom, jaký plyn použijeme (inertní/aktivní) a z toho vyplývající následná vhodnost pro “zpracování” různých základních materiálů.

3.3 Ochranné plyny, jejich směsi a vlastnosti.

Ochranné plyny se dělí, jak již bylo uvedeno, na inertní a aktivní. Aktivní plyn má kromě ochranné funkce (zamezit přístupu okolní vzdušné atmosféry k roztavenému kovu) za úkol ještě vstupovat do chemických reakcí ve svarové lázni. Aktivní plyn se tedy aktivně podílí na procesech, které probíhají v roztaveném svarovém kovu. Inertní plyn má především ochrannou funkci spočívající v zamezení přístupu okolní vzdušné atmosféry (zejména kyslíku, dusíku a vodíku) k roztavenému kovu. Žádných chemických reakcí ve svarové lázni se inertní plyn neúčastní, je tedy k chemickým procesům zde probíhajícím netečný neboli inertní. Inertní plyny se používají zejména při svařování neželezných kovů a jejich slitin, kde nesmí docházet k oxidaci.[3]

Jako aktivní plyny se v současné době nejčastěji používají následující plyny a směsi plynů:

CO₂

Oxid uhličitý (lidově “céóčko”) je u nás stále populární ochranný plyn, zejména v malých provozech a při hobby svařování. Důvodem jeho oblíbenosti je snadná dostupnost a zejména nízká cena. Z hlediska svařovacích vlastností jej ale překonaly aktivní směsné plyny na bázi argonu. Čistý CO₂ dovoluje dobrý průvar, ale podporuje formování oxidů a karbidů, které nepříznivě ovlivňují mechanické vlastnosti svárů. Další nevýhodou je, že při použití čistého CO₂ je na oblouku dost vysoké povrchové napětí a z toho vyplývá velký rozstřík a obtížnější odtržení kapek tekutého kovu (z toho vyplývá nemožnost dosažení sprchového přenosu). CO₂ se používá při svařování a navařování nelegovaných a nízkolegovaných konstrukčních ocelí. Není vhodný pro vysocelegované oceli, zvláště pak pro korozivzdorné oceli. [3]

Směs Argon + CO₂

- ochranný plyn s lepšími vlastnostmi než čistý CO₂. Přestože je dražší než čistý CO₂, ve velkých provozech a v případech důrazu na kvalitu a produktivitu svařování, se používá již výhradně tento druh plynů. Podíl CO₂ ve směsi může být maximálně 25%. Při vyšším podílu už by se směs chovala podobně jako čisté CO₂. Opět se používá hlavně na nelegované a nízkolegované oceli. Nejpoužívanější směsi jsou: 82%Ar+18%CO₂ a 92%Ar+8%CO₂. [3]

Směs Argon + O₂

- směsný plyn na bázi argonu s příměsí kyslíku. Podíl kyslíku ve směsi by neměl překročit 5%. O₂ zvyšuje tekutost svarové lázně a stabilitu hoření el. oblouku. Tyto plyny se používají zejména na vysocelegované oceli, kam patří i korozivzdorné oceli. Nejpoužívanější plyny jsou: 97%Ar+3%O₂, 99%Ar+1%O₂. [3]

Vícesložkové směsi na bázi argonu

- jedná se o směsi plynů s více než 2 složkami. Jako další složky zde kromě argonu mohou být CO₂, O₂, N₂ a další. Jedná se o plyny pro speciální účely, automatizované a robotizované svařování, a nebo s menší emisí škodlivin apod. Klasickým aktivním vícesložkovým plynem je 93%Ar+5%CO₂+3%O₂. [3]

Jako inertní plyny se v současné době nejčastěji používají následující plyny a směsi plynů:

Argon

- nejpoužívanější inertní plyn (resp. obecně je používánější ochranný plyn – díky tomu, že je možné ho použít i do inertních/aktivních směsí) pro svařování. Je vhodný pro svařování hliníkových materiálů, měděných slitin, titanu apod. Kromě metody MIG je používán jako ochranný plyn i při svařování metodou TIG wolframovou netavicí se elektrodou. Technický argon se dodává v několika stupních čistoty. Tyto stupně se označují jako Argon 4.6, Argon 4.8 nebo Argon 5.0. Čistota 4.6 znamená, že čistota plynu je 99,996% (4 devítky a šestka). Čistota 4.8 znamená 99,998% a čistota 5.0 je pak 99,999%. Jak vidíte jsou to minimální rozdíly v řádu tisícín procenta, ale pro některé aplikace má tento rozdíl v čistotě zásadní význam. Rozdíly v ceně navíc mohou být naopak i v tisících korun. Pro běžné svařování hliníkových a měděných materiálů vyhovuje nejrozšířenější Argon 4,6. Argon 4,8 použijeme pro spoje s vyšším důrazem na kvalitu. Argon 5,0 je nutný třeba na svařování titanu nebo pro laserové aplikace. Největší výhodou (a důvod jeho rozšíření) jsou zejména jeho velmi dobré inozační schopnosti (nízký ionizační potenciál). Má takevhodnou měrnou hmotnost (nižší než vzduch, proto v základních polohách svařování dobře chrání svarovou lázeň). Nevýhodou je poměrně špatná tepelná vodivost.[3]

Helium

je také atomární plyn, inertní, v kontrastu s argonem má helium vysokou tepelnou vodivost a ionizační potenciál, které dávají opačný účinek na svařovací oblouk i samotný svar. Helium poskytuje široký profil závaru, dobrou smáčivost na okrajích housenky a vnáší do svařovací lázně vyšší teplotu než čistý argon. Vysoký ionizační potenciál může vytvářet problémy při zapalování oblouku (nutnost vyššího napětí při stejné délce oblouku). U helia jsou doporučovány vyšší průtoky pro jeho nízkou měrnou hmotnost oproti vzduchu. Čisté helium způsobuje zkratový přenos přídavného materiálu, s výjimkou svařování čisté mědi. [3]

Směs Argon + Helium

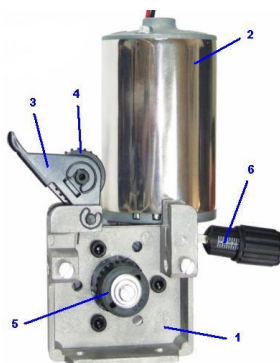
- směsný inertní plyn používaný zejména při automatizovaném a robotizovaném svařování. Příměs helia může být až do 95% ve směsi. Helium ve směsi zvyšuje teplotu v oblouku a toho se dá s výhodou využít i při ručním svařování materiálů větších tloušťek. Ovšem kromě teploty také výrazně zvyšuje cenu plynu, a proto je nejpoužívanější směsí 70%Ar+30%He.

Z hlediska druhů svařovaných materiálů je použití směsí Ar+He stejné jako u čistého argonu.[3]

3.4 Podavací mechanismus při MAG/MIG svařování

PM (svařovací drát) musí být do svarové lázně podáván (posouván) naprosto hladce a konstantní rychlostí. Bude-li rychlost podávání z nějakého důvodu kolísat, ihned se to negativně projeví při svařování (nadměrný rozstřík, neprůvary či naopak propálení materiálu, špatná kresba housenky a další vady). Rychlost podávání je totiž přímo úměrná velikosti svařovacího proudu. A svařovací proud by měl být během svařování také konstantní. Proto musí být kladen velký důraz na kvalitu podavacího zařízení - podavače.

Typy podavacích mechanismů.



obr.2 2-kladkový podavač

2-kladkový podavač

Podavač na obrázku sestává z těchto hlavních komponent:

- 1 - těleso podavače, které nese motor a další díly.
- 2 - elektromotor se šnekovou převodovkou.
- 3 - odklápěcí raménko přitlaku.
- 4 - hladká přitlačná kladka s pohonným ozubením.
- 5 - motorem poháněná kladka s drážkou a ozubením pro pohon přitlačné kladky.
- 6- regulační šroub s pružinou uvnitř pro nastavení přitlačné síly.

Výhody dvoukladkových podavačů:

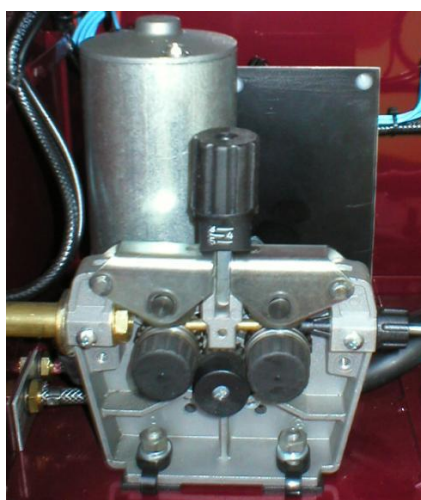
Jsou levné a jednoduché. Plně vyhovují pro svařování menšími proudy, propodávání na krátké vzdálenosti a pro menší podavací rychlosti.

Nevýhody dvoukladkových podavačů:

Mají malou adhezi a jsou tak velmi citlivé na stav podávací dráhy (znečištění bovdenu, zkroucení hořáku, velká délka kabelového vedení hořáku, apod.). Nejsou vhodné pro velké podávací rychlosti (velké proudy). Nejsou vhodné pro dráty, kde musíme mít nastaven malý přítlak (např. hliník).

4-kladkový podavač

Čtyřkladkové podavače jsou doménou profesionální svařovací techniky. Je-li ve svařovacím zdroji osazen 4-kladkový podavač, obvykle se značí 4R. Jejich princip spočívá ve zdvojení dvoukladkového podávání. Stejně jako u dvoukladkových podavačů, můžeme mít 4-kladkové podavače s volnými přítlaky nebo s poháněnými přítlaky. Přítlačné kladky jsou opět na odpružených výklopných raménkách s regulací předpětí pružiny a u poháněného přítlaku je přenos hnací síly pomocí ozubení po stranách kladek – viz obr. 3.



Obr.3 Klasický 4-kladkový podavač

Výhody 4-kladkových podavačů jsou:

Zejména větší adheze. Podavač není tolik náchylný k prokluzům drátu a je tedy méně citlivý na stav podávací dráhy (ale to neznamená, že se nevyžaduje údržba). Lze bezproblémově podávat většími rychlostmi a tedy svařovat většími proudy. Také hořáky mohou být delší (s ohledem na průměr podávaného drátu). To, že 4-kladkový podavač spolehlivě tlačí PM i při menším přítlaku, jej předurčuje pro použití u měkkých svařovacích drátů

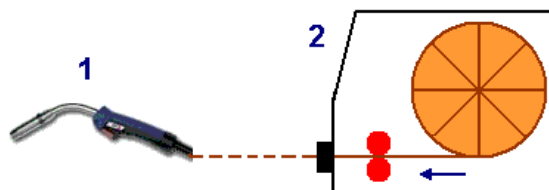
(hliník a bronz), kde je malý přítlak nezbytný pro zamezení jejich deformace (rozmáčknutí drátu).

Nevýhody 4-kladkových podavačů jsou:

Snad jen větší složitost (a cena) 4-kladkového podavače a také větší rozměry, takže jej nelze montovat do malých kompaktních skříní.

Tlačné podávání drátu.

Ve svařovací technice se u MIG/MAG svářeček obvykle používá tzv. tlačné podávání drátu. To znamená, že drát na cívce umístěné ve svářečce (2) je pomocí podávacího zařízení odvíjen z cívky a tlačén do hořáku (1). Názorně to ukazuje následující obrázek č. 4.



Obr.4 Princip klasického tlačného podávání

Vícekladkový podavač

Nabízí se myšlenka, že dalšího zlepšení by se dalo dosáhnout se 6 či více kladkami. Tyto systémy se také zkoušely, ale jejich přínos již není takový a výrobní náročnost značná. Se 6-kladkovými podavači se tak můžete setkat jen u některých robotů, kde je plynulé a hladké podávání opravdu velmi důležité. Pokud je potřeba dodávat PM do větších vzdáleností (> 4,5 m) lze použít následující systém:

Push pull system podávání

Další možností prodloužení vzdálenosti podávání drátu je použití hořáku PUSH-PULL. Princip podávání push-pull („tlač a táhni“)



obr.5 Hořák Push-Pull

Jak je vidět z obrázku, jedná se o určitou modifikaci systému s mezipodavačem (tzn. použití více podavačů). Modifikace spočívá v tom, že pomocný podavač není umístěn v samostatné skřínce, ale je vestavěn přímo v rukojeti svařovacího hořáku

Nevýhodou hořáku Push-Pull je vyšší hmotnost a také rozměry rukojeti hořáku oproti klasickým MIG/MAG hořákům stejného výkonu.

4. Automatizace ve svařování

Ve dnešní době každá firma chce dostat nejvíce zakázek a k tomu je vhodným mít k dispozici novou moderní techniku. Tyto požadavky vedly k postupné automatizaci. Automatizace hlavně zvyšuje produktivitu práce a to je nejdůležitější faktor ve výrobě. Celá řada metod (včetně MIG/MAG procesu) svařování lze dobře automatizovat. Postupně jsou pracovníci (resp. ruční způsob práce) nahrazováni mechanickými a automatizačními přístroji. Tím dochází k úspoře strojního času, materialu, k snížení nákladů apod. Automatizace to je komplexní úkol a vždy je nutno volit optimální řešení s ohledem na všechny požadavky.[5]

4.1 Rozdíl mezi mechanizací, automatizací a robotizací

Mechanizace je procesem, při němž stroje nahrazují člověka při namáhavé nebo stereotypně se opakující práci.

Automatizace, která je z pohledu industrializace nástupcem mechanizace, znamená, že lidskou řídicí činnost nahrazujeme technickými zařízeními, tedy stroji. Automat je takový stroj, který sám vykonává předem stanovené úkony, většinou za použití umělé inteligence. Umělá inteligence je souhrnným názvem pro strojové napodobení inteligentního jednání lidí.

Automatizace označuje použití samočinných řídicích systémů k řízení technologických zařízení a procesů. Z pohledu industrializace jde o krok následující po mechanizaci. Zatímco mechanizace poskytuje lidem k práci zařízení, které jim usnadňuje práci, automatizace snižuje potřebu přítomnosti člověka při vykonávání určité činnosti.[5]

Robot je pak technickým systémem, který je schopen nahrazovat mobilní, a intelektuální funkce člověka. Průmyslovým robotem se rozumí programovatelné vícefunkční technické zařízení (stroj) se schopností zpětné vazby řízení, s manipulačnischopností, s prostorovouorientací a také v mnoha případech vysoceuniverzální.[1]

Mezinárodní organizace pro standardizaci (ISO) přijala definici robota jako: „automaticky řízený, opětovně programovatelný, víceúčelový manipulátor pro činnost ve třech nebo více osách, který může být buď upevněn na místě, nebo mobilní k užití v průmyslových automatických aplikacích“[1]

4.2 Cíle automatizace.

Jako každý pokrok provázející společnost, tak i pokrok ve svařování, představující automatizaci, byl na začátku podmíněn cíly, které chtěli lidé dosáhnout. Nutno podotknout, že spousta cílů se podařilo úspěšně realizovat, ale řada z nich zůstává stále nedořešených. Není možné nežádoucí jevy, provázející svařování, zcela vyloučit, neboť jsou fyzikálnípodstaty. Je však možné vhodnými opatřeními, v oblasti konstrukční a technologické přípravy, je podstatně minimalizovat.

Mezi nejvýznamnější příklady úspěšně vyřešených úkolů patří:

- a) zvýšení kvality, funkčních a technických vlastností svařovaných spojů
- b) zvýšení produktivity a přesnosti
- c) snížení nákladů na výrobu
- d) nepřetržitost práce
- e) práce ve ztížených pracovních podmínkách
- f) programovatelnost a variabilnost výroby

Naopak za nedostatečně řešenou problematiku lze brát v úvahu:

- a) vznik vnitřních napětí a deformací
- b) vznik tepelně ovlivněné oblasti a s tím spojená změna struktury a mechanických vlastností svarového spoje
- d) skryté vnitřní vady ve svarech, které mohou být zdrojem porušení.

4.3 Svařovací automaty

Pod pojmem svařovací automat rozumíme jednoúčelové svařovací zařízení (JUS) především určené pro předem přesně specifikované svařovací operace. Velice jednoduše a rychle se dají svařovat zejména spoje, které jsou lineární a rotační – tedy tvarově relativně jednoduché. Automat v převážné většině má jednu poháněnou osu, která pohybuje buď svařovací hlavou s hořákem, hlavně u lineárních svarů, nebo přípravkem, převážně u kruhových spojů. Lze svařovat i tvarově složitější pevné spoje, avšak pouze takové, u nichž výsledný pohyb bude variací těchto základních pohybů (lineárního a rotačního). Nelze touto kombinací provádět svary zakřivené v prostoru, kde se plynule mění tvar výsledné křivky s úhlem natočení hořáku. Automaty jsou obvykle navrženy na jeden typ svaru. To znamená, že nelze libovolně změnit tvar trajektorie hořáku. Proto se v praxi setkáváme s širokou škálou těchto strojů, které se od sebe konstrukčně nebo technologicky liší. S tímto poznatkem je potřeba počítat při různých návrzích a volbách. Proto jeho hlavní uplatnění, ne však jediné, je ve velkosériové výrobě určitého typu svaru. Automatické zařízení je v dnešní době hlavně řízeno pomocí elektrického pohonu. Předností tohoto pohonu jsou snadný rozvod energie, čistota provozu, jednoduché spojení s řídicími systémy, menší rozměry zařízení a další. V některých případech se stále ještě využívají pneumatické nebo hydraulické pohony, avšak jejich funkce jsou již vedlejší – pomocné. Jednoúčelový stroj se liší od robotizovaných zařízení tím, že nevypočítává nulovou polohu nástroje a jeho úhel natočení v prostoru, nýbrž pracuje pouze se souřadnicemi jednotlivých os, které může vzájemně kombinovat (např. lineární s kruhovou při tvorbě elipsovitého svaru nebo lineární a lineární na ploše – 2D systém,...)[1]

Hlavní části automatu jsou:

- a) svařovací hlava
- b) pohybové osy

c) řídicí jednotka

d) svařovací zdroj

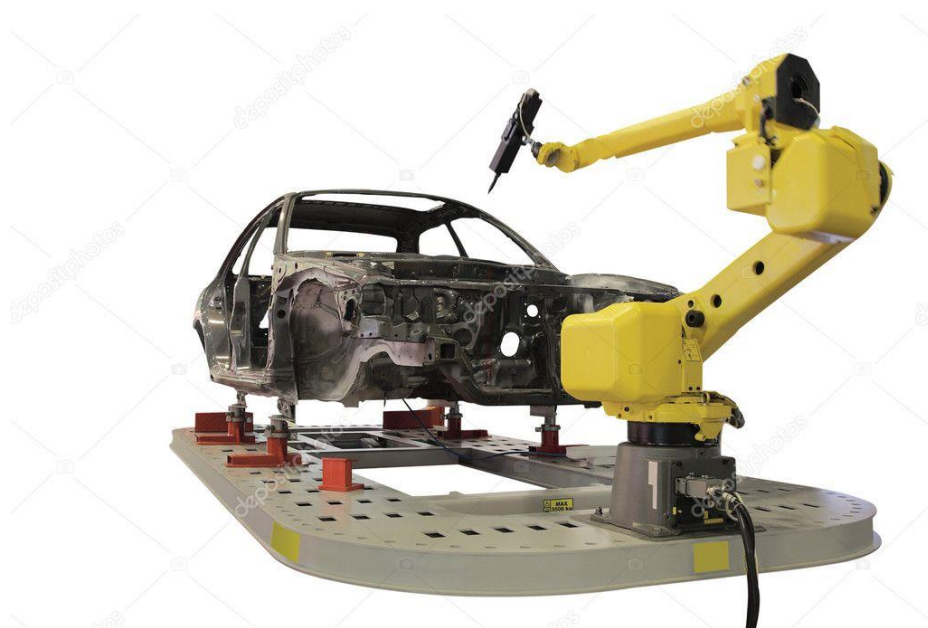
Výhody použití JUS vzhledem k robotu:

- pořizovací cena
- jednoduchost zařízení (rychlejší opravy)
- kratší pracovní cyklus
- nižší poruchovost
- menší nároky na kvalifikaci obsluhy
- menší, kompaktnější zařízení (manipulovatelnost)
- možnost svařování dvěma a více hořáky na jednom zařízení

Pořizovací náklady jsou pro méně náročné typy spojů(konstrukcí) menší, to je velkou výhodou, protože ne vždy je nutné pořizovat hned robotické pracoviště. Tyto výhody jsou důvodem stálého zájmu a konkurenceschopnosti těchto zařízení vůči robotům, které se (v některých oblastech) snaží zcela nahradit veškeré průmyslové stroje a manipulátory.[1]

4.4 Svařovací roboty

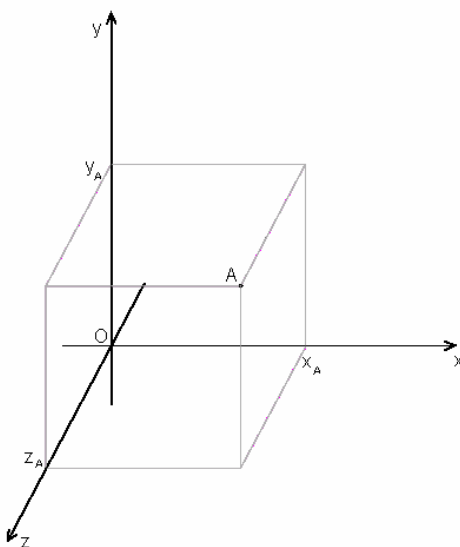
Roboty jsou univerzální, automatické, volně programované, manipulační zařízení, představující výkonnou, komfortní a přesnou svařovací techniku. Pomocí těchto zařízení lze vytvořit tvarově složité, obtížně přístupné a přesné prostorové svary, které by jinými zařízeními nebylo možné provést. Přesnost u dnešních robotů dosahuje až $\pm 0,1$ mm. Pro tyto náročné operace jim musí být umožněno nastavování polohy a orientace nástroje podle požadavků příslušné, bezprostředně realizované, technologické operace. Pro dosažení libovolného bodu v prostoru je nutné mít k dispozici 3 stupně volnosti, pro libovolnou orientaci nástroje je potřeba dalších 3 stupňů volnosti. Proto průmyslové roboty jsou zpravidla konstruovány se 6-ti stupni volnosti. Koncepce a kinematika pohybových částí robotů vychází z umělé reprodukce funkcí lidské ruky. Každý průmyslový robot je charakterizován určitým kinematickým principem, který do značné míry ovlivňuje jeho možnosti a tím i jeho použití. Zároveň vymezuje určitý operační prostor, do jehož libovolného bodu může zasáhnout. [1]



obr.6 Svařovací robot

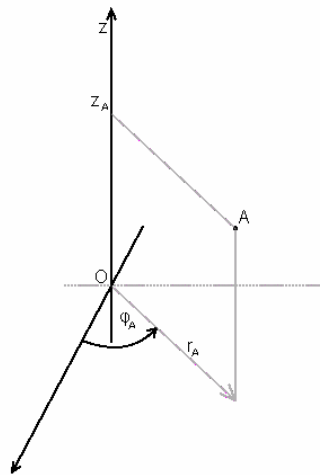
Roboty využívají čtyř základních skupin souřadnicových systémů:

Pravouhlý – se třemi posuvnými dvojicemi. Jedná se o tři lineární pohyby v souřadnicích x, y, z , kde pracovním prostorem je kvádr – viz obr. 7.



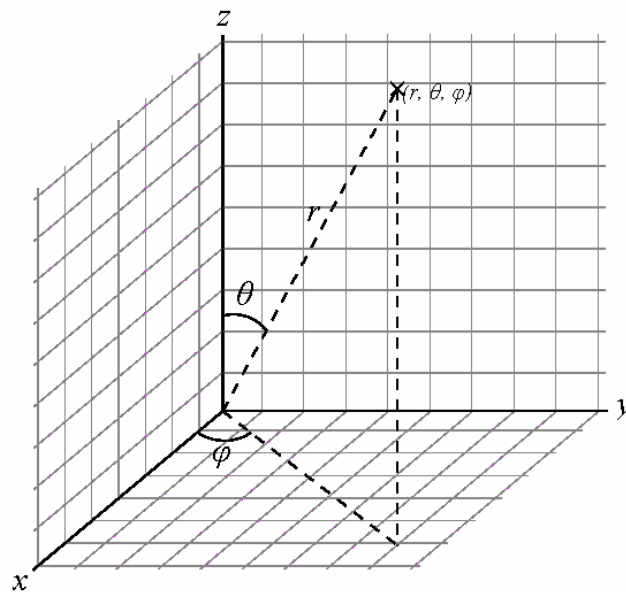
Obr.7Pravouhlý systém souřadnic

Válcový – se dvěma translačními a jednou rotační dvojicí, což znamená dvalineární pohyby v souřadnicích x, z , za rotaci kolem osy z . Pracovní proctor je válcový prstenec.



Obr .8 Válcový systém souřadnic

Sférický – se dvěma rotačními a jednou translační dvojicí, kde se jedná o jeden lineární pohyb v souřadnici x, naklápění v rovině s osou za rotaci kolem osy z.



Obr.9 Sférický systém souřadnic

Úhlový- se třemi rotačními dvojicemi, kde prostorem je torusový prstenec. Robot je v dnešní době zpravidla řízen, stejně jako automat, pomocí elektrického pohonu v kombinaci s vedlejšími převážně pneumatickými pomocnými pohony. Opět je to z důvodů výše uvedených a hlavně kvůli vysoké přesnosti polohování u krokových motorů a velmi dobré seřiditelnosti.

Robotizované svařovací zařízení obsahují tyto části:

- a) klasický svařovací hořák (strojný)
- b) pohybové osy v ramenách
- c) zdroj svařovacího napětí, proudu, popřípadě posuvu drátu
- d) řídicí jednotka
- e) periferní zařízení (pracovní stoly, polohovadla, čisticí stanice, bezpečnostní prvky, senzory)

Části robotů jsou závislé na použité technologii. U obloukových metod navíc musí být k dispozici zařízení na podávání drátu, u laseru optika a další specifické zařízení, bez kterých by daný způsob svařování nemohl proběhnout. Pracovním orgánem daných zařízení je úchopná nebo technologická hlavička, nahrazena svařovacím hořákem. Konstrukce musí umožňovat dobrý přístup do pracovních míst, z toho vyplývá ergonomická a tvarová odlišnost ručních a strojních hořáků. Jsou vždy navrženy pro požadovanou svařovací technologii (např. metodu MAG, TIG a další) se speciálními rozměry, tvary a specifickými požadavky pro danou metodu.[1]

Hlavička robotu musí umožňovat a zabezpečovat snadné:

- upnutí a přesné nastavení hořáku
- upnutí snímačů polohy svarových ploch, spojů případně překážek
- upnutí manipulačních mechanizovaných přísunů a odsunů snímačů
- upnutí kompletu vedení kabelů a hadic
- uvolnění z technologické hlavičky

Výhody použití robotu vzhledem k JUS (jednoúčelové svařovací zařízení):

- vysoká variabilita svařování
- schopnost vytvářet složité tvarové spoje
- univerzálnost

5. Rozbor současného stavu v oblasti navařování 3D struktur

Aditivní výroba (AM – Additive Manufacturing, 3D tiskapod.) je inovativní výrobní proces, kterým je možné vytvářet trojrozměrné objekty tak, že se postupně skládá vrstva po vrstvě určitého materiálu a tím se vytvářejí rozličné finální tvary podle CAD předlohy (zatímco u konvenčních způsobů výroby, jako např. obrábění, se odstraňuje nežádoucí materiál z plného průřezu).

V současné době je AM široce používáno v prototypové výrobě, na výrobu komponent strojů, zařízení a konstrukcí z různých materiálů. Je to průmyslová oblast, která v současné době prochází velmi intenzivním vývojem a je na ni soustředěna velká pozornost.

5.1 Princip metody WAAM

WAAM(Wire and Arc Additive Manufacture) metoda výroby spočívá v ukládání velkého počtu jednotlivých návarových housenek vedle sebe (resp. na sebe). Součásti jsou tedy tvořeny postupným navařováním jednotlivých vrstev po trajektorii budoucího obrysu součásti (vždy ze zdola nahoru) s konstantní nebo adaptivní tloušťkou návarové „stěny“, případně ukládáním materiálu do těchto obrysů k vytvoření plných částí. Proto přesné modely pro geometrii jednotlivých housenek, resp. vrstev (tvořených překrývajícími se návarovými housenkami) hrají důležitou roli při určování kvality povrchu a rozměrové přesnosti vyrobených produktů.

Jedná se o typ SMD (Shaped Metal Deposition) technologie kombinující elektrický oblouk s využitím přídavného materiálu (PM) ve formě kovového drátu (jako PM se používají běžné svařovací dráty pro MIG/MAG svařování). Pro tyto účely se dnes často na místo elektrického oblouku používají laser a elektronový svazek s použitím práškového PM. Tyto metody jsou však omezeny rychlostí nanášení vrstev a velikostí možného výrobku. Naproti tomu WAAM metoda je ideální proces, který si klade zacíl vyrábět produktivně velké komponenty. Proces je nutno automatizovat, k čemuž lze využít univerzální robotická pracoviště (uzpůsobená pro svařování), jejichž velikost pak limituje velikost (resp. dosah) pracovní plochy. Pohyb zařízení (svařovacího hořáku) může zabezpečovat buď robotický systém, nebo počítačem řízený portál.[2]



Obr.10 Ukázky možností technologie WAAM

5.2 Použití WAAM.

Pro zpracování metodou WAAM mohou být použity všechny svařitelné materiály, jako jsou konstrukční i vysokolegované oceli, hliník, titan, nikl, měď a jejich slitiny. Jedná se tedy o slibnou alternativu pro zhotovení součástí vyrobených z drahých (příp. obtížně zpracovatelných) materiálů, kde u konvenčního obrábění často vzniká extrémně vysoký poměr BTF (buy to fly). U některých typů speciálních materiálů je vhodné upravit teplotní režim a předepsat např. Teplotu interpass mezi jednotlivými vrstvami návaru (případně je možné zařadit i speciální režim „válcování“ navařených vrstev). Kromě toho lze WAAM použít i na výrobky tvořené z několika různých materiálů. V porovnání s běžnými konvenčními procesy výroby jsou výhodami technologie WAAM: flexibilní výroba různých typů konstrukcí, již zmíněný široký výběr materiálů, vyrobitelnost součástí různě složitých geometrických tvarů, nízké náklady a krátké dodací časy. Tvar výrobků je omezen „pouze“ podmínkou umožnění postupného nanášení (navarování) jednotlivých vrstev. Nicméně i tak WAAM nabízí konstruktérům možnost vytvářet objekty, které byly dříve považovány za nevyrobitelné. [2] [9]

Jak bylo zmíněno výše, nejčastěji jsou pro metodu WAAM používány metody svařování elektrickým obloukem v ochranných atmosférách: TIG a MIG/MAG. Rychlost nanášení (výkon navaření) pro WAAM při použití metody MIG/MAG může být až několik kilogramů za hodinu. Nedostatkem MIG/MAG metody je nižší stabilita oblouku a rozstřík během tvorby návaru, případně zvýšená porozita. Tyto problémy je možné snížit použitím modifikovaných procesů metody MIG/MAG, které sníží vnesené teplo a mají bezrozstříkový charakter procesu – např. metoda Cold Metal Transfer (CMT) firmy Fronius, Cold Arc firmy EWM nebo Intelligent Arc Control (IAC) firmy Migatronic apod. Výzkumné práce jasně ukazují, že CMT a podobné modifikace mají při použití WAAM řadu výhod, jako jsou např.: Vysoká kvalita a bezrozstříkové navarování, nízký tepelný příkon, vynikající reprodukovatelnost, vysoký výkon navaření a možnost tvorby menších tloušťek stěn, jemnější mikro struktura atd. [2] [9]



obr.11 Navařování 3D struktur metodou WAAM

5.3 Výhody robotického 3D navařování.

Současné 3D tiskárny využívající kov jsou omezeny maximálními rozměry pracovní oblastia také zahrnují velké náklady na prášek (přídavný materiál). Ale svařovací roboti jsou schopni svařovat od jednoho až po několik kg materiálu za hodinu a to se standardním svařovacím drátem. Díky tomu je možné vyrábět větší kusy za nižší ceny a ušetřit čas.

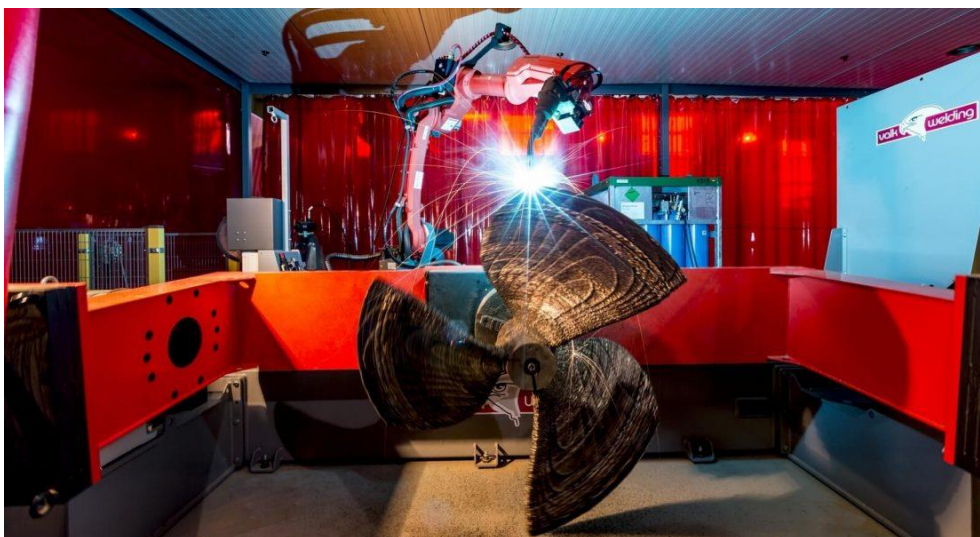
5.4 Zaměření robotického 3D navařování

Metoda WAAM lze použít v mnoha oborech lidské činnosti. Např. Při výrobě těžkých konstrukcí pro zábavní průmysl, lodní průmysl, letecký průmysl, zemědělský průmysl I automobilový průmysl.

Jedním z konkrétních příkladů může být např. činnost společností Huisman, Heerema a Keppel Verolme, které jsou aktivní v oblastech výroby pro lodní a off-shore průmysl. Těmto společnost se např. povedlo “vytisknout” (navářit) za pomoci svařovacích robotu dvakrát zakřivený díl, který byl inspirován čepelí lodního šroubu a zdvihací hák.

Normálně by takové díly byly opracovány z odlitku. Obvykle by dodávka dílu z odlitku zabrala několik týdnů až několik měsíců. Svařovací roboti dokončili tento testovací kus během několika hodin. (Jako dokončovací práce je poté nutné výrobek ještě obrousit a naleštit).

Na obr. 12 je ukázána výroba 400 kg vážícího lodního šroubu, což je současný milník v technologii 3D tisku.[11]



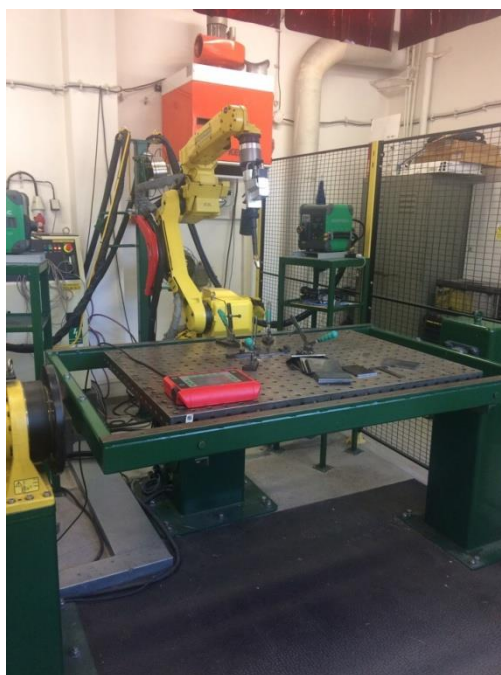
obr.12 Ukázka výroby metodou WAAM

6. Praktická část

V praktické části mé bakalářské práce jsem porovnal teploty a tvrdost navařovaných struktur navařených nejprve konvenční metodou MAG (zkratovým procesem) a pro porovnání moderní metodou CMT.

6.1 Popis Pracoviště

Experiment byl prováděn v Laboratoři výuky svářečských technologií (LVST) na ČVUT v Praze. Tato laboratoř je vybavena mimo jiné i komplexním robotizovaným pracovištěm pro svařování elektrickým obloukem v ochranných atmosférách (které bylo dodáno jako celek firmou Migatron Automation), které je schopné využívat metody svařování MIG/MAG (včetně svařování impulsním proudem a svařování plněnými elektrodami) a TIG pro svařování stejnosměrným i střídavým proudem s využitím podavače studeného drátu, vše doplněné o potřebné senzorické systémy a systém off-line programování pro simulaci výrobního procesu.



Obr. 13 Robotické pracoviště LVST

Pracoviště tvoří komplexní svařovací systém, který je vybaven optoelektronickými a elektromechanickými bezpečnostními prvky, které zamezují vstupu nepovolaným osobám do pracovního i servisního prostoru. V případě jejich aktivace dojde k okamžitému zastavení

pohybu robota nebo polohovadla a odpojení servopohonů od napájení. Mezi tyto prvky patří optická závora, která je umístěna před pracovním prostorem robota a také koncový spínač, který slouží k uzavření přístupových dveří do operačního prostoru.

Robot používaný pro svařování ve školní laboratoři je univerzální šestiosý průmyslový robot Arc Mate 100iCod společnosti Fanuc Ltd. V sortimentu průmyslových robotů patří tento robot mezi roboty s menší nosností, ale s vysokou rychlostí a přesností pohybu, což plně vyhovuje požadavkům pro svařování. Nosnost na konci šesté osy je 10 kg, maximální dosah činí 1420 mm a opakovatelnost je $\pm 0,08$ mm. Pracovní prostor robota je vymezen možnostmi pohybu jednotlivých ramen. Na konci zápěstí robota je nasazen výměnný svařovací hořák pro použitou metodu svařování, s vodním chlazením.



Obr. 14 Průmyslový robot Arc Mate 100iC

Byl použit svařovací zdroj: Transpuls synergic 3200 CMT, svařovací hlava Robacta. Díky výkonnostním třídám 270 až 500 A splňují přístroje TransPuls Synergic CMT i ty nejnáročnější požadavky automobilového a dodavatelského průmyslu, výroby technologických a chemických zařízení, výroby strojů a kolejových vozidel nebo použití v loděnicích. Díky podpoře více procesů je tento svařovací zdroj vhodný pro svařování MIG/MAG, TIG i elektrodové svařování a také pro ruční i robotizovaný provoz.[10]

Pro záznam svařovacích parametrů byl použit nonitorovací systém: W.I.S(Welding Information system), kterým bylo v průběhu svařování nasnímáno: napětí a proud, je to ideální nástroj pro vytváření dokumentace svařování, usnadní navrhování postupů svařování (WPS)



Obr. 15 TransPuls Synergic 3200 CMT

Byl používán podavač přímo ve zdroji a vyrovnávací člen namontovaný přímo na rameni robota



Obr.16 Ruční ovladač operátora

Ruční ovladač operátora se skládá z napájecího zdroje, obvodu uživatelského rozhraní, obvodu řízení pohybu, paměti a karty vstupů a výstupů.

Pro ovládání řídicí jednotky může operátor použít teach pendant nebo operační panel.

CPU karta řídí přes sekvenční obvod servozesilovač, který pohybuje všemi osami robota. Paměťová karta uchovává programy a uživatelská data v paměti typu CMOS RAM na CPU kartě. Karta vstupů a výstupů tvoří rozhraní mezi řídicí jednotkou a periferními zařízeními. Osazení řídicí jednotky příslušnými kartami je závislé na robotovi a systému, který ho řídí.

Účel experimentu: byly navařeny jednoduché vzorky kruhového tvaru s různými počty vrstev návaru – oběma výše zmíněnými metodami.

Vzorky byly vytvořeny optimalizovanými parametry (jejichž optimalizace proběhla v rámci jiných současně probíhajících výzkumných prací, na které tato BP navazovala)

V průběhu tvorby vzorků byly monitorovány základní svařovací parametry pro kontrolu procesu a po navaření byla měřena teplota povrchu návarových housenek.

Teplota byla měřena následujícími zařízeními:

GTH-1160 je digitální, vysoce kvalitní a dotykový teploměr, vybavený termočlánkem typu K. Změří teplotu během několika sekund. Součástí balení je teplotní čidlo a plastový kufřík.

Technická data:

• Přesnost: ± 1 °C

Pracovní teplota: -50 °C až 1 150 °C

Napájení: 9 V baterie

Rozměry: 106 x 67 x 30 mm

•Váha: 150g



Obr.17 Digitalní teploměr GTH 1160

Digitalní teploměr Voltcraft K300

Technická data:

Základní přesnost : $\pm 0,3 \% + 1$ °C

Teplotní rozsah : -200 až +1370 °C

Napájení : _Baterie 9 V

Rozměry : 54 x 164 x 34 mm

Váha:100g



Obr.18 Digitalní teploměr Voltcraft K300

6.2 Naváňování metodou MAG (zkratovým procesem).

Naváňovací parametry:

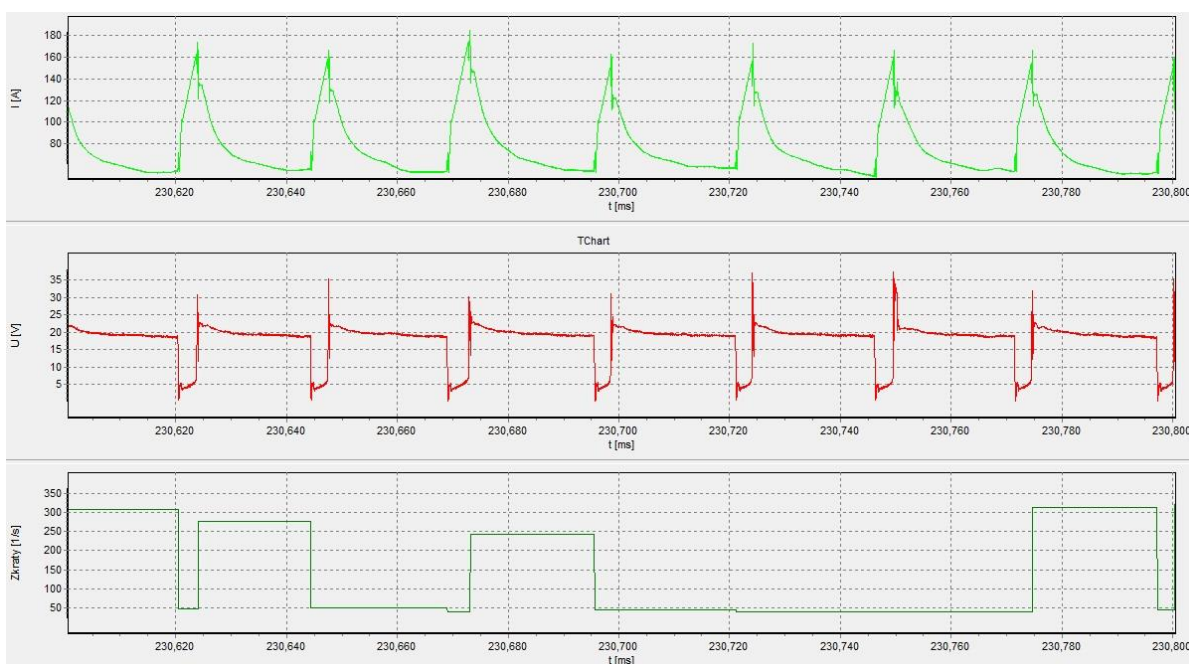
- Rychlost svaňování: 30 cm/min
- Rychlost podávání drátu: 2,4 m/min
- Výškový krok: 1,2 mm

Podmínky provedení experimentu:

- Svaňovací drát: G3Si1 o průměru 1 mm
- Ochranný plyn: M21 (82% Argonu + 18 % CO₂)
- Čas měření teploty po naváňení: 15 s

Přednastaveno zdrojem pro rychlost podávání drátu 2,4 m/min: svaňovací proud = 67 A, svaňovací napětí = 16,5 V

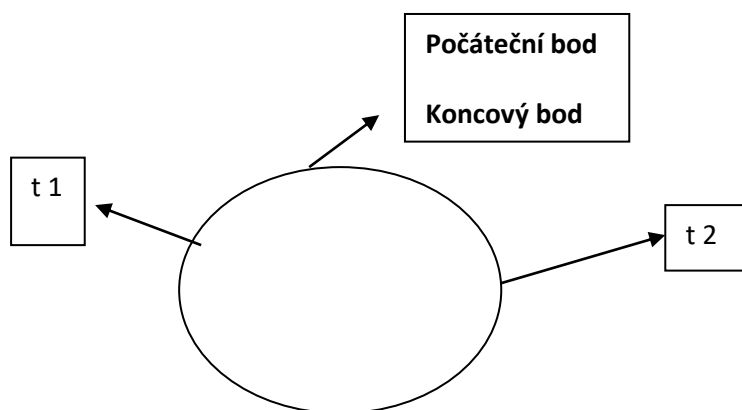
Teplota v laboratoři: 31,2 °C



Obr.19 Průběh proudu a napětí v závislosti na čase pro MAG zkrat

Po svaření byla teplota měřena ve dvou různých místech (a vzdálenostech) od počátku návaru (viz obr. 20) – v 1. a 3. třetině kruhového návaru. Ve třech pozicích – na povrchu návaru, uprostřed návaru z boční strany a na povrchu základové desky, na které byl návar prováděn. Návar byl prováděn z pozice, která je na obr. 20 označena jako „počáteční bod“, ve směru hodinových ručiček. Při přejezdu na další vrstvu byla postupně zvyšována pozice hořáku o 1,2 mm (mezi jednotlivými vrstvami) v první třetině návaru. Návar byl prováděn kontinuálně bez přerušování procesu navařování.

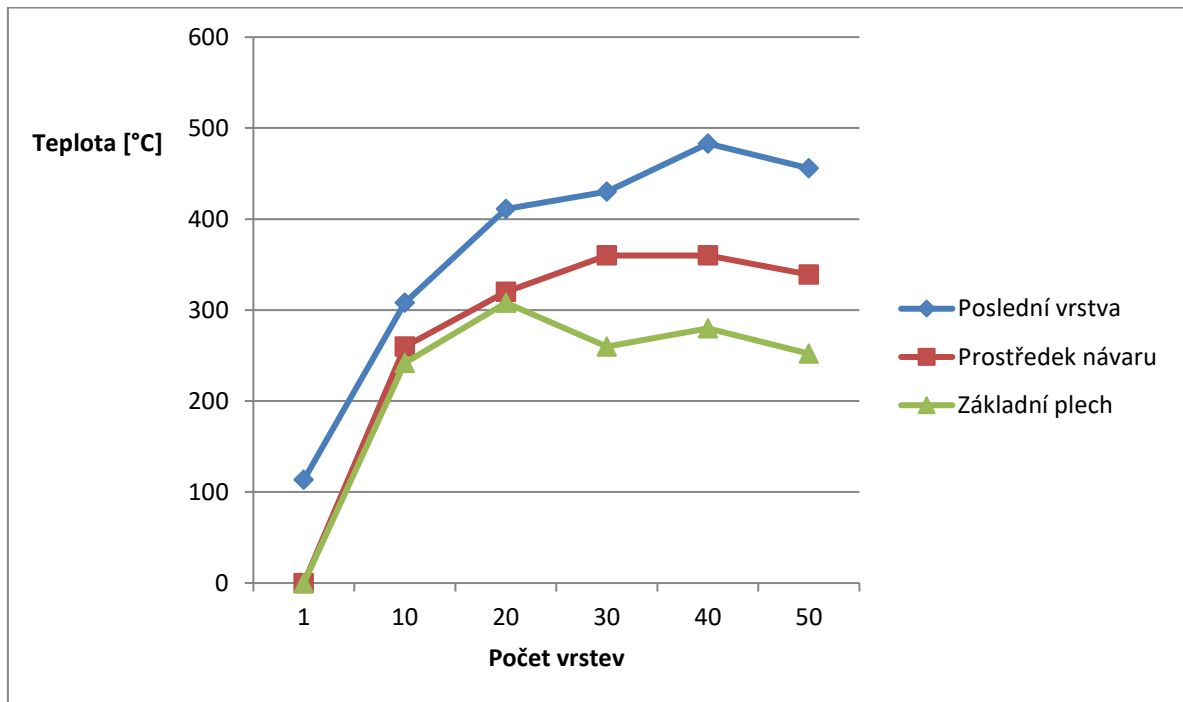
Takto byly vytvořeny postupně vzorky s 1, 10, 20, 30, 40 a 50 vrstvami, které byly postupně proměřeny. Nejprve byly vytvořeny vzorky výše uvedenými parametry, metodou MAG a poté byl experiment zopakován i pro metodu CMT.



Obr.20 Místa měření teplot návaru

Tab.2 Výsledky měření zkratem

Počet vrstev	Místo měření	t1 [°C]	t2 [°C]
1	Poslední vrstva	113,5	116
10	Poslední vrstva	308	330
	Prostředek návaru	260	270
	Základní plech	242	258
20	Poslední vrstva	411	496
	Prostředek návaru	320	350
	Základní plech	308	320
30	Poslední vrstva	430	457
	Prostředek návaru	360	411
	Základní plech	260	281
40	Poslední vrstva	483	481
	Prostředek návaru	360	422
	Základní plech	280	317
50	Poslední vrstva	456	466
	Prostředek návaru	339	371
	Základní plech	252	275

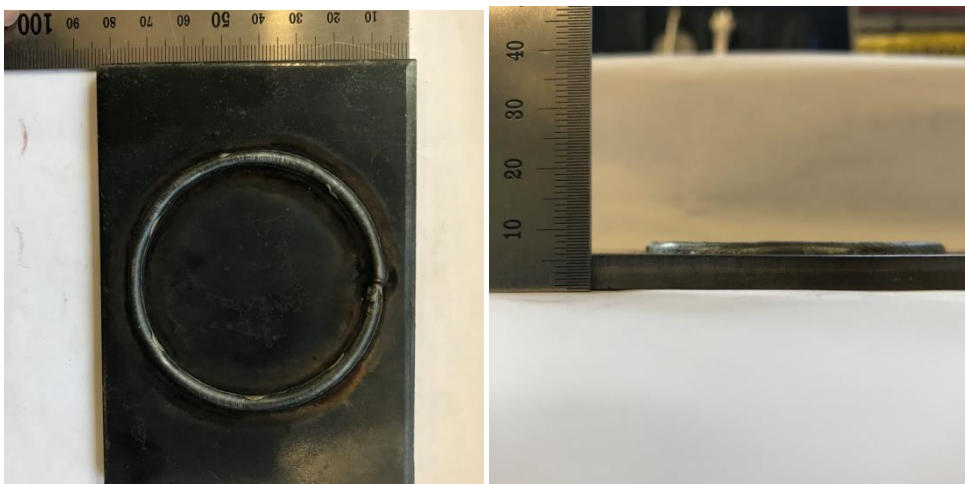


Obr. 21 Závislost teploty na počtu vrstev - MAG navařování

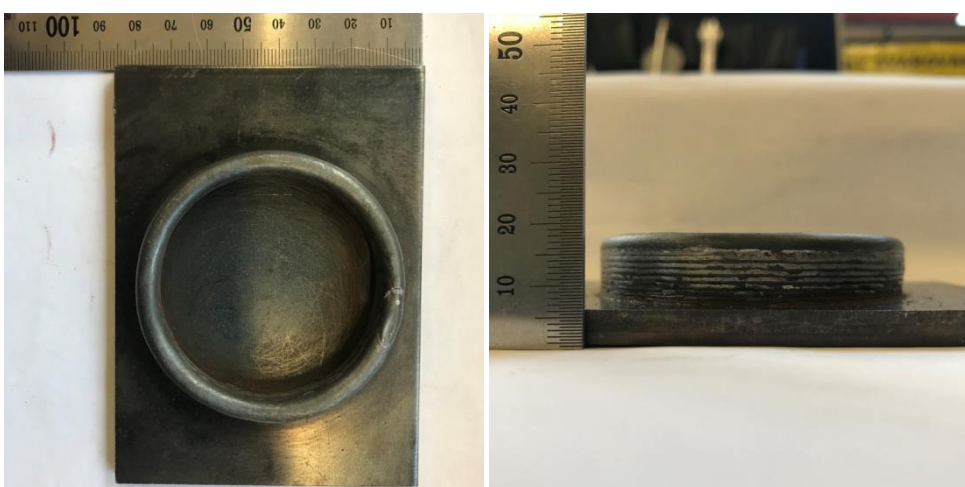
Z grafu na obr. 21 je patrné, jakým způsobem se zvyšuje teplota s přibývajícím počtem vrstev, a jaká je max. teplota poslední vrstvy. Pro střední část návaru a povrch základního plechu

už jsou poměry jiné, protože větší počet vrstev se navařuje delší dobu a prostředek návaru a základní plech už se stačí ochladit.

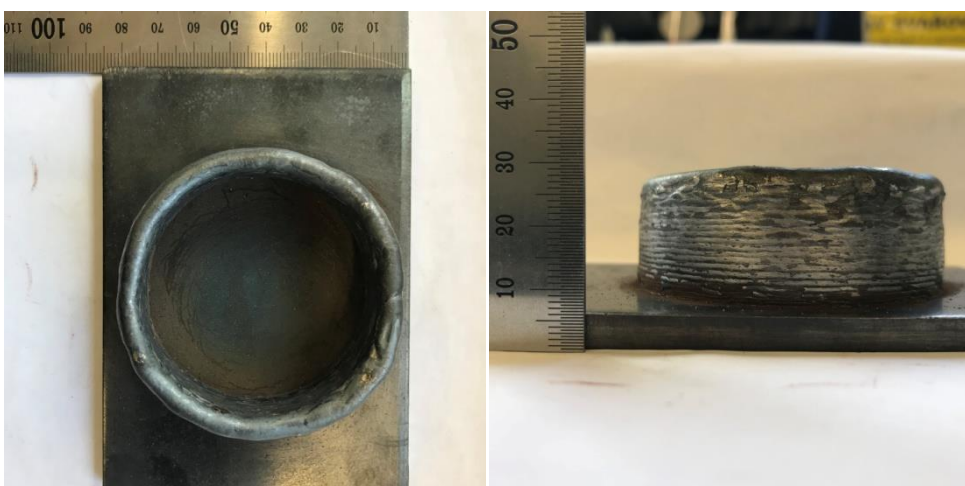
Na dalších obrázcích (viz obr. 22 až 27) je zdokumentována výška návarů po vytvoření určitého počtu vrstev. Výsledky jsou číselně přeneseny do tabulky č.4



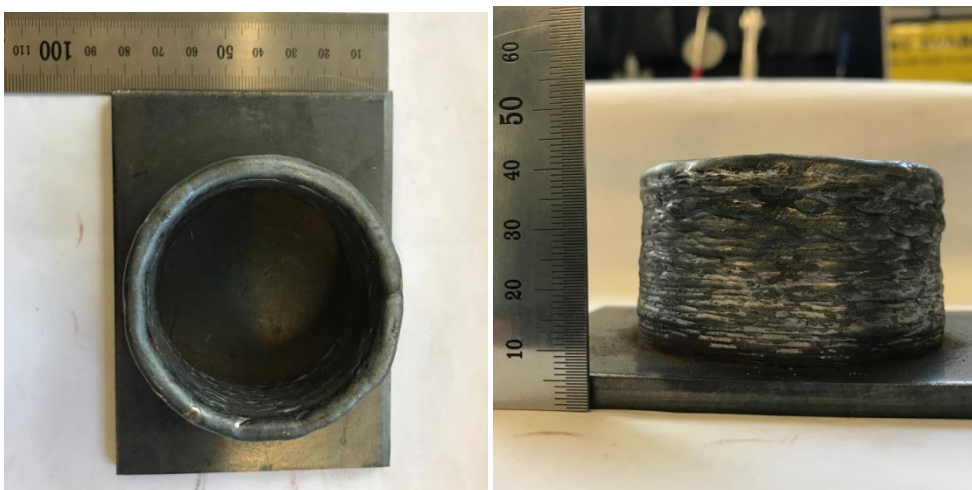
Obr. 22 Navařování zkratem 1 vstava



Obr. 23 Navařování zkratem 10 vrstev



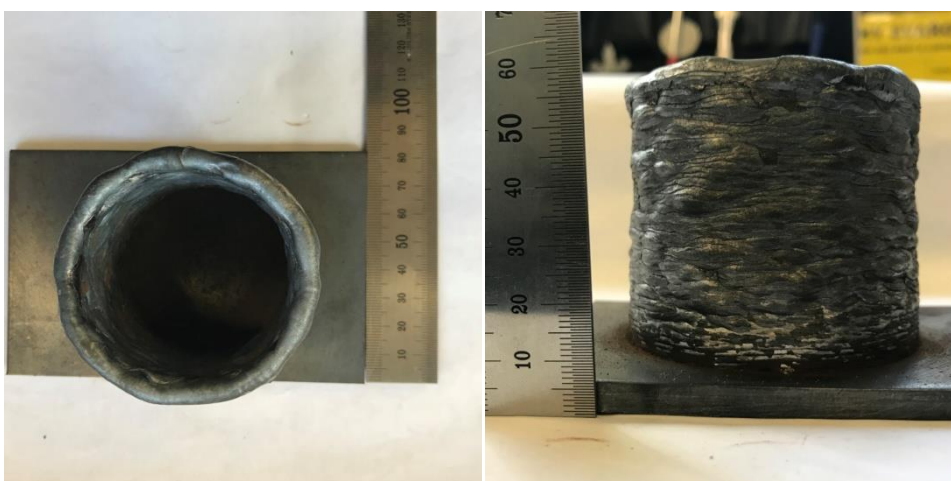
Obr.24 Navařování zkratem 20 vrstev



Obr.25 Navařování zkratem 30 vrstev



Obr.26 Navařování zkratem 40 vrstev



Obr.27 Navařování zkratem 50 vrstev

6.3 Navařování metodou CMT

Svařování metodou CMT, se hodí speciálně pro svařování tenkých plechů při nízké deformaci. Tento proces patří k metodám svařování elektrickým obloukem a je dalším vývojem svařování MIG a MAG. Technika je založená na využití zcela nové metody uvolňování kapky využívající střídavého dopředného a zpětného pohybu drátu v rychlých intervalech. Toto vede k tomu, že se kapky uvolňují kontrolovaně mezi materiálovými vrstvami čistý a volný přechod bez rozstříku. U svařovacího zařízení CMT řídí celý proces svařování centrální řídicí a regulační jednotka se signálním procesorem.[10]

Nastavené parametry při navařování metodou CMT:

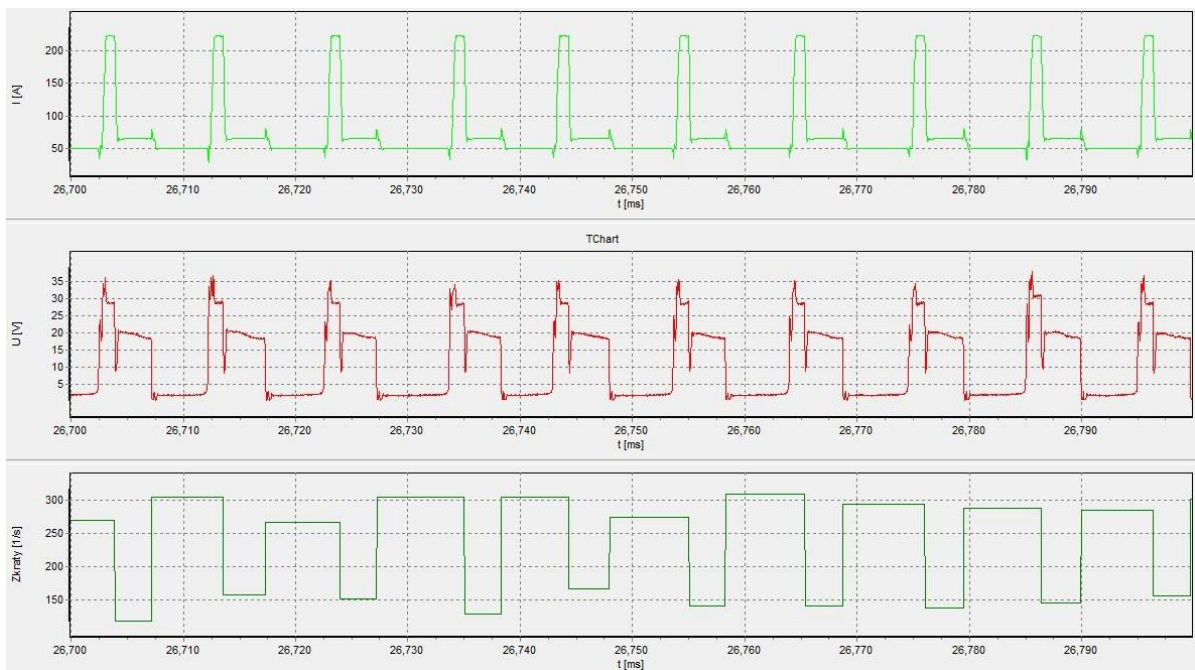
- Rychlost svařování: 30 cm/min
- Rychlost podávání drátu: 2,4 m/min
- Výškový krok: 1,2 mm
- Korekce délky oblouku: 0 %
- Korekce dynamiky: 0.0

Podmínky provedení experimentu:

- Svařovací drát: G3Si1 o průměru 1 mm
- Ochranný plyn: M21 (82% Argonu + 18 % CO₂)
- Čas měření teploty po navaření: 15 s

Přednastaveno zdrojem pro rychlost podávání drátu 2,4 m/min: svařovací proud = 74 A, svařovací napětí = 9,4 V

Teplota v laboratoři: 31,2 °C

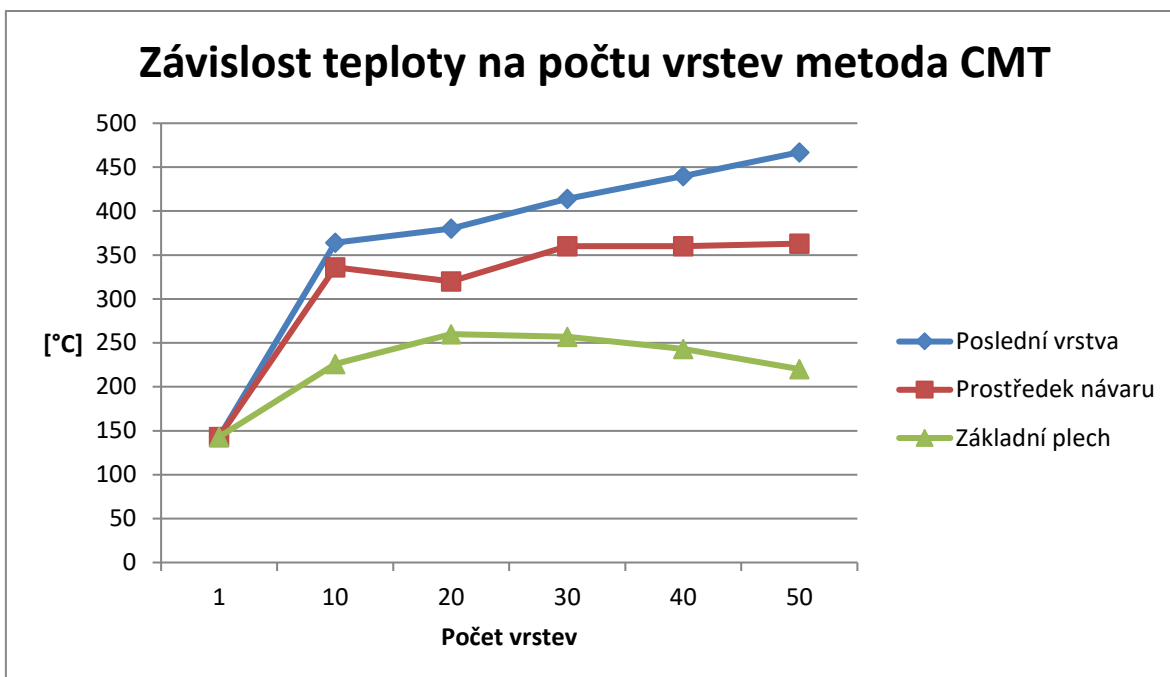


Obr.28 Průběh proudu a napětí v závislosti na čase pro metodu CMT

Měření a vyhodnocení bylo provedeno stejným způsobem, jako v předchozím případě...

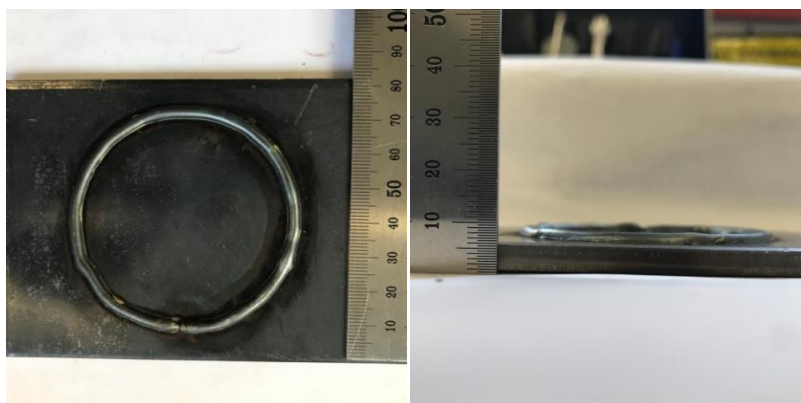
Tab.3 Výsledky měření metodou CMT

Počet vrstev	Místo měření	t1 [°C]	t2 [°C]
1	Poslední vrstva	143	146
10	Poslední vrstva	364	313
	Prostředek návaru	336	310
	Základní plech	226	285
20	Poslední vrstva	380	400
	Prostředek návaru	320	330
	Základní plech	260	283
30	Poslední vrstva	414	409
	Prostředek návaru	360	378
	Základní plech	257	293
40	Poslední vrstva	440	430
	Prostředek návaru	360	395
	Základní plech	243	255
50	Poslední vrstva	467	455
	Prostředek návaru	363	363
	Základní plech	220	255

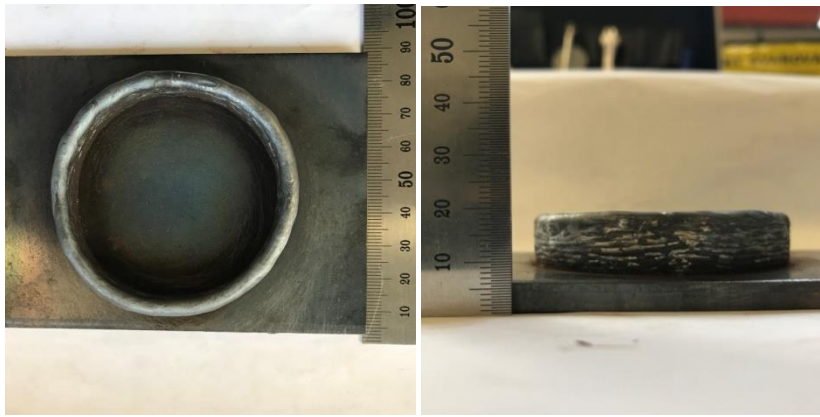


Obr. 29 Závislost teploty na počtu vrstev - MAG navařování metoda CMT

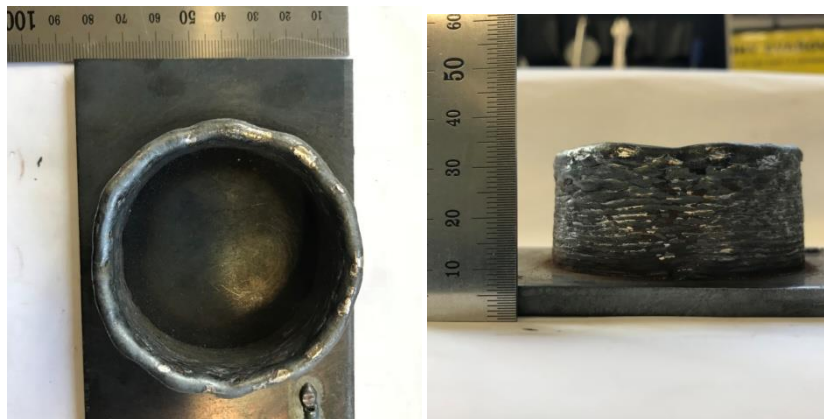
Na dalších obrázcích (viz obr. 30 až 35) je zdokumentována výška návarů po vytvoření určitého počtu vrstev. Výsledky jsou číselně přeneseny do tabulky č.4.



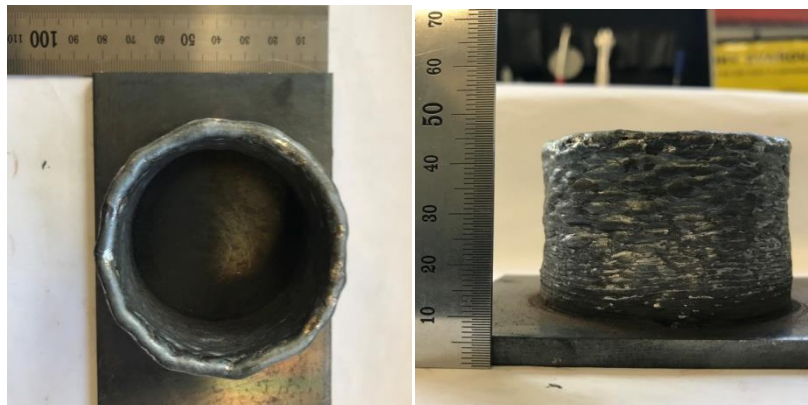
Obr.30 Navařování metodou CMT 1 vrstva



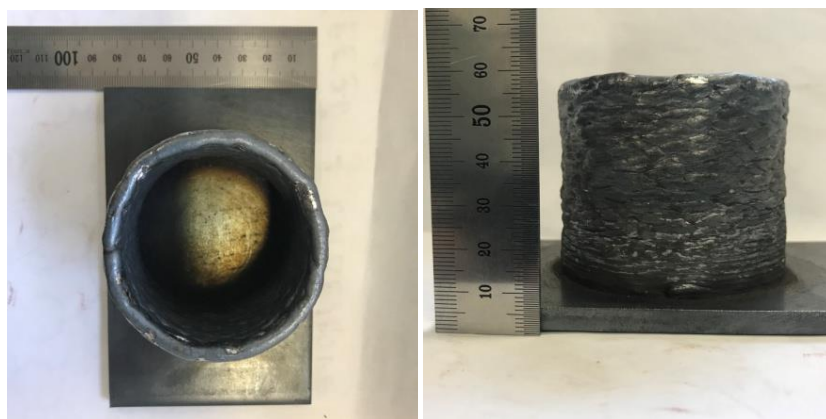
Obr.31 Navařování metodou CMT 10 vrstev



Obr.32 Navařování metodou CMT 20 vrstev



Obr.33 Navařování metodou CMT 30 vrstev



Obr.34 Navařování metodou CMT 40 vrstev



Obr.35 Navařování metodou CMT 50 vrstev

Tab.4 Výška návaru MAG navařování

Počet vrstev	Výška návaru v mm	
	Metoda MAG – zkrat	Metoda CMT
1	3	3
10	10	8
20	18	23
30	30	35
40	42	47
50	50	56

7.Závěr

Z uvedených výsledků a obrázků lze vidět, že kvalita návaru metodou CMT je lepší než konvenčním MAG navařováním zkratovým procesem. Což vyplývá z toho, že při metodě CMT se kapky uvolňují kontrolovaně a mezi materiály vzniká čistý a volný přechod bez rozstříku a celkově se do materiálu vnáší méně tepla.

Zároveň je znatelný rozdíl ve výšce navařeného vzorku, při stejném počtu vrstev (50mm pro 50 vrstvý návar u MAG – zkrat, oproti 56 mm pro CMT). Zde je nutno dodat, že pro prvních 20 vrstev návaru je vzhled vzorku u obou metod poměrně dobrý. Teplota v poslední vrstvě u CMT zde dosahuje max. 450 °C, u MAG zkrat max. 450 °C. Další vrstvy již tuto teplotu překračují a dochází zde k výrazně nerovnoměrnosti návaru (bylo by vhodné do budoucna pozměnit parametry navařování, příp. vytvořit systém chlazení, který by teplotu dále snižoval, aby i v dalších vrstvách byl návar rovnoměrný). I z tohoto pohledu jsou výsledky lepší pro metodu CMT.

Tato BP potvrdila předpoklad, že pro WAAM metodu navařování budou vhodnější moderní modifikace MAG procesů, jako např. CMT, které snižují vnesené teplo do materiálu. Nicméně i u nich je potřeba pro malé rozměry vzorků optimalizovat a měnit parametry v průběhu navařování (případně proces použít pro dostatečně velké vzorky, které by se stačili dostatečně samovolně ochlazovat). Geometrické vlastnosti návarů lze hodnotit např. parametry, jako jsou tzv. účinná tloušťka stěny nebo vlnitost povrchu. Dále by bylo vhodné zkoumat vliv navařování na strukturní a mechanické vlastnosti.

Seznam použité literatury

- [1] CHVÁLA.B., MATIČKA.R.,TALÁCKO.J. Průmyslové roboty a manipulátory Vydalo SNTL-Nakladatelství technické literatury Praha, 1990. ISBN 80-03-00361-X.
- [2] Chen Shen. Application of wire-arc additive manufacturing (WAAM) process in in-situ fabrication of iron aluminide structures, university of Wollongong, Thesis, 2016
- [3] ROUBÍČEK, Martin a Václav PILOUS. Vliv ochranných plynů na vlastnosti svarového spoje při svařování nelegovaných konstrukčních ocelí metodou 135 - MAG. [online]. Dostupné z: http://www.airliquide.cz/file/otherelement/pj/mag_svarovani49124.pdf
- [4] Chen, J.: Hybrid design based on wire and arc additive manufacturing in the aircraft industry, Thesis, Cranfield university, 2012.
- [5] CHVÁLA.B., NEDBAL.J.,DUNAY.G. Automatizace Vydalo SNTL-Nakladatelství technické literatury Praha, 1987, 603s.
- [6] www.valkwelding.com
- [7] DOLEJSKÝ, Tomáš. Učebnice pro základní kurz svařování tavící se elektrodou (MIG/MAG svařování). 3. Aktualizované vydání. Ostrava: Zeross - svářečské nakladatelství, 2014. Svařování. ISBN 978-80-85771-05-3
- [8] Kolarik, L: „Svařitelnost neželezných kovů – Vliv svařování na vytvrditelné slitiny hliníku typu AlMgSi“, ČVUT FS disertační práce, Praha, 2012
- [9] Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., Li, H.: A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM), Robotics And Computer-Integrated Manufacturing, 31, s. 101–110.
- [10] Sequeira Almeida, P. M., and Williams, S. W.: Innovative process model of Ti-6Al-4V additive layer manufacturing using Cold Metal Transfer (CMT), 21th International Solid Freeform Fabrication Symposium. 2010: Austin, Texas, USA, s. 25–36.
- [11] <https://www.mmspektrum.com/clanek/navarovani-metodou-waam.html>
- [12] AMBROŽ,O., KANDUS,B., KUBÍČEK,J. Technologie svařování a zařízení. Učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů, 1.vyd. Vydalo nakladatelství ZEROSS v Ostravě v edici Svařování, Ostrava, srpen 2001, 395 s. ISBN 80-85771-81-0.