



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**3D TISK KOVŮ DRÁTOVÝMI METODAMI
SVAŘOVÁNÍ**

3D METAL PRINTING BY WIRE WELDING METHODS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Dalibor Příbyla

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Marian Sigmund, Ph.D., IWE

BRNO 2022

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Dalibor Příbyla**
Studijní program: Strojírnoství
Studijní obor: Základy strojírenství
Vedoucí práce: **Ing. Marian Sigmund, Ph.D., IWE**
Akademický rok: 2021/22

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

3D tisk kovů drátovými metodami svařování

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

3D tisk kovů je aktuální problematika řešená ve všech odvětvích průmyslu. Náhrada možných technologií výroby (konvenčního slévárenství, kování, lisování, svařování, obrábění atd.) nekonvenčními metodami výroby včetně 3D tisku i u kovových materiálů je a bude v budoucnu předmětem řady studií. Cílem této bakalářské práce je provést literární rešerži vhodných technologií svařování pro 3D tisk kovů drátovou metodou. Rovněž průzkum, které firmy a výrobci automatizace a robotizace pro svařování, včetně výrobců svařovacích zařízení, mají tuto technologii odladěnou pro praktické aplikace.

Cíle bakalářské práce:

Vypracovat literární rešerži vhodných technologií svařování pro 3D tisk kovů drátovou metodou.
Vhodný dodavatel automatizace, robotizace pro 3D tisk kovů drátovou metodou.
Vhodná technologie svařování a dodavatele zdroje pro 3D tisk kovů drátovou metodou.
Představit celou sestavu (integrované) pracoviště pro 3D tisk kovů drátovou metodou.
Zhodnotit vhodnost pracoviště pro 3D tisk kovů drátovou metodou k dané aplikaci.

Seznam doporučené literatury:

DVOŘÁK, Milan. Technologie II. Vyd. 3., dopl., v Akademickém nakl. CERM 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2683-7.

AMBROŽ, Oldřich. Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. Ostrava: ZEROSS, 2001. ISBN 80-85771-81-0.

BARTÁK, Jiří. Výroba a aplikované inženýrství ve svařování: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. Ostrava: ZEROSS, 2000. ISBN 80-85771-72-1.

KRATOCHVÍLOVÁ, Jitka. 3D tisk. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně v Ústí nad Labem, 2015. ISBN 978-80-7414-936-8.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Práce přibližuje nejčastěji používané technologie 3D tisku kovů drátovými metodami svařování, jako WLAM, EBAM a WAAM. Zabývá se jejich principem, dílčími metodami, použitím, dodavateli, a také současnými výzkumy a trendy, které se věnují depozicí tenkých vrstev. Blíže popsána je technologie CMT se zaměřením na jednotlivé druhy, jako je Cycle step, Advanced, Pulse Advanced, Pin a Braze+. Dále je představeno CMT pracoviště na ÚK ORIAT, FSI VUT v Brně z pohledu jednotlivých komponent, automatizace a robotizace. Konečné zhodnocení ukázalo, že pro požadovanou aplikaci tisku hořčíkových slitin a převislých struktur je zvolené pracoviště vhodné, zejména díky vlastnostem studeného přenosu kovu a nízké pořizovací ceně.

Klíčová slova

3D tisk, kovy, svařování drátem, studený přenos kovu, aditivní výroba

ABSTRACT

This thesis presents the most commonly used technologies of 3D metal printing by wire welding methods, like WLAM, EBAM and WAAM. Deals with their principles, sub methods, applications, suppliers and also with current researches and trends, which are focused on deposition of thin layers. CMT technology is closely described, with attention on its certain kinds, like Cycle step, Advanced, Pulse Advanced, Pin and Braze+. Then, the CMT workplace at IMID DREAD, FME BUT is described by individual components, automatization and robotization. Final evaluation shows, that the chosen workplace is appropriate for required 3D print of magnesium alloys and overhanging structures, due to cold metal transfer technology and low purchase price.

Key words

3D print, metals, wire welding, cold metal transfer, additive manufacturing

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PŘIBYLA, Dalibor. *3D tisk kovů drátovými metodami svařování* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-02-11]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/139669>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Marian Sigmund.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou/diplomovou práci na téma 3D tisk kovů drátovými metodami svařování vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

místo, datum

Dalibor Příbyla

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Marianu Sigmundovi, Ph.D., IWE, Ing. Kamilovi Podanému, Ph.D., a Ing. Jakubu Slavičkovi za cenné připomínky, rady, podklady a ukázky, které mi poskytli při vypracování bakalářské práce.

OBSAH

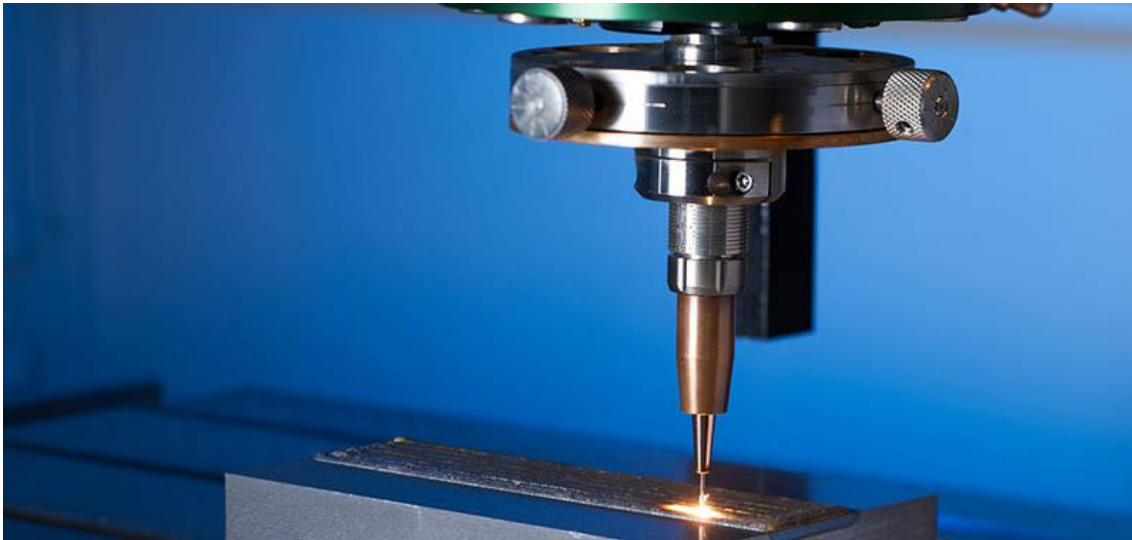
ÚVOD	9
1 3D tisku kovů drátem	10
1.1 Wire-laser additive manufacturing (WLAM).....	11
1.2 Electron beam additive manufacturing (EBAM)	13
1.3 Wire arc additive manufacturing (WAAM)	14
1.3.1 Tungsten inert gas (TIG)	16
1.3.2 Plasma arc welding (PAW)	18
1.3.3 Metal inert gas/Metal active gas (MIG/MAG)	19
1.3.4 Wire arc additive manufacturing – Cold metal transfer (WAAM – CMT).....	22
1.4 Hybridní stroje.....	24
2 Popis pracoviště 3D tisku	25
3 Aplikace CMT a zhodnocení.....	27
3.1 Dodavatelé automatizace a robotizace	27
ZÁVĚR.....	28
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	29
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	35

ÚVOD

Dynamicky eskalující vývoj dnešní éry s sebou nese mnoho změn, požadavků a výzev, jakým je potřeba čelit a posouvat je dál. Vědeckotechnický pokrok na tyto problémy reaguje a při svém exponenciálním růstu přináší spoustu nových metod, kterými lze uspokojit současná kritéria na komplexnost, rychlost a ekonomičnost strojírenské produkce.

Jednou z aktuálně řešených disciplín je 3D tisk kovů. Technologii, která vsadila na princip nanášení a spojování materiálu, lze využít jak pro účely tvorby prototypů a modelů, tak i pro samotnou část finální výroby a oproti konvenčním způsobům, při kterých dochází k odebrání materiálu, má výhodu v nízkém procentu odpadních složek a otevírá jednodušší možnosti tvorby tvarově složitých a dutých součástek. [1; 2; 3]

V následujících stránkách bude představen 3D tisk kovů drátovými metodami svařování, patřící mezi stěžejní odnože uvedené problematiky. Byť je jeho širší využití zatím stále v počátcích, již nyní má své pevné místo mezi četnými vědeckými výzkumy a projekty. Spolu s dalšími nekonvenčními technologiemi naplňuje vizi budoucího strojírenství. [2; 3]



Obr. 1 Tisková hlava [4].



Obr. 2 Tisk dílce s vnitřní komorou [7].

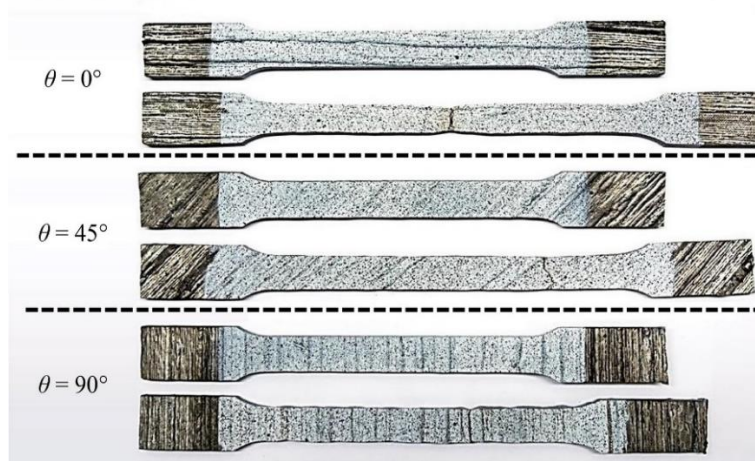
1 3D TISKU KOVŮ DRÁTEM

Při procesu 3D tisku kovů drátovými metodami svařování se využívá schopnosti nanášení přídavného materiálu ve formě svarových housenek na sebe či vedle sebe pomocí metod DED (direct energy deposition). Řadí se mezi druhy aditivních technologií a spočívá v dodávání tepla přímo do procesní zóny, tudíž do oblasti blízké styku materiálu přiváděného a materiálu podkladového, na který se tiskne. Aditivní princip umožňuje nejen tvořit nové výrobky, ale zároveň opravovat, spojovat, případně zlepšovat vlastnosti či povlakovat u dílů už vyrobených (viz obr. 1). [1; 2; 3]

V procesní zóně je potřeba dodávaný materiál, kterým je kovový drát o požadovaných vlastnostech, společně s podkladovou vrstvou zahřát a roztavit, čímž vznikne svarová lázeň. Z ní pak postupným chladnutím krystalizuje samotný svar. K těmto účelům se využívá široká škála tepelných zdrojů, podle nichž probíhá následná kategorizace jednotlivých druhů 3D tisku. Jako u většiny běžných svařovacích metod, je i zde důležité použití (správné) ochranné atmosféry, zajišťované nejčastěji plynem, jako je argon, helium, dusík či oxid uhličitý a jejich směsi. Ochranná atmosféra nejenže zabraňuje oxidaci svarové lázně, ale slouží zároveň pro metalurgické a termické ovlivnění svarového spoje. [1; 2; 3; 6; 21]

Předností tohoto způsobu výroby je bezpochyby vysoká produktivita a nízké náklady, dále také malá hmotnost výrobků v poměru k jejich pevnostním vlastnostem a příznivé buy to fly ratio (BTF), které udává poměr mezi hmotností použitého materiálu a finálního výrobku. Díky rozsáhlé paletě materiálů, které lze dnes svařovat, je možno realizovat jejich použití i při 3D tisku. V běžné praxi se využívá například tisk součástek z titanu pro letecký a kosmický průmysl, tisk oceli, hliníku a jejich kombinace. V poslední době se do popředí dostává výzkum tisku hořčíkových slitin, s jehož pomocí by se dosáhlo ještě větších hmotnostních úspor, než tomu bylo u tohoto materiálu doposud. Velkou výhodou, a zároveň předmětem zkoumání, je tvorba tvarově složitých a komorových dílců (viz obr. 2), součástek, u kterých je potřebná nehomogenní hustota a struktura materiálu nebo objektů s četnými převisy. Právě převislé struktury je možno u tisku kovů, při správně nastavené a synchronizované svářecí operaci, vytvářet bez podpory, na rozdíl od depozice plastových materiálů. [2; 7; 8;]

Vědci z Imperial College v Londýně testovali, jaký má vliv na materiálové vlastnosti úhel depozice svarové housenky. Tahovou zkouškou byly zkoumány 3 vzorky z drátu 308LSI pro svařování korozivzdorné oceli 18Cr8Ni s úhlem vrstev 0° , 45° a 90° , vztaženo ke směru působení tahových sil (viz obr. 3). Nejlepších vlastností dosahoval vzorek s úhlem depozice 45° , který vykazoval znatelně vyšší Youngův modul a lehce vyšší pevnost, než ostatní dva vzorky, které nedosahovaly ani 30 % z 200 GPa, které se běžně pro danou ocel udávají. [5]



Obr. 3 Testované vzorky [5].

1.1 Wire-laser additive manufacturing (WLAM)

Způsob kombinace laseru a přídavného drátu je jedním z nejpřesnějších druhů 3D tisku kovů pomocí procesu svařování. Také se s ním můžeme setkat v běžné praxi nejvíce. Je zde možné kombinovat drát i s přídavným materiálem ve formě prášku, a tak velmi operativně tvořit nové slitiny. Mezi výhody této metody patří krom přesnosti zejména malá deformace výrobku po zchladnutí a malá tepelně ovlivněná oblast. Podstatným aspektem je i možnost plynulé změny rozměrů svarové housenky, a to díky korekci šířky a intenzity laserového paprsku, spolu se změnami rychlosti podávání drátu. Nevýhodou je ale vysoká pořizovací cena. [6; 8]

Laserový zdroj tepla funguje na principu emise fotonů, které, dopadající na krystalickou mřížku svařovaného materiálu, zvyšují její frekvenci vibrací a tím dochází k ohřevu. Energie se soustřeďuje do úzkého paprsku, má schopnost vysoké koncentrace výkonu. Díky tomu je rychlost ohřevu materiálu, oproti rychlosti odvodu tepla z něj, mnohonásobně vyšší, a tudíž dochází k prohřívání pouze lokálně. Výzkumy univerzity v Cranfieldu ukázaly, že se tavený drát odlučuje ve formě kapek, které se přenáší buď působením gravitace nebo pomocí povrchového napětí. Dobrých poměrů mezi šířkou svaru a průvarem bývá dosahováno díky tzv. efektu klíčové dírky, který je založen na odpařování přehřátého materiálu a vzniku dutiny, ve které může začít krystalizovat svar za dodávání aditiva. Vhodnou ochrannou atmosféru udržuje inertní plyn (Ar, He), který může také ovlivnit geometrii svaru. [8; 9; 10]



Obr. 4 Kontinuální spirálové navařování [8].



Obr. 5 Plošný tisk [8].



Obr. 6 Tisk složitého dílce [13].

Zástupcem výrobce strojů, fungujících na bázi metody laserového 3D tisku, je technologie Meltio, spočívající v tiskové hlavě se šesti laserovými zdroji. Je vyvíjena s podporou firmy ArcelorMittal. Vyznačuje se produkcí jak kompaktních 3D tiskáren pro výrobky středních a malých rozměrů, tak i samostatných tiskových hlav, které lze upnout na konec ramen průmyslových robotů. Poslední zmíněná varianta umožňuje tvorbu výtisků velkých rozměrů, závislých pouze na operačním dosahu robotu. V České republice zajišťuje obchodní zastoupení a využití této značky například společnost 3DWiser s. r. o., která je jak prodejcem vybavení, tak poskytovatelem tiskových služeb (viz obr. 7). Dalšími výrobci, pohybuujícími se na českém trhu je například Precitec a Lasertec. [11]



Nerezová ocel 316L
Píst (obrobený)
 Hmotnost: 0,76kg | Čas: 3
 hod. 30 min. | Cena: 7,56 €



Nerezová ocel 316L
Vzduchový kryt (leštěný)
 Hmotnost: 0,52 kg | Čas: 3
 hod. 50 min. | Cena: 5,16 €



Titan 6Al-4V
Uchycení motoru
(hybridní)
 Hmotnost: 0,5 kg | Čas: 3
 hod. 50 min. | Náklady
 na tisk: 80,08 €



Titan 6Al-4V
Kolenní implantát
(obrobený)
 Hmotnost: 0,41 kg | Čas: 2
 hod. 9 min. | Cena: 38,44 €



Inconel 718
Lopatka turbíny
(obrobená)
 Hmotnost: 1,11 kg | Čas: 3
 hod. 1 min. | Cena: 72,99 €

Obr. 7 Ceník společnosti 3DWiser s. r. o. [11].

V současné době energetické transformace a důrazu na udržitelné hospodářství a průmysl se rozhodla společnost Mitsubishi Electric Corporation pro implementaci 3D tisku do výroby a produkce vlastní WLAM tiskárny AZ600 (viz obr. 8). Hovoří se o prvním WLAM přístroji s pětiosým systémem a digitální aditivní technologií, umožňující přesné a kooperativní řízení procesu. Těmito kroky se firma snaží snížit emise CO₂ rámci Vize 2050. [12]



Obr. 8 3D tiskárna Mitsubishi [12].

1.2 Electron beam additive manufacturing (EBAM)

Při tisku metodou EBAM je zdrojem tepla elektronové dělo, které funguje na principu vakuové trubice s emisí diodou, elektromagnetickými urychlovači a usměrňovači/vychylovači, které ovlivňují směr a sílu toku vysílaných elektronů a optickými členy, mezi něž patří soustava čoček a zrcadel. Elektrony se urychlují na 30-70 % rychlosti světla. Celý proces tisku se odehrává ve vakuu, kvůli omezení vychýlení částic při případných srážkách s molekulami vzduchu. Teplo vnesené do materiálu je vzniklé přeměnou kinetické energie emitovaného paprsku, dopadajícího na povrch tisknutého dílce. Pomocí vychylovacího systému, cyklickým vysíláním paprsku o nižší intenzitě, se svazek zaměřuje na určené místo, zároveň je možno skenovat svařovanou oblast. [14; 15]



Obr. 9 Detail navařených vrstev [16].

Technologie nachází využití spíše u velkoobjemových tisků (viz obr. 10), a to kvůli hrubší struktuře vrstev (viz obr. 9), ale zato vysoké rychlosti samotného tisku. Elektronový paprsek je oproti laserovému širší. Je udáváno, že tiskárna druhu EBAM je schopna vyprodukovat od 3 do 11 kg vytištěného kovu za hodinu a lze vytvořit výrobky dlouhé až 5,79 m, případně rotační součásti s průměrem do 2,44 m. Mezi běžně používané materiály zde patří titan, ocel, tantal, inconel, wolfram, hliník a niklové slitiny. Jedním ze specifíků této technologie je použití zdvojeného podavače drátu (viz obr. 11), který umožňuje rychlejší tisk, dále kombinaci dvou různých materiálů, či případně dvě různé tloušťky drátu, hrubší pro běžný tisk a tenčí pro dokončovací operace. [14; 15]



Obr. 10 tisk kulových tvarů metodou EBAM [14]. Obr. 11 Detail zdvojeného podavače drátu [14].

Světovým zástupcem v produkci tiskáren EBAM je společnost Sciaky, která se této problematice věnuje už od roku 1950 a od roku 1996 vyvíjí aditivní technologie. Zavedení jejich produktů do několika významných firem pomohlo k mohutnému snížení odpadových složek výroby a čtvrtinové dodací lhůtě. Palivové nádrže, lopatky turbín, složité klece – to vše se dá v průmyslové praxi vyrábět pomocí tisku elektronovým paprskem. [14; 15; 16]

Sciaky je významným dodavatelem technologie EBAM pro průmyslové využití. Nabízí systémy členěné dle velikosti tiskových komor: [15]

- velké komory: od 5791 do 1981 mm délky,
- střední komory: od 1295 do 686 mm délky,
- malé komory: do 600 mm délky.

V nabídce jsou rovněž dva základní druhy vakuových děl, externí (viz obr. 12) a interní (viz obr. 13). Interní se integrují přímo do tiskové komory a jsou polohovatelné ve všech dostupných osách. Svařovací stůl bývá nepohyblivý nebo pohyblivý v ose Z. Externí jsou povětšinou pevně uložena a polohovatelný je právě svařovací stůl. Používá se nejvíce u systémů s malou tiskovou komorou. [15]



Obr. 12 Externí dělo [15].



Obr. 13 Interní dělo [15].

1.3 Wire arc additive manufacturing (WAAM)

Depozice kovového drátu za pomoci elektrického oblouku je jednou z nejvíce řešených metod 3D tisku poslední doby. Hlavním pozitivním faktorem je možnost využití konvenčního vybavení, jehož předností je relativně nízká cena pořizovací i provozní, a zároveň vysoká variabilita jednotlivých prvků WAAM soustavy, mezi které patří:

- Zdroje elektrického oblouku (viz obr. 14), které zde figurují jako hlavní emitory tepelné energie, jsou oproti metodám EBAM a WLAM levnější, a přesto velmi přesné. Řídí je digitální elektronická jednotka, která je schopna kontrolovat jednotlivé procesy všech součástí svařovací soustavy. Měřeným parametrem je například rychlost podávání drátu, elektrické napětí a proud jak v přívodní síti, tak mezi elektrodami, průtok plynu apod. Po vyhodnocení potřebných kritérií jednotka činí případné korekce, kterých může být až 10 000 za sekundu. [17; 18]



Obr. 14 Svařovací zdroje [18].

- Podavač drátu, umožňující dodávání přídatného materiálu do svarové oblasti, resp. do svařovacího hořáku skrz speciální bowden. Často bývá uložen přímo v těle svařovacího zdroje, ve kterém je umístěna i cívka s podávaným drátem. Skládá se ze soustavy kladek, kdy alespoň jedna z nich je hnaná elektromotorkem, ovládaným, v případě 3D tisku, elektronicky řízeným systémem. Protější kladka je přítlačná. Běžně se využívají podavače dvoukladkové, dále čtyřkladkové (viz. obr 15), které dosahují menších prokluzů a větší tlačné síly a šestikladkové, které se používají nejvíce právě při robotizovaném svařování. [17; 19; 20]

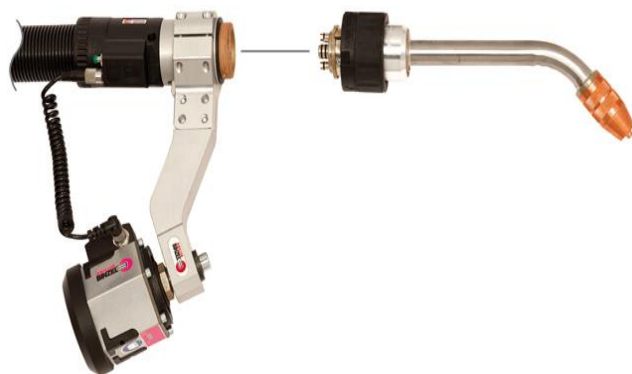


Obr. 15 Čtyřkladkový podavač [20].

- Ochranný plyn je významným prvkem procesu. Používá se k ochraně proti oxidaci a nežádoucím vlivům, jako je pórovitost nebo propalování materiálu (inertní) a pro ovlivňování svařových procesů (aktivní). Skladuje se a čerpá z tlakových nádob (viz obr. 16), označených příslušnými barvami dle obsahu. Důležitým prvkem v soustavě vedení je redukční ventil, kterým se nastavuje požadovaný tlak a průtok, poté elektromagnetický ventil, zajišťující sepnutí a rozepnutí proudu v požadovaný okamžik. Plyn je veden hořákem až do procesní zóny. [17; 21; 22]
- Svařovací hořák (viz obr. 17) je člen, který je na jednom konci připojen ke zdroji, ze kterého do něj vstupuje elektrické napětí, potřebné ke vzniku oblouku, ochranný plyn a případně přídatný materiál. Druhý konec je opatřen hlavou s plynovou tryskou a elektrodou, která se liší v závislosti na zvolené metodě svařování. Hořáky jsou běžně dostupné v různých délkách, aby bylo možno pokrýt požadovaný dosah svařovací operace. [17; 23]

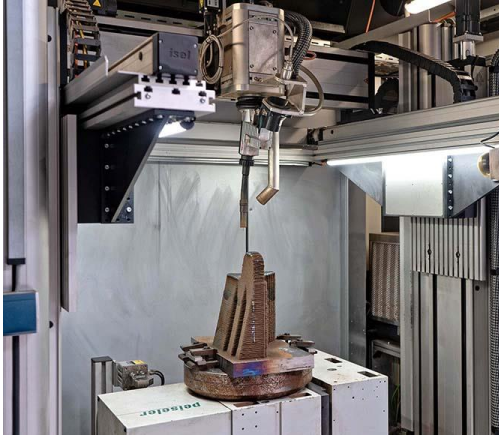


Obr. 16 Tlakové nádoby [22].



Obr. 17 Hořák ABIROB W300 [23].

- Pohybový člen, nutný pro dosažení robotizace a automatizace 3D tisku. Nese hořák, svařovací hlavu a ústí podavače. Tímto prvkem může být buď CNC portál (viz obr. 18), které se vyznačují vyšší přesností, ale menším dosahem, tj. omezením na menší dílce. Další možností, která je rozšířenější napříč více metodami, je víceosé robotické rameno (viz obr. 19), mající velký pracovní dosah a lepší polohovatelnost koncového bodu, byť s nižší přesností, než jakou mají CNC zařízení. [24; 25]



Obr. 18 CNC portál [25].

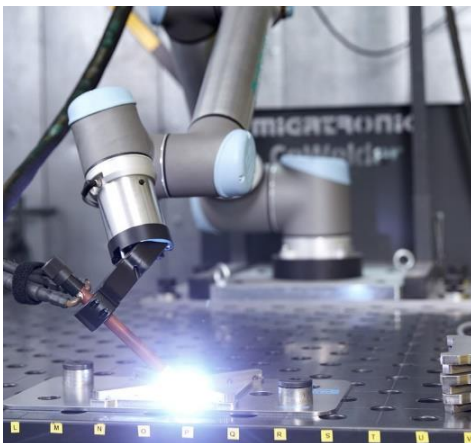


Obr. 19 Robotické rameno [24].

- Řídící jednotky a převodníky, které zajišťují správnou synchronizaci celé soustavy. V případně řídicích jednotek se jedná o běžně dodávané příslušenství například k robotickým ramenům či CNC portálům. Obsahují přednastavené softwarové vybavení, umožňující automatizaci procesu, určené ke kontrole a ovládání daného zařízení, propojení s ostatními prvky sestavy, či k diagnostice. Pomocí převodníků jsou jednotky komunikačně provázány s ostatními podstatnými částmi soustavy, ze kterých je potřeba získávat důležitá data pro správný průběh činnosti. U komplikovanějších zařízení s mnoha členy jsou převodníky mnohdy stavěné „na míru“ dané aplikaci a je nutné jejich přesné odladění. [24; 26]

1.3.1 Tungsten inert gas (TIG)

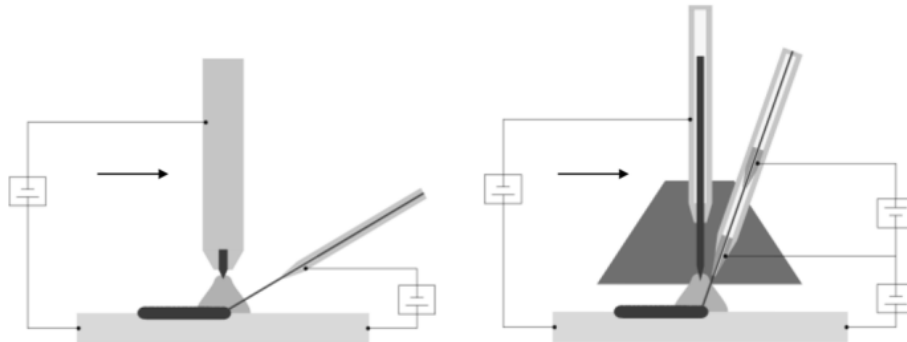
Jedním z možných druhů 3D tisku technologií WAAM je použití metody TIG (viz obr. 20). Využívá se zde inertního ochranného plynu, kterým bývá povětšinou argon v různých stupních čistoty. Elektroda, která se používá pro vytvoření elektrického oblouku, a nachází v hořáku s keramickou hubicí a je netavná, z wolframu. Drát je přiváděn podavačem. Nevede však bowdenem skrz hořák, nýbrž je přiváděn do procesní zóny externě (viz obr. 21). [17; 27]



Obr. 20 Automatizovaný proces TIG [32]. Obr. 21 Detail hořáku s podavačem [32].

Metoda TIG se u tisku drátem vyznačuje hlavně nanášením tenkých svarových housenek, což sice vede k prodloužení doby procesu, ale také ke zvýšení přesnosti. Provoz na stejnosměrné napětí umožňuje zpracování oceli, mědi, litiny, niklu a titanu, používá se elektroda s příměsí 2% thoria či ceria. Na střídavé napětí je možno tisknout hliník, mosaz, bronz a slitiny, elektroda je v tomto případě z čistého wolframu. [17; 28; 32]

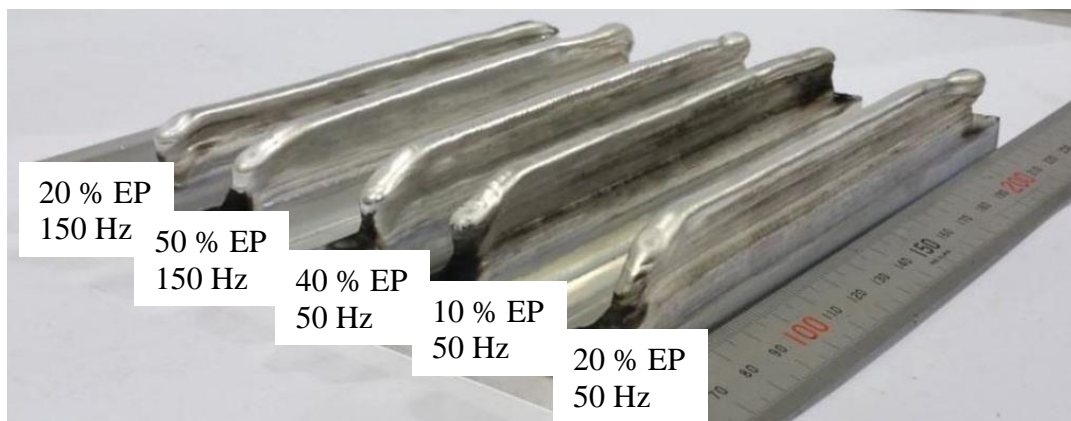
Podstatným aspektem, ovlivňujícím proces svařování, je úhel podávání drátu vůči základnímu materiálu. Zatímco při běžném ručním svařování se používá úhel 10° , pro 3D tisk se osvědčilo postavení TOP-TIG (viz obr. 22), s úhlem mezi základním materiálem a drátem $22,5^\circ$, díky větší stabilitě tavení. Drát se taví kontinuálně, netaví se na kapky, proto lze nanášet vrstvy bez rozstříku. [28; 30]



Obr. 22 Klasický TIG a TOP-TIG [30].

Zdvojením podavačů, kdy každý svírá úhel se základním materiálem 30° , tedy přiváděním dvou drátů zároveň, lze dosáhnout technologie přímého legování. Při tvorbě svarové housenky dochází ke vzniku nových slitin přímo v procesní zóně. Jedná se nejčastěji o slitiny Al-Mg, Al-Cu nebo Al-Ti, které by byly obtížně zpracovatelné jako jeden přídavný materiál. [29]

Zdroje pro tuto metodu mají spoustu funkcí a programů, které ovlivňují svařovací operace. Funkce Pulse dokáže měnit charakteristiku napětí a proudu na pulsní, což se využívá pro tisk a svařování tenkých vrstev. Funkce Balance dokáže dle daného programu změnit polaritu proudu a tím, při tisku hliníku, čistit svarovou oblast od vytvořené povrchové vrstvy oxidů (ionické pískování). Elektroda tedy nabývá chvíli pozitivní polaritu (EP) a chvíli negativní polaritu (EN). Poměr mezi těmito polaritami se nastavuje. Hodnoty parametru Balance významně ovlivňují rychlost svařování, průnik, koncentraci a šířku oblouku. Výzkum metody AC TIG, vedený na univerzitě v Cranfieldu, řešil 3D tisk kolmých stěn za využití střídavého proudu a úhlu podavače drátu 36° . Sledovány byly změny v procesu tisku při různém nastavení EP. Výsledky ukázaly, že vysoké EP má vliv na vyšší opotřebení elektrody, avšak mechanické vlastnosti vytisknutého materiálu zůstaly konstantní (viz obr. 23). [27; 31]



Obr. 23 Různá nastavení parametru Balance [31].

1.3.2 Plasma arc welding (PAW)

Dalším ze způsobů 3D tisku je použití plazmatického proudu. Do procesní zóny se přivádí mimo ochranného také plazmový plyn, který se ionizuje v elektrickém oblouku, vzniklém mezi základním materiálem a netavnou wolframovou elektrodou (viz obr. 24). Metoda je odvozena od TIG/WIG, přídavný materiál je rovněž dováděn externě. Je však potřeba komplikovanějšího hořáku se dvěma tryskami pro přívod dvou plynů. Pro plazmu se používá měděná tryska, která vzniklý oblouk usměrňuje, zvyšuje jeho teplotu, přesnost a délku. Výhodou je malé tepelné ovlivnění již vytištěných vrstev při současné vysoké teplotě natavení přídavného materiálu. Vrstvy nabývají šíře od 1 do 5 mm a šířky do 25 mm. Mezi nevýhody patří horší kvalita tisku. [17; 33; 35]

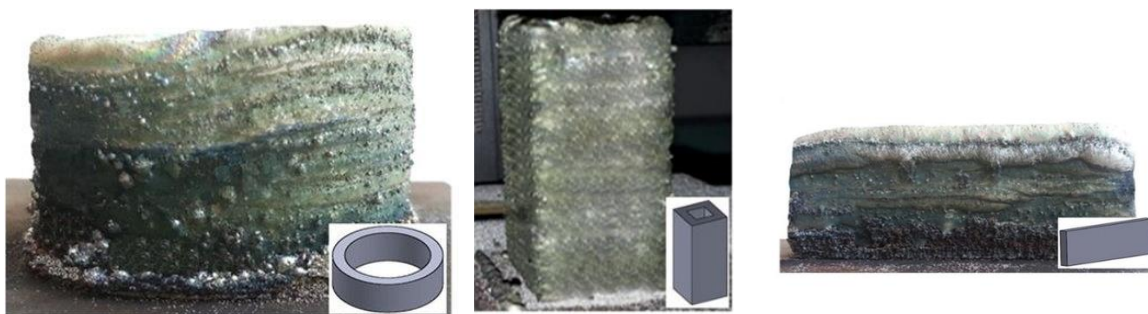


Obr. 24 PAW hořák s podavačem [35].

Metodou PAW se tiskne převážně titan, dále pak ocel, korozivzdorná ocel či slitiny niklu a žáruvzdorné materiály. Využití nachází v leteckém i vesmírném průmyslu. Rozlišují se tři základní druhy svařování plasmou: [34; 35]

- mikroplazma pro malé proudy (do 15A) a tenké svary/návary,
- střední proud pro proudy do 200A
- efekt klíčové dírky pro velké průvary, proud přes 100A, silné proudění plasmy.

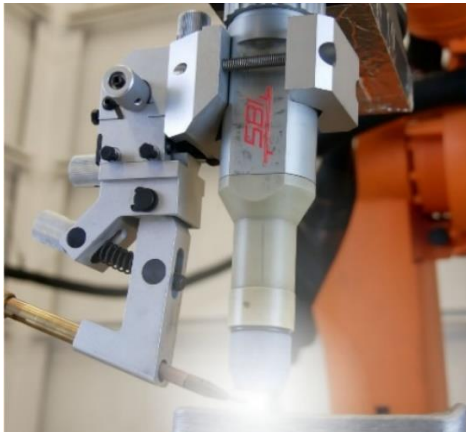
Indický technologický institut v Madrasu testoval sestavu μ -PTAAM (Micro plasma trasfered arc additive manufacturing), kde byl plazmový hořák integrován do čtyřosé CNC soustavy (pohyblivé osy X, Y, Z a rotační pohyb pro hořák, podavač i podkladový materiál). Díky slabému plazmatickému proudu a přesné kontrole polohování jednotlivých komponent bylo možno tisknout vrstvy tenké méně než 2 mm bez významných negativních vlivů na strukturu housenek (viz obr. 25). K tisku byl použit drát ER70S-6 o průměru 0,6 mm. Tímto systémem lze tisknout dílce o rozměrech 200 × 200 × 150 mm a o hmotnosti až 50 kg. Studie dále poukazuje na menší náklady pro výrobu metodou μ -PTAAM oproti WLAM. [36; 37]



Obr. 25 Výtisky μ -PTAAM [37].

Technologii PAW se věnuje například společnost SBI (viz obr. 26), která nabízí tak kompletní výrobní linky 3D tisku, tak doplňkové komponenty pro CNC centra či robotická ramena. Velikost vytištěných dílů se pohybuje od průměru 1000 mm a výšky 800 mm při použití osmiosé tiskárny SBI až po rozměry $2000 \times 600 \times 600$ mm u pětiosých systémů. Rychlost tisku se pohybuje od $4,5 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ pro niklové a titanové slitiny až po $10 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ pro oceli. [38; 39]

V oblasti tisku titanu exceluje firma Norsk Titanium (viz obr. 27), které patentovala technologii Rapid Plasma Deposition pro vesmírný, automobilový a letecký průmysl, například společnost Boeing. Tiskárnou MERKE IV je materiál je nanášen rychlostí 5 až $10 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ v pracovním prostoru $900 \times 600 \times 300$ mm. Vrstvy mají na výšku 3 až 4 mm, na šířku 8 až 12 mm. [40]



Obr. 26 SBI [38].



Obr. 27 Norsk Titanium [40].

1.3.3 Metal inert gas/Metal active gas (MIG/MAG)

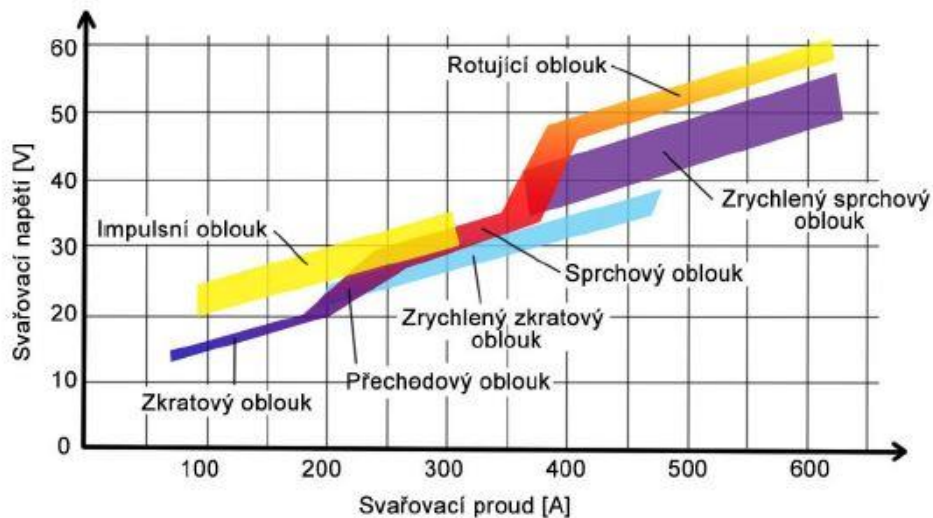
Metoda 3D tisku elektrickým obloukem s tavnou elektrodou ve formě drátu, do které se přivádí proud díky kontaktnímu průvlaku, jež je veden skrz svařovací hořák, se rozlišuje použitím ochranné atmosféry. Inertní plyn (MIG), argon či jeho směsi s heliem, chrání svařovou oblast před oxidací, zamezuje přístupu vzduchu. Aktivní plyn (MAG), oxid uhličitý a jeho směsi s argonem, se podílí na procesu tvorby svařové housenky, zajišťuje dobrý průvar a malou pórovitost. Dále jsou rozlišovány plyny redukční, mezi které patří vodík a plyny nereagující, jako dusík. Ochranná atmosféra mění velikost oblouku a svaru, ovlivňuje přenos kovu. Plyn je přiváděn do procesní zóny přes trysku, která je při malých pracovních příkonech chlazena proudem média, při vyšších zatíženích tryska chlazena vodou (viz obr. 28). [17; 21; 41]



Obr. 28 Chlazený hořák [42].

Používány jsou invertorové zdroje s plochou charakteristikou a stejnosměrným proudem. Záporný pól je připojen k podkladovému materiálu, kladný k drátové elektrodě. Regulace napětí je způsobena výraznou změnou proudu. Požadovaná délka oblouku je udržována pomocí nastavení proudu, za podmínky konstantní rychlosti podávání drátu. Vyšší délky oblouku vyžadují snížení proudu, čímž dojde ke zmenšení rychlosti tavení aditiva a zkrácení oblouku, krátké oblouky se naopak regulují zvýšením proudu, čímž vzroste rychlost tavení. [17; 41]

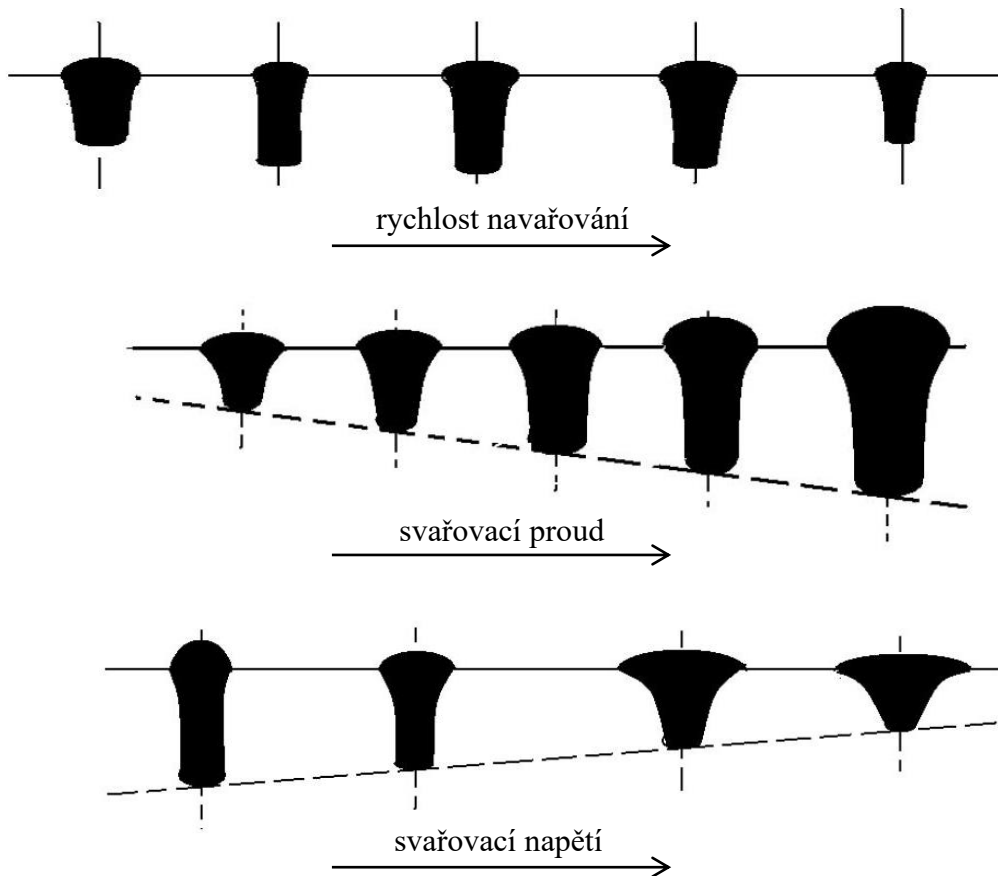
Rozlišují se různé typy svařových oblouků (viz obr. 29). Krátký oblouk se vyznačuje přenosem kovu, který se oddělí při přerušení oblouku zkratem, díky povrchovému napětí. Proud se mění v závislosti na okamžiku zkratu a pohybuje se v rozmezí 60 až 180 A, stejně jako napětí, jehož hodnoty se mění od 14 do 22 V. Díky menším proudům se krátký oblouk používá pro tvorbu tenkých vrstev. U dlouhého oblouku probíhá přenos bezzkratově, proud nabývá hodnot 200 až 500 A, napětí 28 až 400 V. Materiál je přenášen proudem plazmatu. Proces dosahuje vysokého výkonu, tudíž produkuje velké množství tepla a tvoří hluboký závar. Hodí se tedy pro větší vrstvy, slabší by se mohly propalovat a deformovat. U dlouhých oblouků lze dosahovat tzv. rotujícího přenosu kovu, který je uskutečněn magnetickým polem, které se generuje při proudech 450 až 650 A a napětích 50 až 65 V. Tvoří se hluboké a široké svary, charakteristický je dobrý závar a vznik kuželové plochy. Speciálním přenosem kovu je impulsní bezzkratový přenos, u kterého není konstantní proud, ale dochází k jeho změnám v závislosti na oddělení kapky. Proud narůstá z 20 až 50 A na hodnoty 200 až 250 A, při kterých se nahřeje podkladový i dodávaný materiál, který se oddělí. Poté se hodnoty proudu opět sníží. Značně se tak zmírní vnesené teplo. [17; 41; 43]



Obr. 29 Přenos kovu v oblouku [17].

Podstatnou záležitostí pro aditivní výrobu je geometrie svařové housenky. Ta je ovlivňována několika zásadními faktory (viz obr. 30): [17]

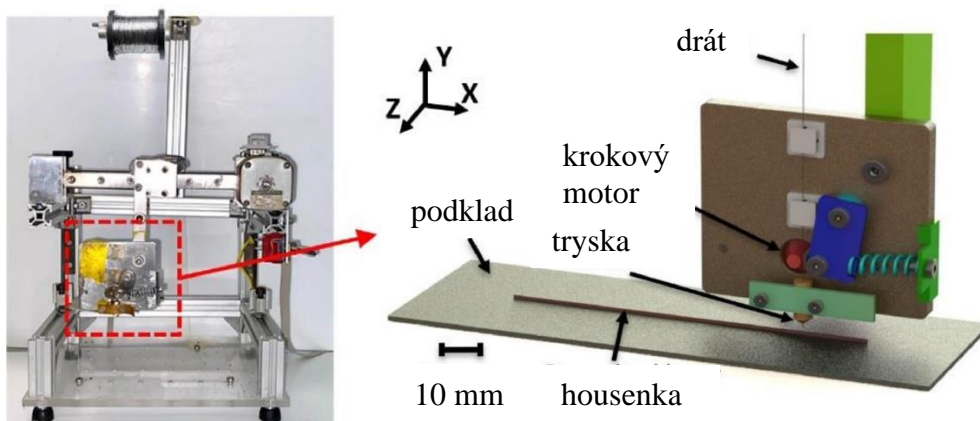
- Rychlost navařování je nejpodstatnějším aspektem. Díky vyšším rychlostem se zužuje housenka, lze tedy použít větší svařovací proudy a dojde ke zefektivnění výroby. Existuje zde však nebezpečí nekonstantního průřezu návaru, nesprávného proudění plynu a elektrického proudu.
- Svařovací proud působí na rychlost tavení aditiva, proto je nutné jeho nastavení provázat s rychlostí podávání drátu. Vyšší proudy způsobují větší vnesené teplo a zvýšení dodávek materiálu do procesní zóny, což způsobuje zvýšení a rozšíření housenky. Nevýhodou je riziko větších vnitřních pnutí při chladnutí.
- Napětí mění délku oblouku, tím pádem mění geometrii návaru. Zvýšené napětí prodlouží oblouk a tím housenku rozšíří a sníží, naopak nižší napětí ji zužuje a zvyšuje její profil.
- Sklon hořáku ovlivňuje poměr šířky a výšky tisknuté vrstvy. Tlačný způsob navařování vede k nižšímu a širšímu průřezu housenky, naopak tažné svařování poměr obrátí.
- Ochranná atmosféra má vliv na kvalitu povrchu a struktury svaru.



Obr. 30 Ovlivnění geometrie svarové housenky [17].

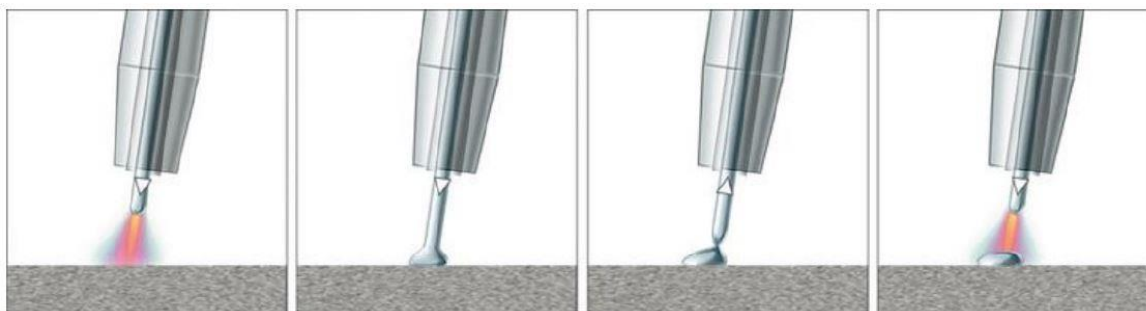
Aditivními technologiemi MIG/MAG lze dosáhnout vysoké produktivity a výkonu tisku s dobrými průvary, ale také velkou tloušťkou vrstvy, pórovitostí a nepřesnostmi. Takto vzniklé dílce jsou náročnější na obrábění. Proto se dnešní výzkumy ubírají jiným směrem, cestou lepší přesnosti, tenčích vrstev, kvalitnější struktury, zlepšených vlastností. Snahou je omezit vnesené teplo a udělat tak svařovací proces „studený“. [44; 46]

Universita NOVA v Lisabonu vyvinula zcela nový proces 3D tisku elektrickým obloukem, tzv. μ -WAAM (Micro wire arc additive manufacturing) na bázi MIG. Umožňuje tisk drátem o průměru pouze 250 μm a tloušťce vrstvy okolo 2 mm, za použití aditiva ASTM A 228 a bronzové trysky o průměru 0,3 mm. Metoda je přesnější (0,3 mm), než běžné druhy WAAM (0,7 mm), zároveň podobně rychlá, jako technologie PBF (Power bed fusion), navíc levnější. Tiskárnu μ -WAAM (viz obr. 31) lze vyrobit už za částku 1000 USD. [45]


 Obr. 31 Tiskárna μ -WAAM [45].

1.3.4 Wire arc additive manufacturing – Cold metal transfer (WAAM – CMT)

Pro omezení vneseného tepla a možnosti tisku „studeným“ obloukem, vyvinula společnost Fronius metodu CMT (viz obr. 32). Jedná se o modifikaci technologie MIG/MAG. Podávání drátu je obousměrné, elektronicky řízené. Aditivum je tlačeno do procesní zóny do té doby, dokud nedojde ke zkratu se základním materiálem. Drát je poté zasouván zpět, přičemž se uvolňuje kapka a stává se součástí svarové lázně díky povrchovému napětí, s téměř nulovým působícím proudem. Vzniká takto krátký oblouk s minimálním vneseným teplem, malým rozstříkem a vysokou stabilitou. Právě vnesené teplo je omezeno u ocelí až o 50 %, u hliníku až od 90 %. Frekvence pohybu oscilace drátu může být až 90 Hz a není řízena přednastavenou mapou programu, nýbrž dle aktuální situace v procesní zóně. Snadno lze udržovat konstantní délku oblouku, která má za následek lepší kvalitu povrchu a vliv na rychlost navařování. Housenka bývá vysoká okolo 3 mm a široká do 20 mm. Díky studenému přenosu kovu lze například spojovat ocel a hliník. Využívá toho například automobilový průmysl, kde je takto možno vytvářet lepší deformační prvky. [26; 44; 47; 48]



Obr. 32 Princip CMT [48].

Správnou funkci oscilace drátu zajišťuje hořák, ve kterém je integrovaná pohonná jednotka pro zatahování drátu zpět, jelikož by samotný podavač nebyl schopen tak rychle měnit směr otáčení. Jelikož dochází k současnému dopřednému pohybu díky hlavnímu podavači a pohybu zpětnému, který je iniciovaný hořákem, je nutno do soustavy zařadit tzv. absorpční člen, který vyrovnává prodlužování a zkracování vedeného drátu (viz obr. 33). Proces oscilace je řízen digitálně. [47; 48]



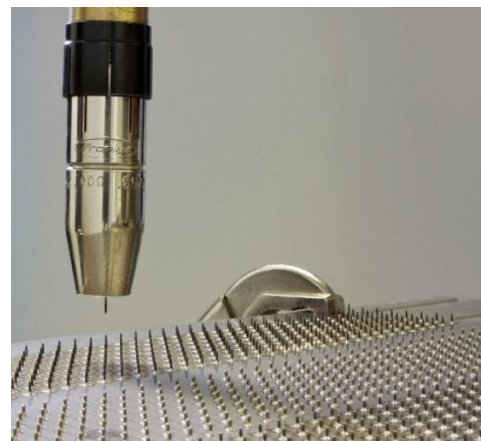
Obr. 33 CMT sestava [26].

Samotná metoda CMT má více modifikací:

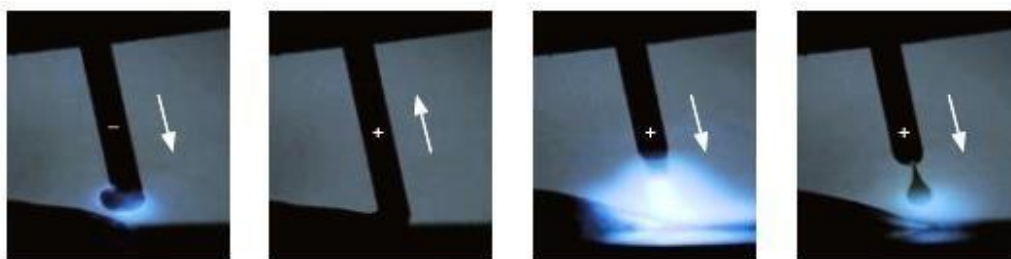
- CMT Cycle step (viz obr. 34) přináší větší kontrolu nad svařovacím cyklem, je možno přesně definovat počet kapek na jeden svařovaný bod a také pauzy mezi cykly. Také dochází k přerušení oblouku v procesní fázi. Využití systém nachází při svařování dveří a kapotáže automobilů. [49]
- CMT Advanced (viz obr. 36) přináší změnu polaritu drátové elektrody při svařovacím cyklu. U dopředného pohybu drátu do místa svaru je jeho polarita záporná až do zkratu. Při zpětném zasouvání je polarita elektrody kladná. Oblouk je díky tomu ještě chladnější [50]
- CMT Pulse Advanced je založen na předchozím systému, avšak u kladné polarity elektrody dochází navíc k bezzkratovému přenosu kapky, čímž je do procesní zóny vneseno větší teplo, metoda je rychlejší. [51]
- CMT Pin (viz obr. 35) slouží pro spojování kovových materiálů s ostatními. Přesnou metodou navařování lze na kovové materiály vytvořit kulové čepy s průměrem 0,8 mm na nožičce s celkovou délkou 3 mm (podobnost s tvarem houby). Nejčastější použití je pro spojování kovů s plasty. [52]
- CMT Twin spočívá v integraci dvou svařovacích zdrojů a dvou izolovaných kontaktních trubic podavače (Lead a Trail), které ústí v jednom hořáku. Výhodou je vysoká hospodárnost, stabilní oblouk, rychlé navařování a velké průvary. [53]
- CMT Braze+ slouží ke zlepšení operací tvrdého pájení, které se využívá opět například v automobilovém průmyslu. Spolu s AUDI AG vyvinul Fronius nový hořák, který umožňuje proudění ochranných plynů velkými rychlostmi, čímž nejen snižuje jeho spotřebu, ale také dělá proces pájení efektivnější a méně nákladnější. [54]



Obr. 34 CMT Cycle step [49].



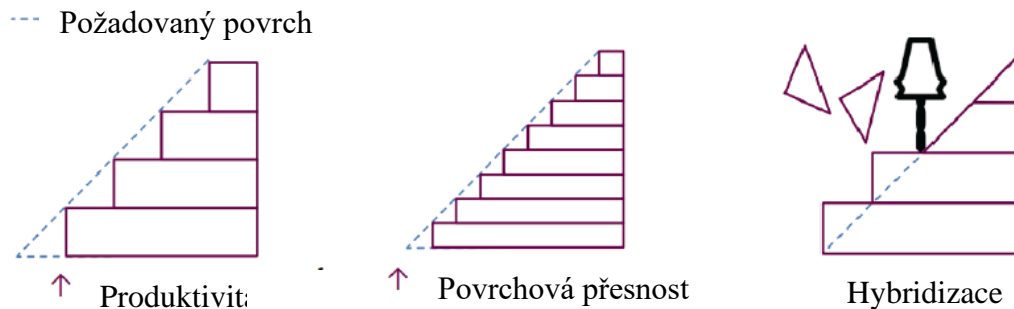
Obr. 35 CMT Pin [52].



Obr. 36 CMT Advanced/ Pulse Advanced [51].

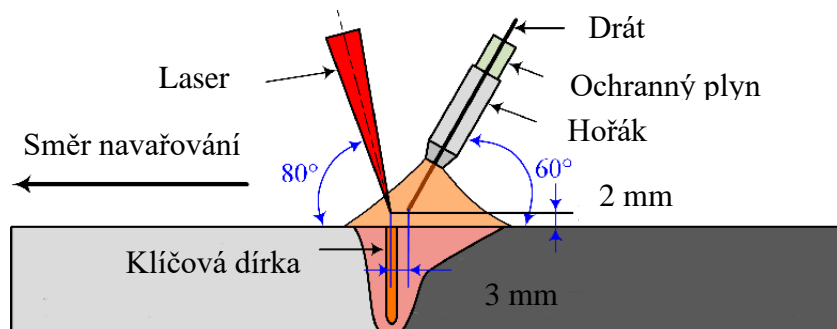
1.4 Hybridní stroje

Samotný 3D tisk drátovými metodami svařování vykazuje poměrně velké povrchové nedokonalosti, jelikož je materiál nanášen po jednotlivých vrstvách. Proto je potřeba vytištěné výrobky následně obrábět. Spojením obráběcích a tiskových funkcí do jednoho stroje vznikne tzv. hybridní zařízení, které je schopno kombinovat jednotlivé procesy podle potřeby a vytvářet tak výsledné dílce rychleji a přesněji. Tvoří se tak optimální poměr mezi produktivitou a povrchovou přesností (viz obr. 37). Použití se vyplatí rovněž při opravách. [55; 56]



Obr. 37 Vliv hybridizace na výsledný povrch [57].

Další odnoží hybridních technologií je spojování více tiskových metod, jako je MIG/MAG, TIG nebo PAW s WLAM. Právě laser slouží k lepšímu přenosu kovu do svarové lázně, snížení výskytu poruch a zlepšení mechanických vlastností. Při použití laseru dochází ke zjemnění zrn, vyšší rychlosti chlazení a zvýšení přenosové frekvence kapek (viz obr. 38). [57; 58]



Obr. 38 metoda LASER-CMT [58].

Hybridizaci v oblasti 3D tisku se věnuje už od roku 2013 společnost DMG MORI se svým strojem Lasertec 65 3D z německého závodu Sauer. Dále lze jmenovat firmu Mazak se strojem Integrex, Trumpf s TruPrint 100 nebo Kovosvit MAS, která stroj Wledprint MCV 5X vyvinula ve spolupráci s ČVUT (viz obr. 39) [55]



Obr. 39 Wledprint MCV 5X [55].

2 POPIS PRACOVIŠTĚ 3D TISKU

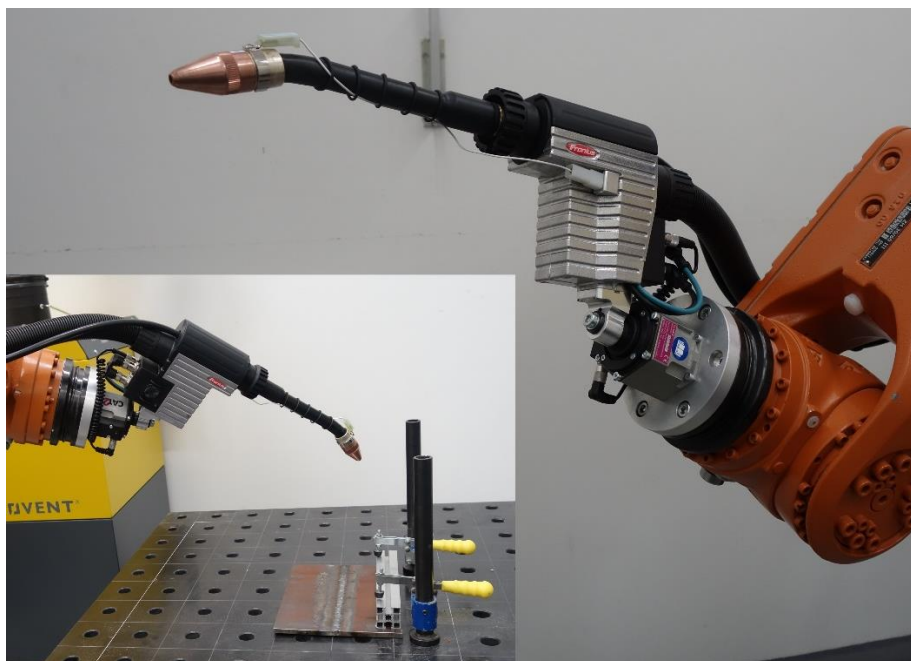
Na Odboru reverzního inženýrství a aditivních technologií Ústavu konstruování FSI VUT v Brně je nainstalováno a zprovozněno integrované pracoviště pro 3D tisk kovů drátovou metodou svařování. Pro svou cenovou dostupnost a zajímavý potenciál byla vybrána sestava WAAM – CMT, obsahující:

- Zdroj Fronius TransPuls Synergic 3200 CMT R (parametry viz tab. 1), který je zcela digitalizovaný, řízený mikroprocesorem, určený k robotizovaným svařovacím úkonům. Vhodný pro krátký, sprchový a impulsní oblouk. Jeho výhodou je multiprocesní provoz, použití možné pro CMT i technologie MIG/MAG, TIG, MMA. Sprážen s podavačem Fronius VR 7000 CMT o čtyřech kladkách. [59; 60; 73]

Tab. 1 Parametry zdroje [59].

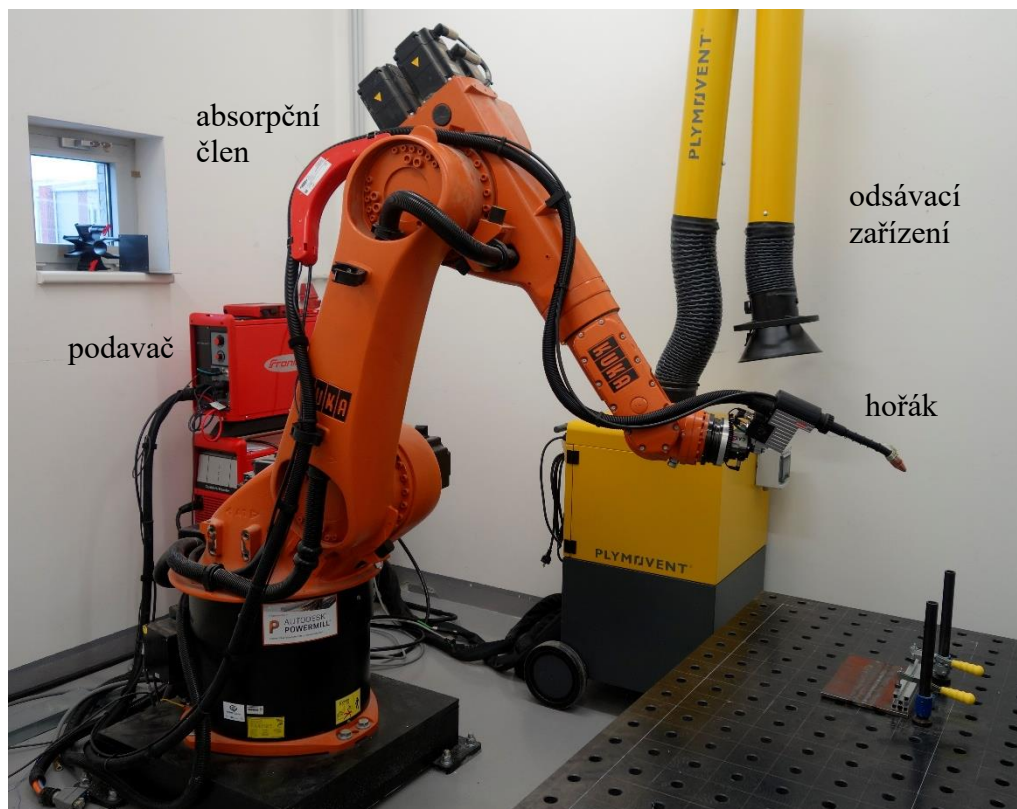
Parametry	Hodnoty
Svařovací proud maximální	320 A
Svařovací proud minimální	3 A
Dovolené zatížení 40 %	320 A
Dovolené zatížení 60 %	260 A
Dovolené zatížení 100 %	220 A
Napětí naprázdno	65 V
Rozsah pracovního napětí	14,2 – 300 V
Síťové napětí	3×400 V
Hmotnost	34,6 kg

- Hořák Fronius Robacta Drive CMT G (viz obr. 40), vhodný k montáži na rameno robotu. Jeho součástí je hubice s měděnou tryskou, pasivní a plynové chlazení. Oscilaci drátu řídí dvoukladkový podavač o rychlosti až $22 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, nutný pro fungování metody Cold metal transfer. Použití vhodné i pro CMT Pulse a CMT Braze. [60; 73]



Obr. 40 Robacta Drive CMT G [foto autor]

- Absorpční člen Fronius (viz obr. 41), jeden ze základních prvků metody CMT, integrovaný do vedení přídavného materiálu. Vyrovnává změny délky dodávaného drátu, vyvolané činností podavače ve zdroji a v hořáku. Je namontován na robotické rameno. [26; 60; 73]
- Robot KUKA KR 60 HA (viz obr. 41) s možností pohybu v 6 osách. Jeho maximální zatížení činí 60 kg, dosah 2033 mm a opakovatelnost pohybu s přesností 0,05 mm. Je proto určený právě na svařovací či obráběcí operace. Udávaná výhoda je hlavně v úspoře prostoru. S robotem je spjata řídicí jednotka řady KR C2, která obsahuje řídicí i bezpečnostní systémy, umožňuje připojení pendantu. Synchronizace komponent je zajišťována mimo jiné převodníky, upravenými na míru dané sestavy. [61; 73]
- Odsávací zařízení PLYMOVENT MobileGo^{Plus} (viz obr. 41) se dvěma filtry kategorie W3, vybavené ramenem KUA o vysoké flexibilitě díky 3 kloubům. Zajišťuje odvod plynů, unikajících jak z trysky hořáku, tak vznikajících samotným procesem svařování. Tavený materiál se částečně odpařuje a uvolňují se tak toxické prvky, jako šestimocný chrom, mangan, nikl a olovo, které způsobují dráždění sliznic a také dlouhodobé obtíže. [62; 63; 64; 73]



Obr. 41 sestava CMT na ÚK ORIAT [foto autor].

Pracoviště je dále vybaveno otočným, elektronicky řízeným svařovacím stolem pro rotační výroby, dále vyhřívaným stolem, umožňujícím správné přilnutí prvních tisknutých vrstev. Sestava je umístěna v místnosti s odděleným ovládacím centrem pro obsluhu a krytým prostorem s řídicími komponenty. [73]

3 APLIKACE CMT A ZHODNOCENÍ

Cílem výzkumu na fakultním pracovišti ÚK ORIAT je tisk hořčíkových slitin, konkrétně přídavného materiálu AZ 61 (Mg-Al-Zn). Vysoká oxidovatelnost a intenzita hoření po vzplanutí vyžadují minimální natavení a co nejmenší vnesené teplo. Proto se nejčastěji používá metoda TIG o střídavém proudu a krátkém oblouku. WLAM je pro danou aplikaci spíše nevhodné a komplikované, tvorbou hydroxidu hořečnatého ve svaru vzniká pórovitost, která se odstraňuje předehřevem metodou PAW a použitím zdvojeného laserového paprsku. EBAM dosahuje poměrně dobrých výsledků, experimenty ukázaly zvýšení pevnosti i kujnosti takto vytištěných dílců, avšak je pro běžné použití velmi nákladné. CMT nabízí díky svým vlastnostem zajímavou a levnější alternativu díky studenému oblouku a pořizovacím cenám sestavy. [65; 66]

Další oblastí zkoumání je tvorba převislých struktur z uhlíkových ocelí, které se dají při správných podmínkách tvořit metodami 3D tisku kovů bez podpurných struktur. Udává se, že opory netřeba navrhovat u stěn pod úhlem větším než 40 až 45°, u výčnělků menších než 0,3 až 0,5 mm a u horizontálních otvorů do průměru 8 mm. Technologii EBAM se tvoří převislé vrstvy běžně při výrobě nádrží, avšak výsledné housenky jsou příliš hrubé. Ostatní metody řeší problematiku také, hlavně u výroby komorových dílů. CMT umožňuje tisk přesnějších a komplikovanějších převisů. Sází na výhodu v krátkém oblouku a malém vneseném teple, rychlém tuhnutí nanášených vrstev. Výhodou je taktéž dobrá polohovatelnost hořáku díky robotickému ramenu. [16; 67]

3.1 Dodavatelé automatizace a robotizace

Metoda CMT je pod ochrannou známkou společnosti Fronius, kterou byla vyvinuta. V jejich katalogových listech lze tedy nalézt všechny potřebné komponenty pro zprovoznění dané technologie, mimo robotických ramen. Hořák Robacta Drive CMT se dočkal modernizace v podobě kompaktnějšího modelu WF 60i (viz obr. 42). Stávající zdroje řady TransPuls Synergic nahradil nově systém TPS, případně TPS/i s integrovaným podavačem, který lépe komunikuje průmyslovými roboty. [26; 60]



Obr. 42 WF 60i Robacta Drive CMT [26]

Robotizace je ve 3D tisku klíčovým prvkem. Při výběru vhodného stroje je kladen důraz hlavně na prostorovou náročnost, cenu, přesnost a dosah ramene. Výrobci se také snaží o možnost co nejlepší synchronizace všech komponent soustavy. Mezi dodavatele patří: [68; 69; 70; 71]

- KUKA – řada KR modely CYBERTECH, AGILUS a IONTEC,
- ABB – řada IRB, modely 1410, 1520, 1600, 1660, 2400, 2600, 4400 a 4600,
- FANUC – řada ArcMate, modely 100IC, 120 IC, 120IB,
- YASKAWA – řada AR, modely 700, 900, 1440, 1730, 2010, 3120.

ZÁVĚR

Práce přináší rozbor současně používaných technologií 3D tisku kovů drátovými metodami svařování, jako je WLAM, EBAM a WAAM a jejich dílčích druhů. U každého je blíže rozebrán princip, výhody a nevýhody, dodavatelé, použití v praxi a výsledky nových výzkumů v dané oblasti. Využití se nachází hlavně ve sféře automobilového, leteckého a kosmického průmyslu. Přínos je patrný v možnosti výroby komorových, tvarově složitých součástí a převalných struktur, které by bylo obtížné vytvořit obráběním, dále také v rapid prototyping, opravách či povlakování. Důraz je kladen na snížení výrobní ceny, omezení odpadu, vysoký poměr BTF a ekologii procesu. Pozornost si zaslouží vývoj depozice tenkých vrstev technologiemi μ -PTAAM a μ -WAAM, vedoucí ke zvýšení přesnosti, tudíž k omezení dokončovacích operací. Nastíněna je i možnost hybridizace, tedy přímá kombinace a synchronizace tisku s obráběním v jednom stroji, značně usnadňující a zrychlující celý proces výroby.

Blíže je rozebrána metoda WAAM, díky velkému potenciálu, vysoké modifikovatelnosti a univerzálnosti pro 3D tisk kovů. Konkrétní metoda CMT, vyvinutá společností Fronius, je zprovozněna na ÚK ORIAT FSI VUT v Brně. Cílem pracoviště je tisk hořčkových slitin a převalů z uhlíkových ocelí. Výsledky ukazují vhodnost zvolení dané technologie díky studenému přenosu kovu, nízké pořizovací ceně soustavy a dobré polohovatelnosti hořáku robotickým ramenem. Při porovnání se ostatní metody jeví jako příliš nepřesné, komplikované nebo drahé. Aplikace CMT má v tomto směru budoucnost, zajímavým zaměřením může být spojení s μ -WAAM.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. MESSER TECHNOGAS S. R. O. 3D tisk kovových materiálů. In: *Strojirenstvi.cz* [online]. Brno: Nová média, 2020 [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <https://www.strojirenstvi.cz/3d-tisk-kovovych-materialu>
 2. KRATOCHVÍLOVÁ, Jitka. *3D tisk*. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně v Ústí nad Labem, 2015. ISBN 978-80-7414-936-8.
 3. *About Additive Manufacturing* [online]. London: Loughborough University, 2021 [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/>
 4. VALDIVIESO, Carlota. CHIRON Group launches first metal 3D printer for wire and powder. In: *3D natives.com*. [online]. Paris: 3D natives, 2020 [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/metal-3d-printer-for-wire-and-powder-070520205/>
 5. KYVELOU, Pinelopi, Harry SLACK, Dafni DASKALAKI MOUNTANOU, M. Ahmer WADEE, T. Ben BRITTON, Craig BUCHANAN a Leroy GARDNER. Mechanical and microstructural testing of wire and arc additively manufactured sheet material. *Materials & Design* [online]. 2020, [cit. 2022-05-16]. ISSN 0264-1275. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108675>
 6. VÍT, Tomáš. Nové technologie posouvají možnosti 3D tisku. In: *SystemOnLine* [online]. Brno: CCB spol., 2021 [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <https://www.systemonline.cz/rizeni-vyroby/nove-technologie-posouvaji-moznosti-3d-tisku.htm>
 7. LUMINOSO, Lindsay. Large-part Additive Manufacturing. In: *Canadian Fabricating&Welding* [online]. Toronto: FMA Communications Canada, 2020 [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <https://www.canadianmetalworking.com/canadianfabricatingandwelding/article/fabricating/large-part-additive-manufacturing>
 8. GEYER, Frank. Additive Manufacturing: Making Sense of Laser Metal Deposition and 3D Printing. In: *Fabricating & Metalworking* [online]. Bristol: Alliance Communications, 2016 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.fabricatingandmetalworking.com/2016/07/additive-manufacturing-making-sense-laser-metal-deposition-3d-printing/>
 9. Laser Additive Manufacturing: Generative Metal Components. *Laserline* [online]. Mülheim-Kärlich: Laserline, 2020 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.laserline.com/en-int/laser-additive-manufacturing/>
 10. *Wire-laser Additive Manufacturing*. [online]. Cranfield University, 2017 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.cranfield.ac.uk/research-projects/wire-laser-additive-manufacturing>
 11. *Meltio* [online]. Brno: 3D Wiser, © 2022 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://3dwiser.com/produkty/3d-tiskarny/kovy/meltio/>
 12. PRIOR, Madeleine. Mitsubishi Electric Announces Launch of its Wire-Laser Metal 3D Printer. In: *3D natives* [online]. Paris: 3D natives, 2022 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/mitsubishi-electric-wire-laser-metal-3d-printer-250220224/>
 13. The Project ProLMD: Hybrid Production with Laser Metal Deposition. In: *Compositi magazine* [online]. Milano: Tecneedit, 2020 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.compositimagazine.it/the-project-prolmd-hybrid-production-with-laser-metal-deposition/>
-

-
14. *Make Metal Parts Faster & Cheaper with EBAM® Metal 3D Printing Technology* [online]. Sciaky, © 2022 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.sciaky.com/additive-manufacturing/>
 15. *Electron Beam Welders & Custom EB Welding Solutions* [online]. Sciaky, © 2022 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.sciaky.com/eb-welding-systems/>
 16. Sciaky' EBAM Metal 3D Printers. In: *Metalworking World Magazine* [online]. Milano: Tecniche Nuove Spa, 2015 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.metalworkingworldmagazine.com/sciaky-ebam-metal-3d-printers/>
 17. AMBROŽ, Oldřich. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: ZEROSS, 2001. Svařování. ISBN 80-85771-81-0.
 18. *Svařovací systém MIG/MAG pro každé použití*. [online]. Fronius, © 2022 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/cs-cz/czech-republic/perfect-welding/informace-o-produktu/mig-mag-svarovaci-system-tpsi>
 19. Mechanismy podávání drátu u MIG/MAG svářeček. In: *Svarinfo.cz* [online]. 2008 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cislocianku=2008020702>
 20. *Podávání drátu 4Rn DC24V* [online]. Weldes.cz, © 2022 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://weldes.cz/podavace-dratu/950-podavani-dratu-4rn-dc24v.html>
 21. Volba ochranného plynu pro svařování. In: *Technický týdeník* [online]. Praha: Business Media, 2006 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/volba-ochranneho-plynu-pro-svarovani_17636.html
 22. KLIMEŠ, Ladislav. Tlakové láhve pro svařování – Pravidla BOZP a PO. In: *Bozpmorava.cz* [online]. DECIUS, 2018 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.bozpmorava.cz/tlakove-lahve-pro-svarovani-pravidla-bozp-a-po/>
 23. *MIG/MAG Svařovací hořáky řady ABIROB® W* [online]. Abicor Binzel, © 2022 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.binzel-abicor.com/CZ/cze/sortiment/robotic-systems/robo-svarovaci-horaky/migmag-abirob-w/>
 24. KAUPPILA, Ile. Robotic Arm 3D Printing – Platforms & Software. In: *All3DP.pro* [online]. 2021 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/robotic-arm-3d-printing-platforms-software/>
 25. Large rail parts produced in half the time, with 30% cost reduction. In: *3D Printing Media Network* [online]. 2020 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.3dprintingmedia.network/large-rail-secondary-roll-stop-produced-in-half-the-time/>
 26. Systémy Pushpull. *Fronius* [online]. © 2022 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/cs-cz/czech-republic/perfect-welding/vyrobky/robotizovan%C3%A9-sva%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD/jednodr%C3%A1tov%C3%A9-sva%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD-migmag/syst%C3%A9my-pushpull/syst%C3%A9my-pushpull>
 27. O svařovací metodě TIG. In: *Alfin-Trading.cz* [online]. 2021 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.alfin-trading.cz/rady-a-tipy/o-svarovaci-metode-tig/>
-

-
28. ZHANG, Xiaoyong, Kehong WANG, Qi ZHOU a kolektiv. Microstructure and mechanical properties of TOP-TIG-wire and arc additive manufactured super duplex stainless steel (ER2594). *Materials Science and Engineering: A*. 2019. ISSN 0921-5093. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138097>
 29. QI, Zewu, Baoqiang CONG, Bojin QI, Hongye SUN, Gang ZHAO a Jialuo DING. Microstructure and mechanical properties of double-wire + arc additively manufactured Al-Cu-Mg alloys. *Journal of Materials Processing Technology*. 2018, s. 347-353. ISSN 0924-0136. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.12.019>
 30. SPANIOL, E., T. UNGETHÜM, M. TRAUTMANN, K. ANDRUSCH, M. HERTEL a U. FÜSSEL. Development of a novel TIG hot-wire process for wire and arc additive manufacturing. *Welding in the World*. 2020, s. 1329-1340. ISSN 1878-6669. Dostupné z: doi:[10.1007/s40194-020-00871-w](https://doi.org/10.1007/s40194-020-00871-w)
 31. AYARKWA, K.F., S.W. WILLIAMS a J. DING. Assessing the effect of TIG alternating current time cycle on aluminium wire+arc additive manufacture. *Additive Manufacturing*. 2017, s. 186-193. ISSN 2214-8604. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.10.005>
 32. *AB Furhoffs Rostfria* [online]. MIGATRONIC, © 2020 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.migatron.com/en/cases/ab-furhoffs-rostfria/>
 33. *Plasma Arc Additive Manufacturing* [online]. Inmotion, © 2022 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.inmotion.global/plasma-additive-manufacturing/>
 34. *What is plasma welding?* [online]. TWI, © 2022 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-is-plasma-welding>
 35. Foster + Partners ramp up research into metal-based 3D printing. In: *CLADnews* [online]. 2017 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.cladglobal.com/CLADnews/architecture-design/Foster--Partners-architecture-design-3D-printing-Large-Additive-Subtractive-Integrated-Modular-Machine/331433?source=news>
 36. SADASIVAM, Prakash a Murugaiyan AMIRTHALINGAM. Design and fabrication of micro-plasma transferred wire arc additive manufacturing system. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2022, s. 185-195. ISSN 1755-5817. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2022.01.014>
 37. KUMAR, Pravin, Neelesh JAIN a Mayur SAWANT. Modeling of dimensions and investigations on geometrical deviations of metallic components manufactured by μ -plasma transferred arc additive manufacturing process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020/04/01, Dostupné z: doi:[10.1007/s00170-020-05218-9](https://doi.org/10.1007/s00170-020-05218-9)
 38. *PMD Robotic Line* [online]. SBI, © 2020 - 2022 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.sbi.at/en/products/plasma-additive-manufacturing/pmd-robotic-line>
 39. M3DP: Parts and demonstrations by plasma metal deposition. In: *SBI.at* [online]. 2020 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: https://www.sbi.at/media/pages/products/plasma-additive-manufacturing/m3dp-industrial-line/8a50736657-1619836063/2021_pmd-applications.pdf
 40. *Rapid Plasma Deposition* [online]. Norsk titanium, © 2022 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.norsktitanium.com/technology>
-

-
41. Svařování MIG/MAG - seznámení. In: *Svářečky-elektrody.cz* [online]. [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.svarecky-elektrody.cz/svarovani-mig-mag-zakladni-seznameni/t-41/t-116>
 42. *Water Cooled TBI 9W-3C Top 2000 Series Welding Torch* [online]. IndiaMART, © 1996 - 2022 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.indiamart.com/proddetail/tbi-9w-3c-top-2000-series-welding-torch-21888611897.html>
 43. *Zváračské metody a zariadenia: II. diel učebných textov pre kurzy zvaračských technológov*. Ostrava: ZEROSS, 2000. Sváření. ISBN 80-85771-84-5.
 44. *Wire Arc Additive Manufacturing: Economical 3D Printing for Metal* [online]. Fronius, © 2022 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: https://www.fronius.com/cs-cz/czech-republic/perfect-welding/informacni-centrum/tisk/waam#id_9626e352-43f3-4be6-a423-85348ca40538_13e1135b-2413-4690-a298-51e1d17cd52d
 45. SERTOGLU, Kubi. Engineers develop new Micro-WAAM 3D printing technology for small metal parts. In: *3D Printing Industry* [online]. © 2017 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/news/engineers-develop-new-micro-waam-3d-printing-technology-for-small-metal-parts-203915/>
 46. KOLAŘÍK, Ladislav, Jan SUCHÁNEK a Marie KOLAŘÍKOVÁ. Navařování metodou WAAM. In: *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2018 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/navarovani-metodou-waam>
 47. *CMT – Cold Metal Transfer: studený svařovací proces pro nejvyšší kvalitu* [online]. Fronius, © 2022 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/cs-cz/czech-republic/perfect-welding/svet-svarovani/fronius-welding-processes/cmt>
 48. WESLING, Volker, Antonia SCHRAM a Mirjam KESSLER. Low Heat Joining – Manufacturing and Fatigue Strength of Brazed, Locally Hardened Structures. *Advanced Materials Research*. 2010/10/01, s. 347-374. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.137.347
 49. *CMT Cycle Step, a new welding process variant* [online]. Fronius, © 2022 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <http://fronius.com.tw/en/welding-technology/info-centre/magazine/2019/cmt-cycle-step>
 50. *CMT advanced: A higher deposition rate, better gap-bridging ability and higher stability* [online]. Fronius, © 2022 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/en/welding-technology/world-of-welding/fronius-welding-processes/cmt-advanced>
 51. TAPIOLA, Jaakko. *Cold Metal Transfer cladding of wear and corrosion resistant coatings in engine applications*. 2017/02/08. Dostupné z: doi:10.13140/RG.2.2.15573.52963
 52. *CMT PIN: For high-strength metal-plastic joints* [online]. Fronius, © 2022 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/en/welding-technology/world-of-welding/fronius-welding-processes/cmt-pin>
 53. *CMT Twin* [online]. Fronius, © 2022 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/cs-cz/czech-republic/perfect-welding/vyrobky/robotizovan%C3%A9-sva%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD/vysokov%C3%BDkonn%C3%A9-sva%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD-migmag/cmt-twin/cmt-twin>
-

-
54. *Brazing: CMT BRAZE+ reduces investment and operating costs* [online]. Fronius [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/en/welding-technology/world-of-welding/fronius-welding-processes/cmt-braze>
 55. Hybridní výroba spojuje 3D tisk s přesným obráběním. In: *Strojirenstvi.cz* [online]. Nová média, © 2014 - 2022 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.strojirenstvi.cz/hybridni-vyroba-spojuje-3d-tisk-s-presnym-obrabenim>
 56. LU, Xin, Mengnie Victor LI a Hongbin YANG. Comparison of wire-arc and powder-laser additive manufacturing for IN718 superalloy: unified consideration for selecting process parameters based on volumetric energy density: unified consideration for selecting process parameters based on volumetric energy density. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021, s. 1517-1531. ISSN 1433-3015. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-021-06990-y
 57. JONES, Jason B. The Synergies of Hybridizing CNC and Additive Manufacturing. [online]. 2016 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/The-Synergies-of-Hybridizing-CNC-and-Additive-Jones/ca8e2e920ebc7eb5abfbca7e505e0faa3d71a5c6>
 58. XIN, Zhibin, Zhibin YANG, Han ZHAO a Yuxin CHEN. Comparative Study on Welding Characteristics of Laser-CMT and Plasma-CMT Hybrid Welded AA6082-T6 Aluminum Alloy Butt Joints. *Materials* [online]. 2019 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/Comparative-Study-on-Welding-Characteristics-of-and-Xin-Yang/21a704939c8795e525adc66778e3770ca56d3e4d>
 59. *TransPuls Synergic 3200 CMT* [online]. HBTweld, © 2022 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://hbt-weld.cz/produkty/transpuls-synergic-3200-cmt/>
 60. PRODUCT CATALOGUE 2016 / 2017 PRODUCT CATALOGUE 2016 // Perfect Welding. / Perfect Welding / Solar Energy / Perfect Charging. In: *DocPlayer* [online]. 2016 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://docplayer.net/50654412-Product-catalogue-2016-2017-product-catalogue-2016-perfect-welding-perfect-welding-solar-energy-perfect-charging.html>
 61. *KUKA KR 60 HA* [online]. RobotWorx, © 2022 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.robots.com/robots/kuka-kr-60-ha>
 62. *Plymovent* [online]. MobileGo, © 2013 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <http://www.plymovent.cz/cs/mobilego-2030>
 63. *KUA* [online]. MobileGo, © 2013 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <http://www.plymovent.cz/cs/kua-2004>
 64. Svařování má řadu zdravotních rizik. In: *TZB - info* [online]. 2018 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/prumyslova-vzduchotechnika/17707-svarovani-ma-radu-zdravotnich-rizik>
 65. HAROONI, Masoud. Laser Welding of Magnesium Alloys: Issues and Remedies: Issues and Remedies. *Magnesium Alloys* [online]. Rijeka: IntechOpen, 2017, Ch. 1 [cit. 2022-05-16]. ISBN 978-953-51-2898-4. Dostupné z: doi:10.5772/66608
 66. MUNITZ, Abraham, C. COTLER, H. SHAHAM a G. KOHN. Electron beam welding of magnesium AZ91D plates. *Welding journal* [online]. 2000/07/01, [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/297115563_Electron_beam_welding_of_magnesium_AZ91D_plate
-

67. ZETKOVÁ, Ivana. *Problematika výroby strojních kovových součástí 3D tiskem*. Plzeň, 2017. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní.
68. *Roboty pro svařování v ochranné atmosféře KUKA* [online]. KUKA, © 2022 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.kuka.com/cs-cz/pr%C5%AFmyslov%C3%A1-odv%C4%9Btv%C3%AD/kovopr%C5%AFmysl/sva%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD-v-ochrann%C3%A9-atmosf%C3%A9%C5%99e/roboty-pro-sva%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD-v-ochrann%C3%A9-atmosf%C3%A9%C5%99e-kuka>
69. *FANUC ArcMate series* [online]. RobotsDoneRight [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://robotsdoneright.com/FANUC/Arcmate-Series/FANUC-Arcmate-Series.html>
70. *Robot Selector* [online]. ABB, © 2022 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots/robot-selector>
71. *Industrial Robots* [online]. Motoman, © 2022 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.motoman.com/en-us/products/robots/industrial>
72. CITACE PRO. *Generátor citací* [online] 2022 [cit. 16. 5. 2022] Dostupné z: <https://www.citacepro.com/>
73. SLAVÍČEK Jakub [ústní sdělení] Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, 2022

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbole

Označení	Legenda	Jednotka
E	Youngův modul	[GPa]
I	elektrický proud	[A]
Q	vnesené teplo	[J]
U	elektrické napětí	[V]
v	rychlost podavače	[m·min ⁻¹]
θ	úhel depozice vrstev	[°]

Zkratky

Označení	Legenda
BTF	hmotnostní poměr použitého materiálu a výrobku
CMT	studený přenos kovu
EBAM	aditivní výroba elektronovým paprskem
EN	negativní polarita
EP	pozitivní polarita
ORIAT	Odbor reverzního inženýrství a aditivních technologií
PAW	svařování plazmou
PBF	spékání práškové vrstvy
ÚK	Ústav konstruování
WAAM	aditivní výroba elektrickým obloukem
WLAM	aditivní výroba laserovým paprskem

