žRobotické navařování Al slitin metodou WAAM

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE Ing. Miroslav Sahul, Ph.D., IWE doc. Ing. Marie Kolaříková, Ph.D., IWE Ing. Tomáš Gurčík, IWE

ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie, Technická 4, 160 00 Praha 6 Ladislav.kolarik@fs.cvut.cz

Abstrakt:

Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) je moderní aditivní technologie používaná k výrobě dílů postupným vrstvením přídavného materiálu, pomocí elektrického oblouku. Hlavními výhodami této technologie jsou vyšší rychlost nanášení, nízké výrobní náklady a kratší výrobní časy. V tomto příspěvku byla aplikována technologie WAAM na Al slitinách. Jsou zde zmíněny specifika navařování Al slitin, kde hlavním omezením je porozita, která přímo ovlivňuje mechanické vlastnosti. Nižší tepelný příkon při použití modifikované metody MIG navařování (Cold Metal Transfer) zajišťuje stabilnější proces, zlepšuje účinnost a použitelnost svařování s nižším tepelným příkonem obloukového svařování. Pro výrobu stěn z hliníkové slitiny byly použity různé varianty modifikovaného MIG procesu (+ pulzace, cycle step). Přídavným materiálem použitým pro navařování byl svařovací drát ESAB OK Autrod 5087 o průměru 1,2 mm (tzn. Al slitina AlMg4,5MnZr). Bylo pozorováno, že režim navařování má vliv na mikrostrukturu svarového kovu, která byla tvořena dendrity tuhého roztoku hliníku, zatímco mezidendritické oblasti byly obohaceny legujícími prvky. Mechanické vlastnosti návarů hliníkových slitin byly analyzovány pomocí tahové zkoušky, ve směru navařování a kolmo na směr navařování. Deformace byla měřena bezkontaktně metodou digitální korelace obrazu (DIC). Byl hodnocen vliv režimu MIG navařování na mechanické vlastnosti vyrobených lineárních návarů ve formě stěn.

Úvod – popis technologie WAAM

Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) je výrobní proces používaný pro aditivní výrobu (3D tisk) nebo opravy kovových součástí. WAAM metoda kombinuje využití elektrického oblouku jako tepelného zdroje k natavení přídavného materiálu (PM) ve formě kovového drátu (jako PM se používají běžné svařovací dráty, standardně používané pro MIG/MAG procesy svařování). Proces pohybu hořáku je nutné automatizovat. K pohybu hořáku za účelem vytváření strukturních 3D návarů se používají nejčastěji univerzální průmyslové robotické systémy běžné pro svařování elektrickým obloukem v ochranných atmosférách. Lze použít i jiné typy manipulátorů, ale použití robotů je dnes bez problémů dostupné a dává široké možnosti použití při tvorbě 3D návarů (tzn. obvykle se používají kloubové roboty s 6-ti stupni volnosti a s příslušnými periferními zařízeními). Pojmenování metody bylo vytvořeno na Cranfield University, která se tímto procesem intenzívně zabývá [1].

Princip technologie WAAM spočívá v ukládání velkého počtu jednotlivých návarových housenek vedle sebe (resp. na sebe) [2]. Z tohoto důvodu, 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. Součásti jsou tedy tvořeny postupným navařováním jednotlivých vrstev po trajektorii budoucího obrysu součásti (vždy ze zdola nahoru) s konstantní nebo adaptivní tloušťku návarové "stěny", případně ukládáním materiálu do těchto obrysů k vytvoření plných částí.

Technologie WAAM je nyní schopna podporovat další pokrok odstraněním omezení týkajících se designu a rozsahu velikosti dílů (pomocí průmyslových robotů jsme schopni vytvořit pracovní plochu potřebných rozměrů (na rozdíl např. od klasické metody 3D tisku kovových materiálů – metody DMSL, která má rozměry pracovní plochy velmi omezenou). Tento progresivní proces vytváří součásti téměř čistého tvaru, které vyžadují minimální konečnou úpravu, čímž se minimalizuje odpadní materiál a spotřeba surovin při finálním obrábění (které je nutné zejména v případě malých rozměrových tolerancí výrobků nebo v případě požadavků na velkou přesnost nebo drsnost povrchu).

Nejčastěji jsou pro metodu WAAM používány metody svařování elektrickým obloukem v ochranných atmosférách, tzn. metoda TIG (141 podle ČSN EN ISO 4063), a metoda MIG/MAG (131/135). Rychlost nanášení (výkon navaření) pro WAAM může být při použití TIG navařování okolo 1 kg / h, zatímco při použití metody MIG/MAG to může být až 10-15 kg/hod. Je ovšem nutné upozornit, že vhodnost těchto metod se s použitím různých materiálů liší [3]. Obecně se při technologii navařování WAAM potýkáme se stejnými problémy jako při klasickém svařování uvedenými metodami. Těmi jsou porozita, vysoký rozstřik, nestabilita elektrického oblouku či velké vnesené teplo. Tyto problémy je možné snížit použitím modifikovaných procesů metody MIG/MAG, které sníží vnesené teplo (mají nízký tepelný příkon) a mají bezrozstřikový charakter procesu navařování, vynikající reprodukovatelnost, vysoký výkon navaření a možnost tvorby menších tloušťěk stěn s jemnější mikrostrukturou.

Často je v kombinaci s metodou WAAM používán modifikovaný proces svařování/navařování MIG/MAG, označovaný jako Cold Metal Transfer (CMT), který má výhody ve vysoké přesnosti, nízkých nákladech na vybavení (v porovnání s laserovými systémy) a ve vysoké rychlosti nanášení. Je to ekonomická a rychlá metoda výroby prototypů vysoce kvalitních kovových dílů, která využívá elektrický oblouk jako zdroj tepla k roztavení drátu [4, 5]. Stabilita svařovacího procesu a odvod tepla jsou rozhodujícími faktory při výrobě součástí pomocí WAAM. Svařovací proces musí vynaložit co nejméně energie, aby se spodní vrstvy (navařené na podkladový plech) nezačaly znovu tavit. Uvedená varianta MIG/MAG procesu dosahuje dobrých depozičních rychlostí a přenáší pouze nízkou úroveň tepla na vytvářenou součást [6].

Použité materiály a popis svařitelnosti hliníkových slitin

Použitelnost základních materiálů je omezena použitou metodou navařování, tak aby byl navařovaný materiál dostatečně chráněn proti účinky okolního prostředí. Tzn., že při správné volbě metody lze zpracovávat všechny běžné konstrukční kovové materiály a jejich slitiny. U některých typů speciálních materiálů je vhodné upravit teplotní režim a předepsat např. teplotu interpass mezi jednotlivými vrstvami návaru (a případně je možné zařadit i speciální režim "válcování" navařených vrstev), obdobně jako při "klasickém" svařování. Běžně se metoda WAAM dnes používá na různé typy ocelových materiálů, od nízkolegovaných konstrukčních ocelí, přes vysokopevné ocelí až po oceli vysokolegované korozivzdorné. Protože metoda byla zaváděna především pro součásti v leteckém průmyslu, proto byly realizovány výzkumné práce i na speciální slitiny niklu a titanu [7]. Tento příspěvek však pojednává o možném využití pro slitiny hliníku, což je dnes po oceli druhý nejpoužívanější konstrukční materiál a nejpoužívanější neželezný kov (který se však pro svařování používá obvykle ve formě slitin).

Svařitelnost Al a jeho slitin je ovlivněna několika podstatnými činiteli, díky kterým vyžaduje Al odlišný přístup ke svařování (a tím i pro navařování) ve srovnání s ocelemi. Nejdůležitější činitelé ovlivňující svařitelnost Al slitin, které mají největší vliv na kvalitu svarových spojů, jsou [8, 9, 10]:

Velká afinita Al ke kyslíku, která má za následek tvorbu oxidické vrstvy Al₂O₃. Oxidická vrstva vytváří sice ochranu materiálu před další oxidací, má však vlastnosti, které negativně ovlivňují svařitelnost. Je to především vysoká teplotní stabilita (teplota tavení Al₂O₃ je 2054 °C) vzhledem k základnímu materiálu (teplota tavení čistého hliníku je 658 °C) a nerozpustnost v roztaveném kovu, což znamená, že při svařování je tato vrstva prakticky netavitelná a musí být ze svarového spoje před i během svařování odstraněna. Al₂O₃ je elektricky nevodivý, proto znemožňuje nastavení správných procesních parametrů při obloukovém svařování, pokud není odstraněn. Má rovněž větší měrnou hmotnost než základní materiál (ZM), proto případné zbytky oxidu mohou při svařování propadat do svarové lázně. Tak vznikají oxidické vměstky ve svarovém kovu (SK), které mohou zvyšovat náchylnost svarového spoje ke vzniku trhlin, které jsou dle ČSN EN ISO 10042 ve všech stupních kvality vždy nepřípustnou vadou. Oxidická vrstva je silně hygroskopická, proto může při svařování docházet vlivem zadržované vlhkosti k nadměrné porozitě svarů. Při metodě WAAM je součást tvořena navařením PM, takže vhodné skladování PM může z velké části tyto problémy odstranit a ošetřit je nutné zejména podkladový materiál, na který se návar provádí (tzn. odstranit z něho oxidickou vrstvu). Pro zabránění další tvorby oxidické vrstvy je nutné jako ochranný plyn používat ochranné inertní plyny (zejména Ar, případně He nebo směsi Ar+He). Během vlastního navařování se oxidická vrstva odstraňuje přímým účinkem elektrického oblouku v ochranném plynu Ar (tzv. čistící účinek el. oblouku) [11].

Další vlastnost, která způsobuje potíže při zhotovování bezpórovitého svaru je *velká rozpustnost plynů v Al* – při pohlcování plynů hliníkem, dochází k absorpci, difúzi a rozpouštění plynů na povrchu i uvnitř tekutého, popř. tuhého kovu. Z plynů má největší vliv na tvorbu pórů v Al a jeho slitinách vodík (H₂), který je v Al rozpustný. Rozpustnost H₂ klesá s rostoucím obsahem nečistot, zvyšuje se s rostoucí teplotou. Přímý účinek H₂ na vznik vad se projevuje zejména ve SK. Při krystalizaci SK klesá prudce rozpustnost H₂ v Al, přičemž nedojde k úplnému vyloučení H₂ ze SK. Al svary rychle krystalizují a část H₂ ve fázi krystalizace proto zůstává ve svaru a k jeho vyloučení dojde až pod teplotou solidu. V pevném plastickém svaru pak vyvolá vylučující se H₂ vznik nežádoucích pórů a bublin. Snížit nepříznivé působení H₂ lze: minimalizováním zdrojů H₂ před svařováním, zkrácením času přímého tavení svarového kovu a zabráněním přehřátí svarového kovu, použitím vhodné plynové (příp. struskové nebo tavidlové) ochrany svarové lázně [12].

Velkým problémem při svařování Al slitin je i *velký koeficient teplotní délkové roztažnosti* Al, který způsobuje velké deformace a napětí, které mohou být i příčinou vzniku trhlin při svařování. Tento jev je při svařování jedním z nejnepříznivějších. Navíc čistý Al má vysokou tepelnou vodivost, a proto je i teplotní pole při svařování mimořádně široké. Celistvost svarového spoje je jednou ze základních podmínek jeho kvality. Proto je potřeba znát činitele, které podmiňují vznik trhlin. Náchylnost Al slitin k tvorbě trhlin je jedním z kritérií při hodnocení jejich svařitelnosti (a komplikuje i tvorbu návarů). Může docházet ke vzniku dvou druhů trhlin, které se označují podle charakteru jejich vzniku jako tzv. trhliny za tepla vznikající v procesu krystalizace a trhliny za studena vznikající v tuhém stavu. Trhliny za tepla jsou charakteristické pro SK a zónu částečného natavení, trhliny za studena vznikají obvykle v TOO při chladnutí [12]. Nejčastějším typem trhlin u Al slitin jsou "trhliny za tepla" vznikající ve SK (interkrystalické solidifikační trhliny) a někdy i v TOO (likvační praskání).

Vznik trhlin je rovněž ovlivněn způsobem krystalizace a segregací. Náchylnost ke vzniku trhlin za tepla je ovlivňována typem a především množstvím eutektické fáze. V případě, že objem tekuté eutektické fáze v závěrečné fázi krystalizace je dostatečný na vyplnění prostoru mezi vznikajícími dendrity nejsou splněny podmínky pro vznik krystalizačních trhlin. Na úplné potlačení krystalizačních trhlin je potřebný objem eutektické fáze v rozmezí 15 – 25%, podle typu slitiny a podmínek svařování. Potřebné množství eutektika ve svarovém kovu lze zajistit použitím vhodného PM. Slitiny s větším

množstvím přísad jsou ke vzniku trhlin náchylnější. - což lze omezit použitím PM s vyšším obsahem legujícího prvku [13]. Pro každou skupinu slitin Al je stanovena kritická hodnota legujícího prvku, pro kterou je náchylnost na vznik trhlin za tepla největší. Obecně se např. uvádí, že sklon k trhlinám u vytvrditelných slitin se sníží použitím PM se zvýšeným obsahem Si nebo Mg. Nejčastěji se používají svařovací dráty AlSi5. Rovněž PM AlMg5 s přísadou 0,1 až 0,25 % Cr působí příznivě na snížení sklonu k trhlinám.

Kromě chemického složení SK a ZM (omezení obsahu nečistot typu Cu, Pb, Zn v ZM) může vznik trhlin za tepla ovlivnit i zvolená technologie svařování resp. navařování (vhodné jsou technologie umožňující velkou rychlost svařování – např. metoda MIG, případně metody se sníženým tepelným příkonem), parametry svařování a zejména předehřev [14].

Obecně při svařování vytvrditelných Al slitin nastává ještě další, velmi závažný problém, kdy v tepelně ovlivněné oblasti dochází při svařování k rozpouštění vytvrzující fáze, a tím *k výraznému poklesu hodnot mechanických vlastností* a snížení odolnosti proti korozi. Vytvrditelné slitiny Al jsou velmi citlivé na ohřev. Tyto materiály svařované ve vytvrzeném stavu, vykazují v celém svarovém spoji výrazný pokles pevnosti velmi často až na úroveň pevnosti žíhaného materiálu. Při svařování je ZM ohřát až na teplotu tavení. V celé tepelně ovlivněné oblasti (TOO) ohřáté nad teplotu 200 °C probíhají dále precipitační děje a podle výšky teploty se mění pevnost a tvrdost svařovaného materiálu. V TOO v pásmu přehřátí je pevnost a tvrdost nejmenší – odpovídá pevnosti a tvrdosti žíhaného ZM.

Výsledný pokles pevnosti je závislý na době působení tepoty nad 200 °C. Jediné efektivní řešení tohoto problému je např. u slitin Al-Cu-Mg (řada 2xxx) opětovné tepelné zpracování svařené součásti (vytvrzení). U přirozeně stárnoucích Al slitin typu Al-Zn-Mg (7xxx) dojde k "samovytvrzení" a do cca 90 dnů k návratu pevnosti na původní hodnoty. Podle zkušeností z praxe i výzkumu, však např. u slitin typu Al-Mg-Si (6xxx) nevede dodatečné tepelné zpracování k výraznému zlepšení mechanických vlastností a proto se z ekonomických důvodů nedoporučuje aplikovat [15, 16, 17]. Toto je jeden z největších problémů při svařování těchto slitin. Proto je třeba nalézt parametry a tepelný režim svařování, který povede k co nejmenší degradaci mechanických vlastností.

Rozdělení a volba přídavných materiálů pro svařování Al a jeho slitin

PM pro svařování hliníku a jeho slitin metodou MIG se dodávají ve formě drátů o průměru 0,6 – 2,4 mm (nejpoužívanější průměry jsou 1,2 mm) navinutých na cívkách (standardně o hmotnosti 7 kg), případně dodávaných z velkokapacitních sudových zásobníků. Dráty mají speciální povrchovou úpravu zvyšující tvrdost povrchu. Tím je zajištěno spolehlivé podávání pomocí kladkových podavačů (které by měly být vybaveny kladkami s půlkruhovými drážkami). Vysoké požadavky jsou kladeny na přesné dodržení hodnoty průměru drátu, aby byl drát spolehlivě napájen po celé délce napájecího průvlaku.

V tabulce 1 je uveden systém rozdělení PM do skupin podle normy ČSN EN 1011-4 (Svařování – Doporučení pro svařování kovových materiálů – Část 4: Obloukové svařování hliníku a slitin hliníku).

Typ PM (skupina)	Označení slitiny	Chemické složení	
1	1450	Al 99,5 Ti	
	1080A	A1 99,8	
3	3103	AlMn1	
4	4043 A	AlSi5	
	4046	AlSi10Mg	
	4047 A	AlSi12 (A)	
	4018	AlSi7Mg	
5	5249	AlMg2Mn0,8Zr	
	5754	AlMg3	
	5556	AlMg5,2Mn	
	5183	AlMg4,5Mn0,7(A)	
	5087	AlMg4,5MnZr	
	5356	AlMg5Cr(A)	

Tab. č. 1 – Rozdělení přídavných materiálů do skupin dle ČSN EN 1011-4

Pozn.: typová čísla (označení skupin) souhlasí s první číslicí v označení slitiny dle ČSN EN 573 (z této normy vychází i označení slitin PM

Popis nejčastěji používaných přídavných materiálů z Al slitin

PM typu *AlSi5* (obchodní označení je OK Autrod 4043 pro MIG svařování a OK Tigrod 4043 pro ruční TIG svařování) je jedním z nejvíce používaných drátů pro svařování Al slitin. Přídavek Si umožňuje lepší tavitelnost. SK není náchylný ke tvorbě trhlin a povrch svaru je lesklý a bez větších nerovností. Tento PM má největší tekutost, při které se dobře formuje svarová housenka, ale mechanické vlastnosti SK jsou nižší oproti dále uvedeným PM. PM je vhodný pro svařování slitin do 7% Si, pro nespecifikované Al slitiny a pro heterogenní spoje různě legovaných Al slitin. Dále i pro pájení a svařování plamenem s tavidlem. Tepelně se výsledný SK nezpracovává a nedoporučuje se pro svařence s potřebou povrchové úpravy (eloxováním).

PM typu *AlMg* např. AlMg5Cr (OK Autrod 5356, OK Tigrod 5356) se používá pro svařování Al slitin s obsahem Mg do 5 % a také pro svařování slitin odolných proti mořské vodě. Jedná se o nejpoužívanější typ PM s vysokou pevností SK ve smyku. ZM typu 5xxx s obsahem Mg větším než 3 % svařované tímto PM mohou být při pracovních teplotách vyšších než 65° C náchylné ke koroznímu praskání. SK se tepelně nezpracovává. PM typu AlMg4,5MnZr (OK Autrod 5087, OK Tigrod 5087) je vhodný pro svařování Al slitin s obsahem Mg do 5 % a slitin s požadavkem na vyšší pevnost (tam kde původně používaný drát typu AlMg5 poskytoval nižší pevnost). PM je vhodný pro svarové spoje komplikovaných konstrukcí s nepříznivým pnutím. Legování Zr zlepšuje odolnost proti trhlinám za tepla při tuhnutí svarového kovu a zjemňuje jeho strukturu. Při svařování uvedenými PM doporučují výrobci obvykle předehřev (150 až 200 °C) a dodržení interpass teploty (150 °C).

Návrh experimentu

Použité materiály

Protože význam Al slitin v průmyslu neustále vzrůstá, byl tento materiál zvolen i pro výzkum v oblasti použití metody WAAM na ČVUT v Praze, Fakultě strojní. Pro experimenty byly zvoleny jedny z nejčastěji používaných Al slitin, které se používají pro svařování, tzn. PM ve formě svařovacího drátu ze slitiny AlMg4,5MnZr (EN AW 5087) o průměru 1,2 mm. Dále byly použity podkladové desky ze slitiny AlMg4,5Mn0,7 (EN AW 5083) o rozměrech 100×200×4 mm. Tato slitina se vyznačuje vyšší pevností v tahu a legující prvek zirkonium poskytuje zlepšené vlastnosti proti praskání za tepla při tuhnutí. Obě slitiny jsou klasifikovány jako středně pevné, tepelně nezpracovatelné (nevytvrditelné) a jejich pevnost

roste s rostoucím obsahem Mg [18]. Chemické složení podkladového plechu a svařovacího drátu je uvedeno v tabulce 2 [19].

Slitina/chemické složení	Al	Mg	Mn	Fe	Si	Zr	Cr	Zn	Ti	Cu
AlMg4.5Mn0.7	zbytek	4.34	0.63	0.13	0.076	-	0.064	0.035	0.055	0.032
AlMg4.5MnZr	zbytek	4.8	0.75	0.11	0.06	0.13	0.08	0.05	0.02	0.005

Tab. č. 2 – Chemické složení základního materiálu a přídavného navařovacího materiálu (v % hm.)

Použité zařízení a metoda navařování

V současné době dominují na trhu dobře integrovaných a manipulačních systémů komerční robotické systémy WAAM [20]. Použito bylo zařízení Laboratoře výuky svářečských technologií na ČVUT v Praze, kde pro metodu WAAM byl použit 6-osý robot Fanuc Arc Mate 100iC (s maximálním pracovním dosahem 1420 mm) v kombinaci s jednoosým polohovadlem se stavebnicovým pracovním stolem a svařovací zdroj Fronius Trans Pulse Synergic 3200 CMT.

Z publikovaných výzkumných prací [např. 7, 21, 22] Je zřejmé, že aplikace různých režimů procesu CMT může vést ke změně mikrostruktury a mechanických vlastností nanesených součástí. Vliv různých režimů není ještě plně prozkoumán. Proto se i tento příspěvek zabývá hodnocením vlivu tří režimů navařování na mikrostrukturu WAAM dílů a na jeho mechanické vlastnosti.

V první fázi experimentu byly navařovány jednoduché podélné stěny s různými režimy navařování CMT (C), CMT – Pulse (C+P) a CMT – Cycle Step (CS), které byly vyrobeny za účelem zkoumání mikrostruktury a mechanických vlastností.



Obr. 1 – Experimentální robotické pracoviště pro metodu WAAM

Na obrázku 2 jsou zaznamenány průběhy svařovacího proudu a napětí na oblouku pro použité procesy navařování, které byly zmonitorovány systémem Weldmonitor 4.5.



Obr. 2 – průběhy proudu a napětí pro jednotlivé varianty – C, C+P, CS

C (CMT) - jedná se o modifikovaný proces svařování, kde má průběh proudu i napětí složitější charakter (viz obrázek 2 nahoře). Je vidět, že fáze zkratu je velmi krátká a ihned (cca po 0,0015 ms) je nahrazena hodnotou napětí o velikosti cca 10V (11,9), než vystoupí na svou pracovní hodnotu (cca 28-30 V) – v tu chvíli stoupá svařovací proud na maximální hodnotu, přičemž při max. hodnotě napětí má proud velikost o cca 100 A nižší. Hlavními přednostmi tohoto procesu je vznik velmi malého množství tepla a mimořádně stabilní oblouk.

Varianta C + P, kombinuje zmíněný proces (C) s navařování pulzním el. obloukem. Touto cestou můžeme ovlivňovat tepelné zatížení, velikost průvaru a geometrii svaru v pásmu mezi "studeným" modifikovaným procesem MIG svařování a relativně "horkým" pulzním MIG obloukem (viz obrázek 2 uprostřed).

U varianty CS (CMT Cycle Step) probíhá cyklické střídání svařování modifikovaným MIG procesem (C) a prodlev s nastavitelnou dobou jejich trvání. Díky prodlevám se snižuje vnos tepla, kontinuita svarového švu zůstává zachována. Proces je vhodný na přesné navařování struktur – v podstatě dochází k bodovému odtavování jednotlivých kapek. Průběh proudu má v podstatě pulsní

charakter, kdy v jednotlivých "pulsních cyklech" (dlouhých cca 0,15 ms) dochází ještě k pulzaci, která je zobrazena na detailním průběhu na obrázku 2 – dole.

Použité podmínky a parametry procesu navařování

Jako ochranný plyn při provádění návarů byl použit Ar 4.6 (čistota 99,996 %) s konstantním průtokem 18 l/min. Vzhledem k tomu, že tloušťka podkladového plechu byla 4 mm, neprovádělo se předehřívání materiálu. Pracovní vzdálenost hořáku od ZM (resp. návaru) byla nastavena na 15 mm. Pro udržení stabilního procesu a výrobu součásti v nejlepší kvalitě byly parametry navařování nastaveny tak, jak je uvedeno v tabulce číslo 3. Aby se zabránilo vytvoření zvýšeného množství nanesené vrstvy na začátku a snížení konce návarové housenky, byla použita strategie střídání směrů při navařování jednotlivých vrstev.

Když na sebe bylo naneseno větší množství vrstev, byl pozorován malý rozdíl ve výšce buď na začátku, nebo na konci navařovaného dílu. Proto bylo postupné navařování vrstev realizováno s časovým odstupem 120 s (k dostatečnému ochlazení návaru).

Parametry navařování uvedené v tabulce 3 byly odvozeny s ohledem na náchylnost k tvorbě trhlin a na základě zjištěných mechanických vlastností. Za takových podmínek bylo při navařování stěn dosaženo návarů bez trhlin s dobrou kombinací pevnosti v tahu a celkového prodloužení (tažnosti).

Varianta navařování	Svařovací proud (A)	Napětí na oblouku (V)	Rychlost navařovaní (cm/min)	Rychlost podávání PM (m/min)				
С	85	12,6	40	5,0				
C+P	86	16,7	40	4,3				
CS	80	-	40	5,5				

Tab. 3 - Parametry použité pro všechny tři varianty modifikovaného MIG navařování

Metody hodnocení kvality návarů

Kvalita návarů byla posouzena vizuální zkouškou a metalografickými analýzami – zkouškou a makro a mikrostruktury, včetně kontroly geometrických parametrů návarů. Mechanické vlastnosti návarů byly ověřeny tahovou zkouškou, podle normy EN ISO 6892-1. Celkem bylo pro zkoušku tahem připraveno 18 vzorků. 9 z nich ve vertikálním směru a 9 ve vodorovném směru (z hlediska tvorby návaru). Testy byly provedeny na elektromechanickém univerzálním zkušebním stroji LaborTech typ LabTest 5.100 SP1-VM v mechanické zkušebně Ústavu strojírenské technologie. Maximální zatížení stroje je 100 kN. Pevnost v tahu byla získána z průměru tří zkušebních hodnot, na základě kterých byla vypočtena standardní odchylka pro účely analýzy. Pevnostní zkušební těleso s příslušnými rozměry (v mm) je uvedeno na obrázku 3. Vzorek pro tahovou zkoušku byl připraven frézováním.



Obr. 3 – Schématické znázornění rozměrů vzorků pro zkoušku pevnosti v tahu

Deformace byly měřeny pomocí bezkontaktního optického systému GOM ARAMIS 4M na čočkách Titanar 100 mm. Tento systém funguje na principu digitální korelace obrazu. Rozlišení tohoto kamerového systému je 2358×1728 pixelů.

Diskuze výsledků

Makroskopická analýza

Byl hodnocen povrch návaru, geometrie, vady a integrita. Na stěně vyrobené v režimu CS byl pozorován zvlněný povrch boční stěny s relativně jednotným horním okrajem (obrázek 6 vpravo).; Hloubka průvaru první návarové housenky do podkladového plechu byla největší ze všech režimů, až 3,52 mm (obrázek 6 vlevo). V porovnání s průvarem dosaženým režimem C (obrázek 4 vlevo) je v případě CS 3,86krát vyšší. Byl sledován vliv jednotlivých režimů na výškový rozdíl. Rozdíl mezi nejnižším a nejvyšším bodem stěny vytvořené pomocí C+P byl pouze 2,96 mm (obrázek 5). Největší výškový rozdíl byl zaznamenán v režimu C, kdy rozdíl mezi nejnižším a nejvyšším bodem stěny byl až 4,1 mm. Nejlepší byla rovnoměrnost délky stěny provedené v režimu C. Zaznamenaný rozdíl v délce (obrázek 5 vpravo) byl pouze 2,9 mm oproti metodě CS (obrázek 6 vpravo), kde byl rozdíl až 9,16 mm [23].



Obr. 4 - Příčný řez návaru – varianta C (vlevo), celkový pohled na návar vyrobený variantou "C", včetně určení geometrických charakteristik



Obr. 4 - Příčný řez návaru – varianta C+P (vlevo), celkový pohled na návar vyrobený variantou "C+P", včetně určení geometrických charakteristik



Obr. 6 - Příčný řez návaru – varianta CS (vlevo), celkový pohled na návar vyrobený variantou "CS", včetně určení geometrických charakteristik

Mikroskopická strukturní analýza

Mikrostruktura lineárních návarových stěn, vyrobených různými režimy modifikovaného MIG proceseu, technologií WAAM je uvedena na obrázku 7. U stěn vytvořených třemi různými režimy nebyl pozorován vznik trhlin. Mikrostruktura se skládá z dendritické struktury tvořené tuhým roztokem hliníku, přičemž mezidendritická místa jsou obohacena o legující prvky. Ve stěnách vyrobených různými způsoby svařování byla pozorována malá kruhová pórovitost. To lze přičíst přítomnosti vodíku. Jak je známo, rozpustnost vodíku je mnohem vyšší v kapalném hliníku ve srovnání s pevným hliníkem. Při teplotě tavení má obrovský rozdíl v rozpustnosti vodíku za následek vznik pórovitosti [24]. Souvislost s obsahem vodíku a množstvím pórů u jednotlivých návarů je v současné době ještě předmětem dalšího zkoumání.



Obr. 7 – Mikrostruktura WAAM návarů u jednotlivých variant – C, C+P, CS

Pevnost v tahu

Vliv režimu navařování na pevnost v tahu je uveden na obrázku 8. Pevnost v tahu horizontálních vzorků byla vyšší než u vzorků odříznutých ve vertikálním směru. Maximální pevnost v tahu byla měřena v případě horizontálního vzorku vyrobeného pomocí WAAM variantou C. Mírně nižší pevnost v tahu byla naměřena u vzorků vyrobených WAAM variantou C+P (vzorky v horizontálním směru). Nejnižší horizontální pevnost v tahu byla zaznamenána v případě navařené stěny variantou CS.

Průměrná pevnost v tahu pro horizontální vzorky byla 299,78 MPa. Představuje zvýšení pevnosti v tahu přibližně o 3,3 % ve srovnání se vzorky vyrobenými ve vertikálním směru. Je to důsledkem konzistence navařovacích vrstev. Vertikální vzorky jsou tvořeny několika průchody jednotlivými vrstvami. Na druhé straně horizontální vzorky vznikají kontinuálním nanášením roztaveného kovu. Když je na tahový vzorek vyvíjeno zatížení v horizontálním směru, hranice zrn brání posunu dislokace. Také oblast mezivrstev nanášecích vrstev představuje ideální místo pro výskyt vad, což je slabá poloha v rámci mechanických vlastností součástí. Menší rozdíly mezi horizontálními a vertikálními vzorky v případě variant C (≈1,66 MPa) a CS (≈5,34 MPa) charakterizují menší anizotropii procesu. Vyšší tepelný příkon v případě C+P způsobil růst větších zrn, tj. menší hustotu hranic zrn ve vertikálním směru, kde dojde ke snížení pevnosti v tahu.



Obr. 8 - Horizontální a vertikální pevnost v tahu pro tři režimy navařování – C, C+P, CS [24]

Z důvodu vyšší přesnosti měření byly pro analýzu DIC (Digital Image Correlation) použity 2 kamery, které byly od sebe vzdáleny 274 mm. Kamery byly vůči sobě v úhlu 24,7°. Vzdálenost kamer od vzorku snímaného povrchu pro tahovou zkoušku byla 681 mm. Vzhledem k tomu, že při měření byly použity dvě kamery, byla hloubka ostrosti zvýšena o 40 mm, což usnadnilo nastavení kamerového systému před zahájením měření. Takto nastavený kamerový systém byl schopen sledovat plochu 65×48 mm, což bylo dostačující pro měření tahových vzorků. Odchylka kalibrace byla pouze 0,023 pixelu z povolených 0,050 pixelů. Hodnota odchylky měřítka byla také pod možnou hranicí 0,005 mm, což bylo 0,004 mm. Obrázek 9 znázorňuje obrysový graf měřeného přetvoření při zatížení tahem.





Obr. 9 - Zobrazení metody DIC při aplikovaném tahovém zatížení: a) C; b) C+P; c) CS - vlevo Obr. 10 - Pracovní diagram (závislost napětí-deformace) pro navařené stěny vyrobené ve třech režimech - C, C+P a CS (ukázka pro vertikální směr) – vpravo

Byly hodnoceny tahové vlastnosti v závislosti na celkovém prodloužení vzorků (obrázek 10). Všechny křivky napětí-deformace lze hodnotit jako velmi podobné. Ze tří navařovacích režimů vykazovala varianta CS nejvyšší prodloužení, až 0,15548. Je to o 49 % vyšší hodnota prodloužení ve srovnání s jinými režimy. varianta C s nejmenší hodnotou prodloužení (0,10435) vedla k nejvyšší hodnotě pevnosti v tahu, až 298 MPa. To je o 2,69 % více ve srovnání s variantou C+P. Pevnost v tahu nesvařovaného základního kovu je 290 MPa. Účinnost navařování je poměr mezi pevností v tahu překrytého svarového spoje a pevností v tahu nesvařeného základního materiálu [25]. Největší účinnost, 1,02 %, představuje varianta "C".

Závěr

Tento příspěvek popisuje možnost použití metody WAAM pro navařování Al slitiny AlMg4,5MnZr (EN AW 5087) a vliv různých režimů modifikovaných procesů MIG navařování (režimu CMT) na mikrostrukturu a mechanické vlastnosti.

Klíčové závěry vyvozené z výzkumných prací jsou následující:

- Nebyl pozorován žádný vznik trhlin na návarech lineárních stěn, vytvořených třemi různými režimy modifikovaného obloukového procesu navařování
- Mikrostruktura se skládá z dendritické struktury tvořené tuhým roztokem hliníku, přičemž mezidendritická místa jsou obohacena o legující prvky.
- Pevnost v tahu horizontálních vzorků byla vyšší ve srovnání se vzorky odříznutými ve vertikálním směru.
- Nejnižší horizontální pevnost v tahu byla zaznamenána v případě navařené stěny variantou CS (Cycle Step).

Poděkování

Tento výzkum vznikl za přispění MŠMT v rámci postdoc projektu realizovaného na FS, ČVUT v Praze a v rámci řešení projektu SGS22/155/OHK2/3T/12 s názvem "Aditivní technologie a simulační procesy v oblasti strojírenské technologie".

Použité literární zdroje

- [1] Chen, J.: Hybrid design based on wire and arc additive manufacturing in the aircraft industry, Thesis, Cranfield university, 2012
- [2] Kolařík, L.; Kovanda, K.; Gurčík, T.: Robotické navařování metodou WAAM jako alternativa k 3D tisku kovových materiálů. XXXIV. DST sborník přednášek, DT Pardubice, 2019

[3] Kolařík, L. Technologie additive manufacturing pomocí konvenčních i speciálních metod navařování WAAM - Wire + Arc Additive Manufacture, Interní podklady projektu RPMT 2016, ČVUT v Praze

- [4] Chen, X.; Su, C.; Wang, Y.; Siddiquee, A.N.; Sergey, K.; Jayalakshmi, S.; Singh, R.A. Cold Metal Transfer (CMT) Based Wire and Arc Additive Manufacture (WAAM) System. *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques* 2018, 12, 1278–1284, doi:10.1134/S102745101901004X.
- [5] Kah, P. Chapter 1 Gas Metal Arc Welding. In Advancements in Intelligent Gas Metal Arc Welding Systems; Kah, P., Ed.; Elsevier, 2021; pp. 1–103 ISBN 978-0-12-823905-6.
- [6] Furukawa, K. New CMT Arc Welding Process Welding of Steel to Aluminium Dissimilar Metals and Welding of Super-Thin Aluminium Sheets. *Welding International* 2006, *20*, 440–445, doi:10.1533/wint.2006.3598.
- [7] Votruba, V.; Diviš, I.; Pilsová, L.; Zeman, P.; Beránek, L.; Horváth, J.; Smolík, J. Experimental Investigation of CMT Discontinuous Wire Arc Additive Manufacturing of Inconel 625. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2022, *122*, 711–727, doi:10.1007/s00170-022-09878-7.
- [8] Beneš, L., Kysilka, O.: Problematika vzniku a eliminace defektů při svařování slitin hliníku v konstrukci kolejových vozidel, XXVII.DST – sborník přednášek, DT Pardubice, 2005
- [9] Kolařík, L., Kolaříková, M., Kovanda, K., Vondrouš, P.: Svařování hliníku v ochranných atmosférách,

MM Průmyslové Spektrum, 2013, roč. 2013, č. 4, s.13- 15 ISSN 1212-2572.

- [10] Kolařík, L.; Kovanda, K. Svařitelnost hliníkových slitin I. In: MM Průmyslové spektrum. 2011, roč. 2011, č. 4, s.18-19. ISSN 1212-2572.
- [11] Zmydlený, T.: Trhliny při svařování hliníkových slitin řady 6000 a 7000, SDSM 3/2004, Praha, 2004, 31-33
- [12] Kopřiva, J. Plyny pro svařování: Linde Gas. Praha, 2011. Podklady pro kurz IWE/IWT. ČVUT v Praze, Fakulta strojní.
- [13] Mathers, G.: The Welding of Aluminium and its Alloys, Woodhead Publishing, Cambridge, 2002
- [14] Krüger, U. Talat Lecture 4202: Weldability. European Aluminium Association, 1994 [Online]
 [Citace: 19. 6. 2011.] Dostupné z WWW: http://www.scribd.com/doc/21294420/TALAT-Lecture-4202-Weldability
- [15] Kolařík, L.; Dunovský, J.; Válová, M.; Růžička, D. Mechanical Properties of Weld Joins of Al Alloy EN AW 6005 after TIG Welding. In: ERIN 2008. Bratislava: Slovak University of Technology, 2008, p. II-17. ISBN 978-80-227-2849- 2.
- [16] Janovec, J.; Kolařík, L.; Válová, M.; Filipec, R.; Dunovský, J. Změna struktury svarových spojů slitin hliníku typu EN AW 6082 po několikanásobném tepelném ovlivnění svařovacím cyklem. In: Přínos metalografie pro řešení výrobních problémů. Praha: ČVUT v Praze - FS, 2008, s. 250-256. ISBN 978-80-01-04039-3.
- [17] Kovanda, K., Kolařík, L.: Vliv speciálních funkcí moderních svařovacích zdrojů na čistící účinek elektrického oblouku, Sborník příspěvků konference Technologické fórum 2010. Praha: ČVUT FS, UST 2010. ISBN 978-80-01-04586-2.
- [18] Huang, C.; Wu, Z.; Huang, R.; Wang, W.; Li, L. Mechanical Properties of AA5083 in Different Tempers at Low Temperatures. In Proceedings of the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering; Institute of Physics Publishing, December 30 2017; Vol. 279.
- [19] Liao, Z.; Yang, B.; James, M.N.; Li, J.; Xiao, S.; Wu, S. Evaluation of in Situ Hot-Rolling Forming Effect on Plastic Zone of Wire + Arc Additively Manufactured 5087 Alloys Using Digital Image Correlation Technique. *Int J Fatigue* 2022, *165*, 107189, doi:https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.107189.
- [20] Singh, S.R.; Khanna, P. Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM): A New Process to Shape Engineering Materials. *Mater Today Proc* 2021, 44, 118–128, doi:https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.030.
- [21] CMT CYCLE STEP, A NEW WELDING PROCESS VARIANT. *PERFECT WELDING* 2020. https://www.fronius.com/en/welding-technology/info-centre/magazine/2019/cmt-cycle-step
- [22] Peng, M.; Liu, H.; Liang, Y.; Xu, W.; Zhao, Y.; Chen, S.; Weng, J.; Yang, J. CMT Welding-Brazing of al/Steel Dissimilar Materials Using Cycle-Step Mode. *Journal of Materials Research and Technology* 2022, *18*, 1267–1280, doi:https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.03.043.
- [23] Pavlík, M.; Sahul, M.; Sahul. M.; Novák, V. Influence of CMT overlay welding mode on the microstructure and mechanical properties of 5087 aluminium alloy fabricated by Wire and Arc Additive Manufacturing, THE 76th IIW ANNUAL ASSEMBLY AND INTERNATIONAL CONFERENCE ON WELDING AND JOINING, 2023
- [24] Pan Jiangang, Yuan Bo, Ge Jinguo, Ren yu, Chen hongjun, Zhang Liang, Lu Hao, Influence of arc mode on the microstructure and mechanical properties of 5356 aluminum alloy fabricated by wire arc additive manufacturing, *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 20, 2022, p. 1893-1907, ISSN 2238-7854, https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.08.005
- [25] Lakshminarayanan, A.K.; Balasubramanian, V.; Elangovan, K. Effect of Welding Processes on Tensile Properties of AA6061 Aluminium Alloy Joints. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2009, 40, 286–296, doi:10.1007/s00170-007-1325-0.