

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

VIZUALIZACE A ZMAPOVÁNÍ DĚJŮ PŘI MAG
SVAŘOVÁNÍ

VISUALIZATION AND MAPPING
OF PROCESSES DURING MAG WELDING

Autor: Jakub Karmáček

Studijní obor: Výroba a ekonomika ve strojírenství

Vedoucí práce: Ing. Pavel Rohan, Ph. D.

2021

Zadání



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Karmáček** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **473446**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Vizualizace a zmapování dějů při MAG svařování

Název bakalářské práce anglicky:

Visualization and mapping of processes during MAG welding

Pokyny pro vypracování:

Provést literární rešerši způsobů svařování v ochranných atmosférách ze zaměřením na svařování MAG modifikovanou vlnou. Provést literární rešerši na téma vizualizace obloukových metod svařování. Seznámit se se základy fotografie a pořizování video záznamů - ohnisko objektivu, světelnost, citlivost, rozlišení, hyperfokální vzdálenost, hloubka ostrosti, základy kompozice obrazu, osvětlení scény.

Seznam doporučené literatury:

Kah, Paul. 'Welding of Sheet metal using Modified short arc MIG/MAG welding process.' (2007).
Mvola, B., Kah, P. & Layus, P. Review of current waveform control effects on weld geometry in gas metal arc welding process. Int J Adv Manuf Technol 96, 4243–4265 (2018)
Dreher, M., Füssel, U., Rose, S. et al. Methods and results concerning the shielding gas flow in GMAW. Weld World 57, 391–410 (2013)
Ratto, Hernan, Visualisation study of metal transfer in gas metal arc welding (GMAW), Master of Engineering (Hons.) thesis, Department of Mechanical Engineering, University of Wollongong, 1996
<https://www.paladix.cz/sekce/praxe/zaklady/>, <https://www.fotoradce.cz/krajinarska-fotografie-hyperfokalni-vzdalenost>

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Pavel Rohan, Ph.D., ústav strojírenské technologie FS

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

Datum zadání bakalářské práce: **15.04.2021** Termín odevzdání bakalářské práce: **06.08.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2021**

Ing. Pavel Rohan, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

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

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

_____ Datum převzetí zadání

_____ Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval samostatně a v seznamu uvedl veškerou použitou literaturu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne:

.....

Podpis

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá vizualizací svařování metodou MAG a svařování modifikovanou vlnou. Mapuje děje, které jsou při svařování přítomny. Cíle práce jsou navrhnout a sestavit pracoviště pro vizualizaci rychlostních dějů při svařování, vizualizovat a zmapovat zkratový přenos a svařování modifikovanou vlnou. Výstup práce je zhodnocení výsledků a porovnání zkratového přenosu a metody IAC pomocí pořízených záznamů.

Klíčová slova

MAG svařování, modifikovaná vlna, vizualizace MAG svařování, metoda stínů, vysokorychlostní kamera, pulsní laser, zkratový přenos, IAC.

Abstract

The bachelor thesis deals with the visualization of MAG welding and modified wave welding. Maps the events that are present during welding. The goals of the work are to design and assemble a workplace for visualization of speed processes during welding, visualization and map of short-circuit transfer and modified short arc welding process. The output of the work is the evaluation of results and comparison of short-circuit transfer and IAC method using the obtained records.

Keywords

MAG welding, modified short arc welding process, MAG welding visualization, shadowgraphy, high-speed camera, pulsed laser, short-circuit transfer, IAC.

Poděkování

Chtěl bych poděkovat mému vedoucímu panu Ing. Pavlu Rohanovi, Ph. D. za cenné rady při psaní práce, za pomoc při sestavování pracoviště a provádění měření. Dále bych mu chtěl poděkovat za čas a trpělivost, kterou se mnou měl.

Seznam zkratek

MAG	Metal Active Gas
IAC	Intelligent Arc Control
GMAW	Gas Metal Arc Welding
MIG	Metal Inert Gas
STT	Surface Tension Transfer
CMT	Cold Metal Transfer
TIG	Tungsten Inert Gas
fps	frames per second
ND	Neutral Density
HDR	High Dynamic Range
IGC	Intelligent Gas Control
WFS	Wire Feed Speed
TS	Travel Speed

Obsah

1	Úvod.....	7
2	Teoretická část	8
2.1	Svařování metodou MAG	8
2.1.1	Zařazení	8
2.1.2	Princip.....	9
2.1.3	Výhody MAG svařování	9
2.1.4	Nevýhody MAG svařování.....	10
2.2	Typy přenosu svarového kovu	10
2.2.1	Zkratový přenos	11
2.2.2	Kapkový přenos	12
2.2.3	Sprchový přenos	12
2.2.4	Impulsní přenos	13
2.2.5	Přenos rotujícím obloukem.....	14
2.3	Způsoby svařování modifikovanou vlnou.....	15
2.3.1	Surface Tension Transfer	15
2.3.2	Cold Metal Transfer	18
2.3.3	Intelligent Arc Control	19
2.4	Vizualizace svařování	22
2.4.1	Vývoj vysokorychlostního zobrazování	22
2.4.2	Techniky vizualizace	23
3	Experimentální část	26
3.1	Použité přístroje a zařízení	26
3.1.1	Vysokorychlostní kamera.....	26
3.1.2	Laser	28
3.1.3	Svařovací zdroj	31
3.1.4	Svařovací traktor	32
3.2	Uspořádání pracoviště	33
3.3	Rozvržení experimentu	36
3.3.1	Navržení parametrů svařování.....	36
3.3.2	Navržení osvětlení, snímkové frekvence, clon, filtrů.....	39

4	Výsledky a diskuse.....	41
4.1	Zkratový přenos	41
4.2	Přenos IAC	48
5	Závěr	52
	Seznam citované literatury	53
	Seznam obrázků	56
	Seznam tabulek	59

1 Úvod

V dnešním světě je MAG svařování metodou, která je v technické praxi považována za nejrozšířenější. Zastoupena je prakticky ve všech odvětvích průmyslu, kde se svařování používá.

Současný výzkum se zabývá v mnoha případech vizualizací procesů svařování. Vizualizace svařování je obecně komplikovaná. Je to zapříčiněno rychlostí samotného procesu a intenzitou vyzařovaného světla. Nejčastěji se v současné době používá metoda stínů.

Teoretická část práce se věnuje stručnému popisu svařovací metody MAG, u které bude měření probíhat. Dále charakterizuje, jakými způsoby probíhá u metody MAG přenos kovu do svarové lázně. Rozebírá metody, kde dochází k sníženému přenosu tepla. V poslední řadě popisuje historii pořizování vysokorychlostního záznamu a princip vizualizace svařování.

Experimentální část práce vizualizuje a mapuje svařovací proces MAG při různých parametrech zkratového přenosu. Pro porovnání dějů při zkratovém přenosu a svařování modifikovanou vlnou byla zvolena metoda svařování IAC zastupující metody s menším množstvím vneseného tepla, která je též zmapována.

2 Teoretická část

2.1 Svařování metodou MAG

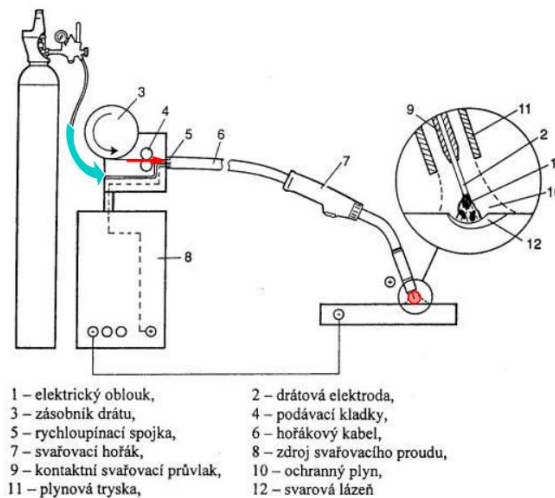
Metoda MAG patří do metod svařování elektrickým obloukem v ochranných atmosférách. Značení MAG je zkratka pro metal active gas, což znamená, že se v ochranné atmosféře používají tzv. aktivní plyny. Plyny se aktivně zapojují do reakcí při svařování a napomáhají tím pádem k vytvoření svarového kovu. Kromě značení MAG se metoda může značit i jinak. Česká norma ČSN EN ISO 4063 značí MAG číslicí 135. V americkém značení se používá značka GMAW (gas metal arc welding). MAG je v současnosti považován společně s metodou MIG za světově nejpoužívanější [1].

2.1.1 Zařazení

Metoda MAG patří mezi tavné způsoby obloukového svařování. Mezi tavné svařování patří, jelikož dochází ke spojení materiálů roztavením. V obloukových metodách je zařazena proto, že teplo potřebné k roztavení materiálů je generováno hořením elektrického oblouku mezi elektrodou a základním materiálem. U metody MAG se elektroda odtavuje. Elektrický oblouk a celý proces svařování je ochráněn aktivními ochrannými plyny. Plyny jsou dodávány externě a slouží hlavně k ochraně před okolním prostředím [2].

2.1.2 Princip

Při svařování metodou MAG hoří elektrický oblouk mezi elektrodou, kterou je nejčastěji holý kovový drát, a základním materiálem. Oblouk vzniká díky vnějšímu zdroji svařovacího proudu. Základní materiál má nejčastěji záporný náboj a drát v hořáku náboj kladný. Drát je podáván do hořáku ze zásobníku pomocí systému podávacích kladek. Svařování probíhá ve směsi aktivních plynů (směs na základě argonu nebo oxidu uhličitého). Plyn přichází do hořáku z tlakové lahve nebo z rozvodu plynů. Výsledné schéma je vidět na obrázku 1 [2, 3].



Obrázek 1 Princip svařování MAG [2]

2.1.3 Výhody MAG svařování

Jako první se uvádí její univerzálnost. Lze s ní svařovat ve všech polohách. Další nespornou výhodou je možnost nepřetržitého podávání drátu, který je podáván kladkami. Existují zásobníky, které mohou obsahovat až 250 kg drátu. Nemusí se zde vyměňovat často elektrody, jedná se o poloautomatický proces. Tento fakt ušetří mnoho času, takže tato metoda je považována za velmi efektivní [3, 4].

Další výhodou je, že na jeden milimetr čtvereční průřezu elektrody je možné dosáhnout vysoké proudové hustoty. To je zapříčiněno tím, že elektrický proud je doveden na drát prakticky až těsně před odtavovanou částí, takže zatížení na elektrodu působí jen na velmi malém úseku [3, 4].

Velmi významnou výhodou je možnost využít velký rozsah parametrů na jeden průměr elektrody. Mezi další výhody patří vysoká rychlost svařování, vyšší výkon

odtavení elektrody, snadné zapalování oblouku při začátku svařování, dobrá viditelnost oblouku a svarové lázně [3, 4].

Samotné svařování není manuálně náročné a je velmi snadné na naučení. Automatizace a robotizace je v porovnání s ostatními metodami snazší [3, 4].

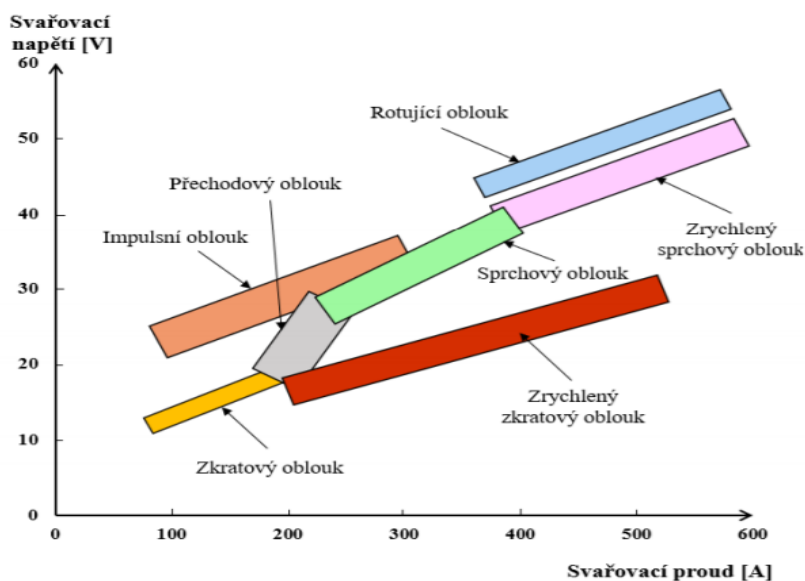
2.1.4 Nevýhody MAG svařování

Svařování metodou MAG má velmi málo nevýhod. Za nevýhodu je brána vysoká intenzita vyzářeného tepla a světla do okolí. Za další nevýhodu může být považováno automatické podávání přídavného materiálu, které může být při zahájení procesu svařování problematické. Když dochází k nepřetržitému podávání, drát může být podáván i v případech, kdy je nutné zpomalení svařování. Další nevýhoda je nevyhovující deformace základního materiálu. Poslední nevýhodou je menší použitelnost metody MAG při svařování ve venkovních prostorách, kde se častěji používají při svařování obalené elektrody. Metoda MAG je častěji využita v dílenských podmínkách [3, 4].

2.2 Typy přenosu svarového kovu

Jelikož metoda MAG patří do skupiny svařování elektrickým obloukem a děje při MAG svařování mohou být ovlivněny způsobem přenosu kovu, tak v této části budou popsány základní typy přenosu kovu při svařování elektrickým obloukem. Děje při přenosu kovu do tavné lázně lze rozdělit do několika etap. Patří mezi ně odtavení materiálu z elektrody, poté přesun materiálu přes oblouk do svarové lázně. Jak bude přenos kovu probíhat je podmíněno mnoha faktory. Nejzásadnější roli zde hrají svařovací proud a svařovací napětí, dále také složení použitého ochranného plynu, přídavný materiál nebo technika prováděného svařování [5, 6, 7, 8].

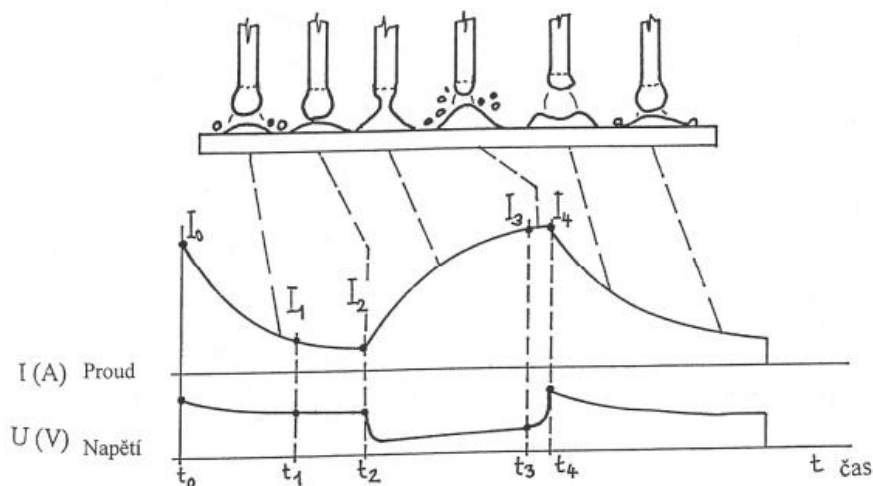
Z druhého úhlu pohledu to, jaký je přenos kovu, má vliv na výsledek svařování. Přenos kovu ovlivňuje kvalitu svaru. Parametry přenosu je ovlivněn tvar housenky. Zásadní vliv má přenos na stabilitu elektrického oblouku a také na mechanické vlastnosti výsledného svarového spoje [5, 6, 7, 8].



Obrázek 2 Schéma přenosu svarového kovu [3]

2.2.1 Zkratový přenos

Tento typ přenosu je typický pro nižší parametry svařovacího proudu i svařovacího napětí (obrázek 2). U proudu se pohybují hodnoty do zhruba 180 A. U napětí jsou mezi 14 a 22 V. Svařování zkratovým přenosem probíhá následovně (obrázek 3) [8].



Obrázek 3 Schéma zkratového přenosu [3]

V čase t_0 se začíná odtavovat kov. Natavování pokračuje do chvíle, kdy se odtavující se kapka dotkne základního materiálu (t_2 – obrázek 3). V tu chvíli zanikne elektrický oblouk (zhasnutí), napětí je nulové, proud dosahuje vysokých hodnot a dojde ke zkratu. Poté dochází k tzv. pinch efektu, kdy se kapka zaškrtní a oddělí se do svarové lázně. Pinch efekt je působení tlaku v radiálním směru. Tlak je vytvořený

magnetickým polem. V tu chvíli vroste napětí, sníží se proud, znovu se zapálí elektrický oblouk a celý proces se opakuje. K opakování může takto docházet i několiksetkrát za sekundu (například 200krát) [2, 5, 6, 7, 8, 9].

Zkratový přenos má svůj charakteristický praskavý zvuk, což je způsobeno opětovným zapalováním elektrického oblouku. Podle zvuku a vzhledu oblouku se dají upravit parametry svařování tak, aby byl přenos stabilní. Jako příklad se uvádí nepravidelný praskavý zvuk, kde se nalézá řešení ve snížení rychlosti posuvu drátu nebo zvýšení napětí [6, 7].

Zkratový přenos je charakteristický nižší hodnotou vneseného tepla. Také při jeho použití dochází k nižší deformaci. Lze jej provádět u všech typů aktivních ochranných plynů. Jeho typické použití je u tenkých plechů [6, 7].

2.2.2 Kapkový přenos

Kapkový přenos je jinak řečeno přenos přechodným obloukem s nepravidelnými zkraty. Kapkový přenos vzniká, viz obrázek 2, za vyšších hodnot proudu a napětí než přenos zkratový. Interval svařovacího napětí se pohybuje v rozmezí mezi 22 až 28 V a svařovací proud se pohybuje okolo 190 až 300 A [5, 6, 7, 8, 9].

Vyšší hodnoty napětí, což znamená i větší délku oblouku, neumožní vytvoření zkratu. Při nižších hodnotách proudu bude na kapky odtavovaného kovu působit nejvíce gravitační síla a bude napomáhat k oddělování malých kapiček z elektrody do svarové lázně. Kapičky jsou většinou menší než průměr elektrody a s rostoucím proudem se jejich velikost zmenšuje a zvyšuje se jejich počet. Počet kapek se pohybuje v desítkách za sekundu [5, 6, 7, 8, 9].

Tento typ přenosu nachází uplatnění při svařování za použití větších průměrů elektrody. Používá se hlavně při svařování, kde je jako ochranný plyn použita směs s přídavkem oxidu uhličitého. Obecně se ale moc nepoužívá, jelikož způsobuje větší rozstřík než například zkratový přenos a větší rozstřík je u svařování nežádoucí [5, 6, 7, 8, 9].

2.2.3 Sprchový přenos

Sprchový přenos vzniká zvýšením hodnoty svařovacího proudu a napětí z hodnot pro kapkový přenos. U tohoto přenosu již nedochází ke zkratům. Hodnoty používané

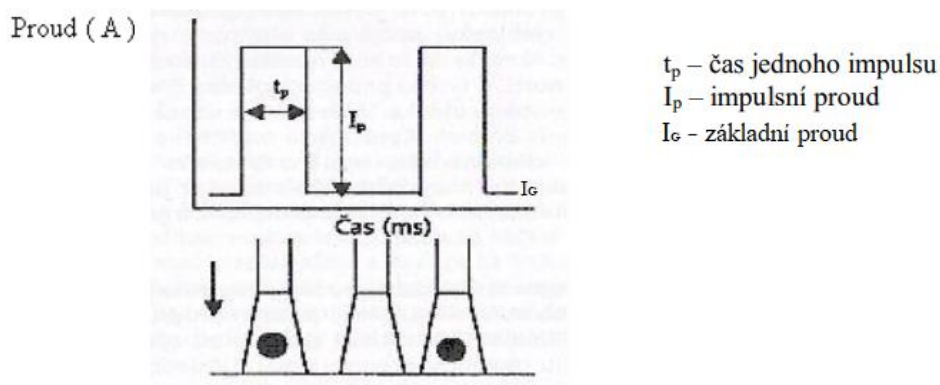
pro sprchový přenos jsou cca 200 až 500 A pro svařovací proud a 28 až 40 V pro svařovací napětí [5, 6, 7, 8, 9].

Sprchový přenos lze použít při svařování v ochranných atmosférách s vysokým obsahem argonu. Časté složení je argon s O₂, kde je kyslíku 1-5 % nebo argon s CO₂, kde je oxidu uhličitého maximálně 18 %. Problém nastává při použití čistého CO₂, kdy povrchové napětí neumožní vytvořit sprchový přenos kovu. Nevýhody tohoto přenosu jsou vyšší spotřeba ochranných plynů a vysoké tepelné zatížení svařence. Zde se udává, že spotřeba vzroste až o 20 %. Používá se nejčastěji na svary středních a větších tlouštěk [5, 6, 7, 8, 9].

2.2.4 Impulsní přenos

Parametry tohoto přenosu se překrývají s oblastí zkratového až sprchového přenosu viz obrázek 2 [5, 6, 7, 8, 9].

Impulsní přenos je řízený elektronicky, čímž se dosáhne pravidelného průběhu. Lze nastavit například sinusový nebo lichoběžníkový průběh. Určující pro přenos je frekvence a amplituda svařovacího proudu a napětí [5, 6, 7, 8, 9].



Obrázek 4 Průběh impulsního přenosu v čase [5]

Při vykreslení časového průběhu proudu je vidět, že u impulsního přenosu jsou charakteristické dvě hladiny proudu (obrázek 4). První se nazývá základní proud. Jeho hodnoty se pohybují cca od 20 do 50 A. Má za úkol udržovat stabilní hoření oblouku, což je podmíněno dostatečnou ionizací. Druhá hladina proudu se nazývá impulsní. Právě impulsní proud je ten, který je nastavován. Jeho hladina musí být vyšší než kritická hodnota sprchového přenosu, jinak by se materiál neoddělil z elektrody

do svarové lázně. Při impulsním proudu dochází k hoření elektrického oblouku [5, 6, 7, 8, 9].

Správné nastavení parametrů impulsního přenosu je takové, kdy na jeden impuls (zvýšení hladiny ze základního na impulsní proud) se odtaví a přenesou do svarové lázně jedna kapka svarového kovu. Používá se především pro přídavné materiály, které mají velký průměr, nebo u svařování tenkých plechů [5, 6, 7, 8, 9].

Jako nejzásadnější výhody impulsního přenosu se uvádí vysoká kvalita svarové housenky a malý rozstřík. Dále je velmi významná skutečnost, že při tomto přenosu dochází k přenesení malého vneseného tepla, tím pádem je i menší tepelné namáhání, což znamená, že budou menší deformace a strukturní změny materiálu [5, 6, 7, 8, 9].

Nevýhodou jsou náklady na pořízení zdroje, který je schopen impulsní přenos vytvořit. Další nevýhoda je nižší rychlost svařování a nemožnost použít oxid uhličitý [5, 6, 7, 8, 9].

2.2.5 Přenos rotujícím obloukem

U přenosu rotujícím obloukem jsou typické vysoké hodnoty svařovacího proudu a napětí, což je u svařovacího proudu 450 až 650 A, u napětí jsou hodnoty okolo 50 až 65 V. Přenos kovu již není ve formě kapiček, ale v podobě rotujícího celistvého roztaveného materiálu. Rotační pohyb je způsoben vysokou proudovou hustotou a elektromagnetickými silami, které působí na materiál [7, 8, 10].

Rotující přenos vznikne tím, že se využijí speciální ochranné plyny nebo se nastaví velký výlet elektrody [7, 8, 10].

Rotující oblouk se obvykle otáčí i 1000 otáček za minutu. Rotující oblouk má rovnoměrný průvar, což je požadované, jelikož neprovařené kraje svaru jsou často problematickým místem svarového spoje. Tato technologie je považována za velmi výkonnou, ovšem její použití je kvůli vysokým parametrům omezeno prakticky jen na robotizovanou výrobu, ne pro manuální svařování [7, 8, 10].

2.3 Způsoby svařování modifikovanou vlnou

Čtvrtá kapitola se zaměřuje na vybrané způsoby svařování, kdy je regulováno vnesené teplo do svaru. Jsou zpravidla charakterizovány snahou o snížení vneseného tepla. Důvodů, proč se snažit vnesené teplo snížit, je několik. Vnesené teplo mění mechanické vlastnosti, způsobuje strukturní změny v základním materiálu a přídavném materiálu, způsobuje napjatost ve svaru a následně deformaci svařence [11, 12].

V dnešní době je trh velmi konkurenční prostředí a každá výhoda oproti ostatním firmám znamená vyšší zisk. Proto se jednotlivé firmy snaží vyvíjet svoje metody svařování modifikovanou vlnou, aby získaly výhodu na trhu [12].

Svařování modifikovanou vlnou se proces nazývá, jelikož se nejedná o klasický zkratový přenos, ale o modifikovaný zkratový přenos. To znamená, že jsou nejčastěji průběhy proudu a napětí v různých fázích změněny oproti klasickému průběhu zkratového přenosu. Změněný průběh je řízen programem, který je nahrán v svařovacím zdroji [12].

Jako zástupci svařování MAG modifikovanou vlnou budou přiblíženy metody STT [13], CMT [15] a IAC [17]. Samozřejmě kromě těchto metod existují i další, jako je například metoda FastROOT [11].

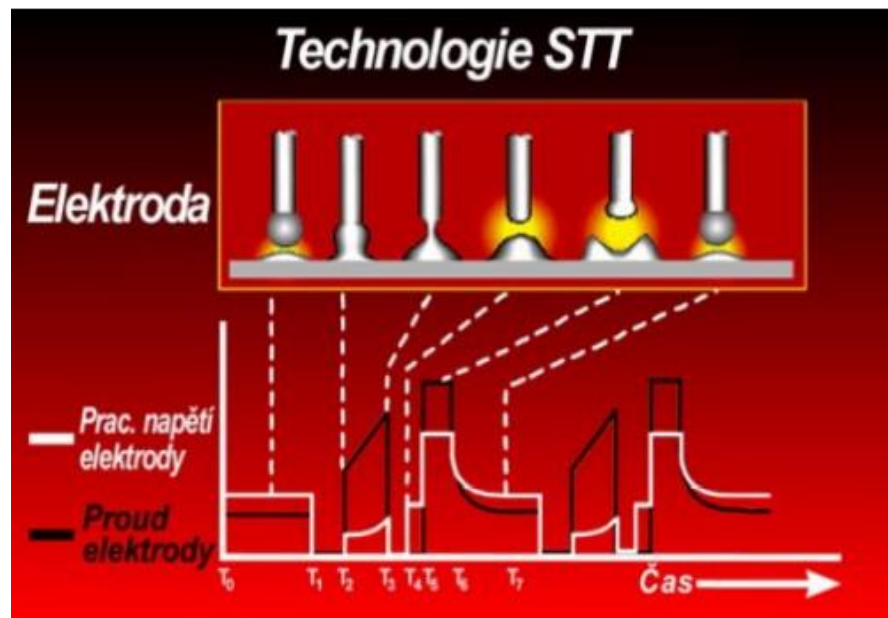
2.3.1 Surface Tension Transfer

Značení se zde používá STT. Vývojem této metody se pyšní společnost Lincoln Electric. Lincoln Electric je firma pocházející z USA, ovšem působí po celém světě. Metoda STT byla vyvinuta z důvodu zvýšené poptávky po regulaci vneseného tepla při svařování. Surface Tension Transfer přeloženo do českého jazyka znamená přenos kovu řízený povrchovým napětím. Metoda dosahuje vyšší produktivity, než je dosaženo při svařování metodou MIG/MAG nebo TIG [13, 14].

U metody STT je celý svařovací cyklus řízen. To zapříčiňuje speciální STT zdroj. Přenos kovu z přídavného materiálu (elektrody) do svarové lázně je řízen konkrétními parametry z probíhajícího svařování. Parametry zdroj určí z hodnot, které v danou chvíli odečetl na elektrickém oblouku. To zjednodušeně znamená, že v této metodě je pod kontrolou celý svařovací cyklus a jeho regulace probíhá v reálném čase [13, 14].

2.3.1.1 Princip STT

Jak již bylo řečeno, nejdůležitější u této metody je zdroj, který pracuje se zpětnou vazbou. Zdroj sleduje napětí na elektrickém oblouku. Následně data vyhodnocuje a podle vyhodnocení napětí je ihned schopný reagovat na každou situaci, která nastane při přechodu materiálu do svarové lázně [14].



Obrázek 5 Průběh proudu a napětí metody STT v čase [13]

První fáze (obrázek 5) leží mezi časy $T_0 - T_1$. Zde dochází k hoření oblouku mezi svarovou lázní a koncem elektrody. Konec elektrody je roztaven a tvoří se kapka roztaveného kovu [13].

V druhé fázi mezi časy T_1 a T_2 se kapička na konci elektrody zvětšila tak, že dochází ke kontaktu této kapičky se svarovou lázní. Kontakt je zachycen svařovacím zdrojem, který automaticky sníží proud. Udává se hodnota kolem 10 A, což má za následek výrazné snížení rozstříku. U konvenčního zkratového přenosu vůbec k takovému snížení proudu nedochází [13].

V třetí fázi, která je mezi časy T_2 a T_3 dochází ke zkratu. Aby došlo k oddělení kapičky kovu, svařovací zdroj začne zvyšovat proud přesně dle křivky, která je předem určena [13].

Následně ve čtvrté fázi mezi časy T_3 a T_4 nastane oddělení kapičky svarového kovu od elektrody a kapička přechází do lázně. Zde opět zdroj analyzuje situaci a dojde

k omezení proudu zhruba na 50 A. Tímto krokem se zamezí rozstříku a také se utlumí dynamické děje, které nastávají při opětovném vzniku oblouku. U zkratového přenosu tato fáze probíhá při vysokých hodnotách proudu, což má za následek rozstřík [13].

Fáze mezi časy T_4 až T_7 znamená, že svařovací zdroj STT detekuje konec přechodu kapičky a dále řídí elektrický oblouk. Trvá to do chvíle, kdy se začne na konci elektrody odtavovat nová kulička roztaveného kovu a je uzavřený jeden cyklus, který se následně znovu a znovu opakuje. Celková doba jednoho cyklu je pět milisekund [13].

2.3.1.2 Výhody STT

Obsazení speciálního obvodu ve zdroji s názvem "dV/dt detektor" zajišťuje velmi přesnou identifikaci momentu před ukončením zkratu. Celý proces je plně automatický a není potřeba zásah personálu, který místo obsluhuje. Možné parametry mohou být velmi přesně upravovány a jsou nastavovány pro konkrétní fázi cyklu. Rychlost podávání drátu je nezávislá na svařovacím proudu [13, 14].

Hlavní výhodou je minimální vnesené teplo, které velmi významně ovlivňuje vzniklé deformace a tepelně ovlivněnou oblast. Také se udává o 90 % menší rozstřík než u běžných metod. S tím souvisí i vyšší vizuální kvalita svarových spojů. Tyto svary není většinou potřeba brousit. Svarová lázeň zůstává stejná nezávisle na situaci a poloze. Produktivita je mnohokrát vyšší než například u svařování metodou TIG. Metoda STT je také velmi flexibilní [13, 14].

Je možné metodou STT svařovat velké množství materiálů (nelegované oceli, nízkolegované i vysokolegované oceli). Lze svařit i oceli, které byly galvanicky pokovené [13, 14].

Ovládání je jednoduché, jelikož proces probíhá automaticky. Zaškolení personálu je tedy relativně rychlé. Jako poslední výhoda se uvádí fakt, že při STT dochází ke snížení emisí vznikajících při svařování [13, 14].

2.3.1.3 Použití STT

Díky svým nesporným výhodám si tato metoda našla široké využití v dnešním průmyslu. Její hlavní využití je výroba tlakových lahví, používá se při svařování potrubí v energetickém průmyslu. Velké zastoupení má při konstrukci strojů a zařízení do potravinářství. Velmi často se používá pro tvrdonávary. V poslední řadě se používá v automobilovém průmyslu. [13, 14].

2.3.2 Cold Metal Transfer

V minulosti byl velký problém při snaze spojit materiály, které se od sebe lišily svými mechanickými, fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Většinou se heterogenní materiály spojovaly lepením nebo mechanicky. Metodu Cold Metal Transfer vyvinula společnost Fronius, které se povedlo spojit tyto heterogenní materiály pomocí svařování, což bylo prakticky nemožné hlavně kvůli degradaci v místě spoje. Konkrétně se jednalo o materiály hliník a ocel. Při spojení materiálů musí být kladený důraz na techniku a na geometrické rozložení spoje [15, 16].

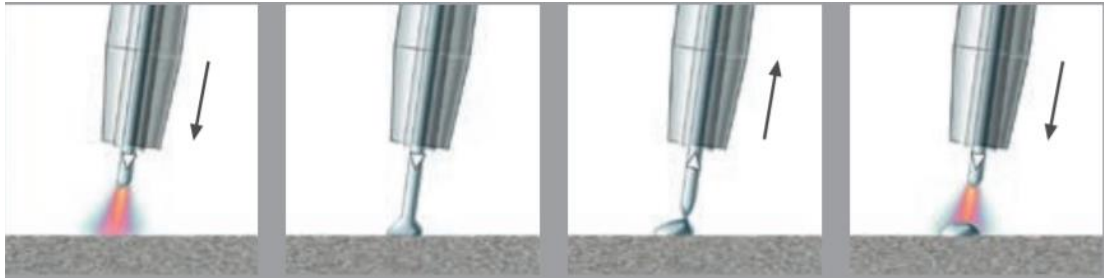
Metoda CMT, což tedy v překladu znamená přenos studeného kovu, vznikla postupnou modifikací původní metody MIG/MAG, oproti které pracuje metoda CMT s menším vneseným teplem [15, 16].

2.3.2.1 Princip CMT

Svařovací drát se pohybuje ve směru podávání drátu a následně ve směru opačném. Nejprve se drát pohybuje ve směru podávání. To pokračuje do chvíle, kdy přijde do kontaktu drát a svarová lázeň a dojde ke zkratu. V tu chvíli se směr pohybu drátu obrátí a začne zatahování. Když se drát zatáhne dostatečně, zanikne kontakt mezi drátem a svarovou lázní a zruší se zkrat. Drát se začne opět pohybovat ve směru podávání drátu a celý cyklus začíná od začátku (obrázek 6). [15].

Jedná se tedy o oscilační pohyb, u kterého se může frekvence pohybovat kolem 70 Hz. Tato frekvence není konstantní, jelikož pohyb drátu se odvíjí od vzniku a zániku zkratu. Pro takový typ pohybu je nutné pořídit speciální pohon, který je umístěn přímo na hořáku, jelikož běžná výbava by nebyla schopná takový pohyb realizovat.

Součástí transportních hadic při této metodě je vyrovnávací zařízení, které se nazývá drahtpuffer. Zajišťuje kompenzaci změny pohybů drátu [15].



Obrázek 6 Pohyb drátu při svařování CMT [16]

Při použití metody CMT vzniká vnesené teplo, které dosahuje nižších hodnot. Samotný přechod materiálu z elektrody do lázně je skoro bezproudý. V případě CMT metody totiž k zániku zkratu nepřispívá vysoký zkratový proud, ovšem zánik je způsoben zpětným pohybem drátu od lázně, což znamená, že není nutné udržovat proud na příliš vysokých hodnotách během zkratu a celkové vnesené teplo při svařování se výrazně sníží. [15, 16].

2.3.2.2 Příklad CMT

Jako konkrétní příklad se uvádí spojení oceli s hliníkem, kde ocelový materiál je v pozinkovaném stavu. Funguje to tedy tak, že ocelový materiál je ve fázi, kdy je smáčen (teplota tavení 1538 °C) nataveným hliníkem (teplota tavení 660 °C). Sám se ovšem nenachází v nataveném stavu. [15, 16].

2.3.2.3 Použití CMT

Hlavní výhodou této metody je prakticky nulový rozstřík a také fakt, že můžeme ovlivňovat začátek a konec zkratu. Při svařování touto metodou lze svařovat bez svarové podložky. Použití nachází u překlenování spár, což je u metody MIG a MAG problém. Kromě spojení oceli s hliníkem je CMT metoda vhodná na svařování tenkých hliníkových plechů, ušlechtilých ocelí, které obsahují hořčík. Metoda CMT se používá i při pájení pozinkovaných plechů. [15, 16].

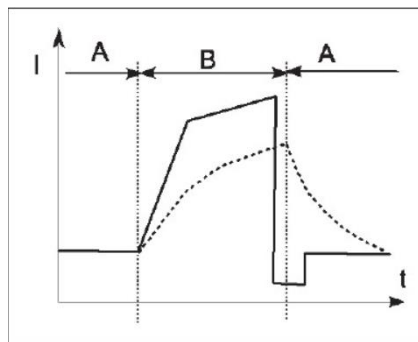
2.3.3 Intelligent Arc Control

Používá se značení IAC. Z anglického jazyka se překládá jako inteligentní řízení oblouku. Jedná se o způsob svařování, který byl vyvinut firmou Migatronic. IAC je součástí výbavy programů svařovacího zdroje Sigma Galaxy. Metoda IAC pracuje na principu kontroly a řízení zkratového přenosu [17, 18].

Hlavním důvodem, proč byla metoda IAC vytvořena, je redukování vneseného tepla. Vnesené teplo se zde řeší zejména kvůli svařování tenkých plechů, u kterých může při vyšším dodaném teple docházet k deformaci nebo protavení. Další důvody jsou snížení rozstříku, možnost kvalitně svařovat kořen svaru a překlenout větší mezery při svařování [17, 18].

2.3.3.1 Princip IAC

Jde o modifikaci obyčejného zkratového přenosu. Metoda IAC funguje tak, že ve chvíli, kdy dochází ke zkratu, dojde k zvýšení hodnot proudu oproti klasickému zkratovému přenosu u MAG svařování. Vyšší proud má za následek větší rozstřík. Tomu je zabráněno následným poklesem proudu na minimální hodnotu tak, aby oblouk zůstal ještě stabilní. Takto nízká hladina je udržována do odtržení kapky. Poté dojde k zvýšení hodnot proudu, aby byl oblouk stabilnější a celý proces se opakuje [18].



Obrázek 7 Porovnání průběhu proudu IAC a MAG v čase [18]

Na obrázku 7 je znázorněn průběh proudu u metody IAC, která je vynesena plnou čarou a metody MAG, která je znázorněna přerušovaně. Oblast A je část, kdy hoří oblouku a oblast B je část zkratu. Je patrné, že doba trvání zkratového proudu u metody IAC je kratší než u metody MAG, což je zapříčiněno algoritmy, které u metody IAC přesně dopočítávají okamžik oddělení kapky, tím pádem je možné po vyhodnocení tuto dobu zkrátit. Výsledkem je metoda, která má nízké vnesené teplo a malý rozstřík [18].

2.3.3.2 Výhody IAC

Při svařování metodou IAC dochází ke lepšímu svařování kořenů v poloze shora dolů, která je jindy obtížná. Při svařování nemusíme řešit proměnlivý výlet drátu [17].

Při svařování v poloze zdola nahoru se dosahuje vyšší rychlosti svařování, což zvyšuje i produktivitu procesu [17].

Jako hlavní výhody jsou brány malé vnesené teplo a minimální rozstřík. Mohou se tedy svařovat i menší tloušťky plechů a nedochází k větší deformaci. Minimální rozstřík ušetří materiál a čas u dokončovacích úprav po svařování [17].

2.3.3.3 Použití IAC

Metoda IAC se používá hlavně pro kořenové vrstvy svarů. Její použití je typické pro potrubí, trubky, nádrže. Nejčastěji se takto svařují tupé svary z uhlíkové a nerezové oceli. Používá se pro plechy od velmi malých tlouštěk. Svařování metodou IAC lze velmi dobře automatizovat [17].

2.4 Vizualizace svařování

Na začátku kapitoly jsou popsány začátky pořizování vysokorychlostního záznamu. Tato kapitola se hlavně zaměřuje na způsob, jakým je technologie svařování vizualizována. Jsou popsány základní principy dané metody.

2.4.1 Vývoj vysokorychlostního zobrazování

První známá fotografie byla pořízena ve dvacátých letech devatenáctého století. Byla pořízena vynálezcem z Francie, který se jmenoval Niépce. Zhruba šedesát let po této události vznikl nápad na vytvoření vysokorychlostní záznamu [19].

Jako první slavný pokus je brán cválající kůň od Eadwearda Muybridge (obrázek 8), který byl publikován v roce 1887. Probíhalo to tak, že autor na každý jeden snímek použil jeden fotoaparát, což znamená, že počet snímků v záznamu byl roven počtu dostupných fotoaparátů. Tato skutečnost byla velmi limitující pro počet možných snímků a zároveň se lehce změnil pohled na koně po každém snímku, jelikož byl focen z jiného zařízení. Snímková frekvence v takové konfiguraci ovšem může být teoretický nekonečná [19].



Obrázek 8 Jeden snímek ze záznamu cválajícího koně [19]

Cílem bylo vytvořit záznam, ve kterém se nebude měnit úhel, ze kterého bude snímek pořizován. To znamenalo pořizovat všechny snímky z jednoho zařízení, což klade vyšší nároky na fotoaparát [19].

Bylo zapotřebí zajistit kameru, která bude schopná pořizovat záznam ve vyšší snímkové frekvenci. Kamery, které dokázaly pořizovat záznam s 1 000 fps

(frames per second-snímky za sekundu) byly vynalezeny ve třicátých letech dvacátého století. Následně se povedlo dosáhnout 40 000 fps. Nevýhodou byla skutečnost, že snímková frekvence byla limitována fyzicky pohybujícími se částmi v kameře [19].

V šedesátých letech dvacátého století byl vynalezen nový princip. Zde se přeměňují fotony na elektrony a jsou ukládány na obrazovku do různých pozic pomocí elektrického vychýlení. U tohoto principu bylo možné dosáhnout až sto milionů fps [19].

V dnešní době kamery ukládají obraz do své interní paměti. Na takové kamery je možnost zachytit i delší sekvence díky možnosti uložení velkého množství snímků, což umožňuje natočit některé události kompletní [19].

2.4.2 Techniky vizualizace

Vizualizace svařování metodou MAG a MIG je složitá. Nachází se zde mnoho problémů, které samotnou vizualizaci komplikují. Hlavními problémy jsou nejprve rychlost celého procesu svařování. Kapičky kovu se pohybují vysokou rychlostí. Druhým hlavním problémem je vysoká intenzita světla, které vyřazuje elektrický oblouk při svařování [20, 21].

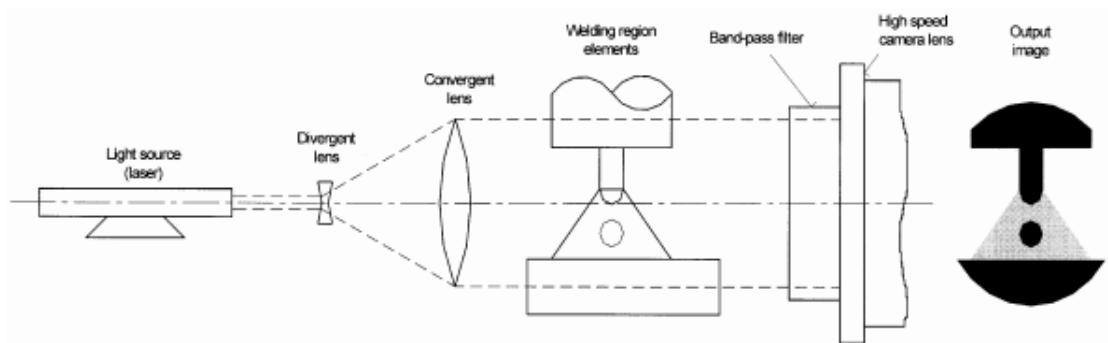
Nejčastější metodou, jak jde proces svařování kvalitně vizualizovat, je metoda stínů. K tomu, aby bylo možné ovšem na pořízeném záznamu něco vidět, je zapotřebí další externí zdroj světla, který přesvítí intenzivní světlo z oblouku a bude možné vidět drát přídatného materiálu, odtavující se kapičky přídatného materiálu, svarovou lázeň a výslednou housenku. Výsledný obraz bude tedy vypadat tak, že dostaneme pozadí o vysokém, stálém jasu a tmavou siluetu drátu, odtavujících se kapiček, svarové lázně a hořáku [20, 21].

První pokus získat tak intenzivní světlo byl s použitím lampy na principu xenonového nebo uhlíkového oblouku. Tyto lampy jsou schopné zařídit dostatečnou intenzitu světla, ovšem mají mnoho nevýhod [20].

Světlo vytvořené lampami je velmi drahé. Provoz lamp je energeticky náročný. Dále vyzařují velké množství tepla, které není žádané a je potřeba ho odvádět. Poslední nevýhodou je fakt, že se často jedná o velká zařízení, s kterými se špatně manipuluje [20].

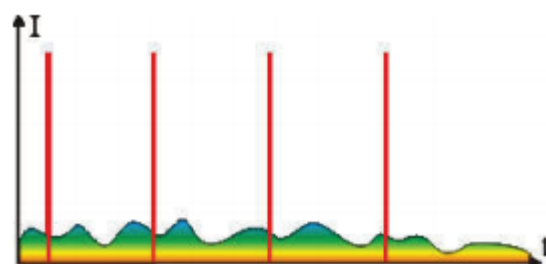
Pomocí těchto lamp se dá pořídit dostatečně kvalitní záznam o dějích při svařování, jestliže se použijí správné filtry [20].

Proto se častěji uplatňuje metoda, kdy se pro metodu stínů používá jako externí zdroj světla laser (obrázek 9). Metoda s použitím monochromatického laseru dodává velmi dobré výsledky a je považována za levnější než používání lamp. Funguje na principu toho, že celý proces je nasvícen monochromatickým laserem o určité vlnové délce a u kamery jsou použity filtry, které vyfiltrují všechny ostatní vlnové délky, které vyzařuje elektrický oblouk a propustí pouze vlnovou délku laseru [20, 21].



Obrázek 9 Princip metody stínů s nasvícením laserem, konfigurace laser proti kameře [21]

Světlo z laseru se často nepoužívá pro kontinuální svícení. Za účelem využití celého výkonu pro osvit scény se používá světlo vycházející z laseru v podobě pulsů (obrázek 10, značené červeně) [19].



Obrázek 10 Závislost intenzity na čase [19]

Jako první se začaly používat helium-neonové lasery o vlnové délce zhruba 633 nanometrů (obrázek 11, značené červeně), což je odlišná vlnová délka světla než, které vyzařuje elektrický oblouk při svařování, takže jde světlo z oblouku dobře odfiltrovat [20].



Obrázek 11 Závislost intenzity na vlnové délce [19]

3 Experimentální část

3.1 Použité přístroje a zařízení

V této kapitole budou detailněji popsány jednotlivé přístroje, které byly k realizaci experimentu použity. Konkrétně se jedná o vysokorychlostní kameru, laser, svařovací zdroj a svařovací traktor.

3.1.1 Vysokorychlostní kamera

Pro experimentální část práce byla použita vysokorychlostní kamera od společnosti Photron. Konkrétně se jednalo o model FASTCAM SA-Z (obrázek 12). Tato kamera nachází uplatnění nejen při vizualizaci svařování, ale také v medicíně, biologii, letectví. Kamera je schopná natáčet se snímkovou frekvencí až 480 000 snímků za sekundu [22].

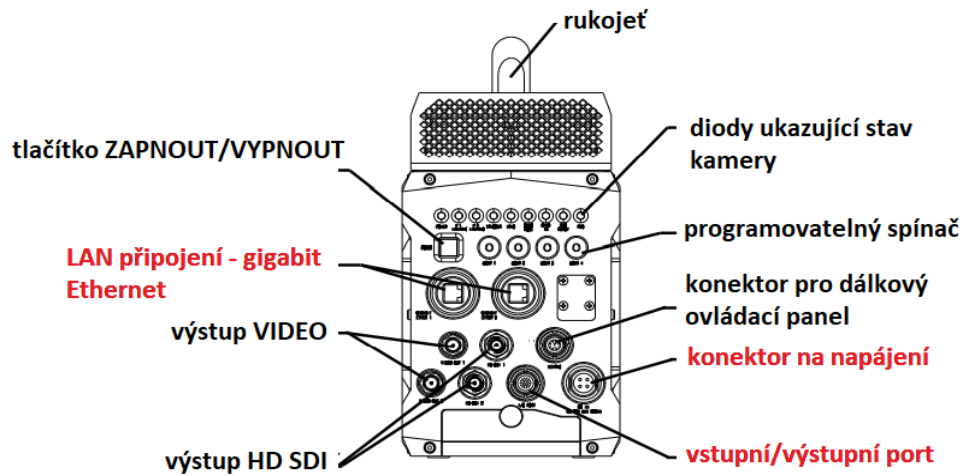
Kamera zaznamená událost, která probíhá ve vysoké rychlosti, vysokou snímkovou frekvencí. Snímková frekvence je nastavitelná. Výsledkem je záznam velkého množství snímků. Ty jsou pak přehrány v klasické přehrávací frekvenci videozáznamu. To způsobí, že dostaneme kvalitní záznam o ději, který by nebylo možné obyčejným okem sledovat. Použitá kamera je monochromatická [22].



Obrázek 12 Vysokorychlostní kamera FASTcam SA-Z [22]

Délku záznamu lze demonstrovat na příkladu: Při nastavení snímkové frekvence 8 000 snímků za sekundu bude proveden záznam svařování, který bude trvat 1 sekundu. Následně budou snímky přehrány běžně používanou snímkovou frekvencí 25 snímků za sekundu. Z toho vyplývá, že z události trvající 1 sekundu, bude záznam o délce zhruba 5,33 minuty.

Kameru lze ovládat dálkovým ovládacím panelem nebo je možné zapojit ji do počítače a ovládat přes software. To je realizováno pomocí gigabit Ethernetového připojení, kdy kamera má svojí vlastní IP adresu [22].



Obrázek 13 Zadní strana Kamery [22]

Pro experiment bylo použito u kamery zapojení do gigabit Ethernetu, aby počítač mohl komunikovat s kamerou. Dále konektor na napájení, aby šla kamera zapnout a vstupní a výstupní port. Použité konektory jsou označeny červeně (obrázek 13).

Na objektiv kamery je možné umístit hranové i čárové filtry, které pomáhají odfiltrout nežádoucí vlnové délky. Dále je možné měnit dle potřeby zaclonění, což ovlivní výsledné množství světla, které bude viditelné na obrazu. Také lze na objektiv připevnit tzv. šedý filtr, značený ND, který filtruje všechny vlnové délky, výsledný obraz je tmavší.

Pro ovládání kamery byl použit program Photron FASTCAM Viewer 4. V tomto softwaru byly využity možnosti spouštění nahrávání, nastavování parametrů nahrávání, otvírání již pořízených záznamů a aplikování funkce HDR (high dynamic range). HDR umožňuje zobrazit i detaily, které nejsou při běžném záznamu viditelné. Je to způsobeno tím, že tato funkce dokáže rozlišit více stupňů jasu, takže se světlé odstíny nezobrazují jako jasně bílá a tmavé odstíny jako černá barva [23].

V softwaru kamery byla nastavována snímková frekvence (fps), rychlost závěrky (shutter speed), rozlišení (resolution). Trigger mode byl nastaven po celou dobu na start, což znamená, že vysokorychlostní kamera začala nahrávat ve chvíli, kdy bylo stisknuto tlačítko pro nahrávání.

3.1.2 Laser

Jako externí zdroj světla byl použit laser CAVILUX Smart (Cavitar). Zařízení se skládá ze tří částí. První část je kontrolní jednotka, druhá část je jednotka, která generuje laserové pulsy (laserová jednotka) a třetí je optickým kabelem připojená laserová optika [24].

Kontrolní jednotka (obrázek 14) je propojena kabelem s laserovou jednotkou, dále je propojena s vysokorychlostní kamerou FASTCAM SA-Z a v poslední řadě je propojena přes USB s počítačem, přes který je laser ovládán [24].



Obrázek 14 Přední strana kontrolní jednotky laseru [24]

Hlavní zabezpečení laseru (třída IV), je klíčkem na čelním panelu ovládací skříňky. Po otočení klíčku je laser napájen a je aktivní. Tento stav signalizují diody. Když se rozsvítí diody POWER a ACTIVE, laser ještě nesvítí. Rozsvícení laseru lze zajistit buď zmáčknutím tlačítka START/STOP, nebo kliknutím na tlačítko START v softwaru v počítači (obrázek 17). Zastavení svícení laseru lze provést stejným postupem jako rozsvícení, což je stisknutím tlačítka nebo zastavením v počítači [24].

Laserová jednotka (obrázek 15) je z jedné strany napojena na kontrolní jednotku a z druhé strany, z které vychází laser, je vyveden speciální optický kabel, který končí laserovou optikou. U tohoto kabelu je velmi důležitá opatrnost při instalaci a manipulaci, aby nedošlo k poškození (obrázek 16) [24].



Obrázek 15 Laserová jednotka [24]



Obrázek 16 Ukončení optického kabelu [24]

Laser je monochromatický. Vlnová délka, kterou vyzařuje je 810 ± 10 nm. Vlnová délka 810 nm je pro lidské oko neviditelná. Je možné nastavit jeden až pět pulsů a stejný počet mezer mezi pulsy. Každý puls i každou mezeru je možné nezávisle na sobě nastavovat. Jeden puls může trvat od 20 nanosekund po 10 mikrosekund [24].

Při nastavování pulsů je důležité, aby celkový součet dob všech nastavených pulsů a mezer dohromady byl menší nebo roven době otevření závěrky (shutter speed). Kdyby tomu tak nebylo, nebyla by využita plná intenzita pulsů laseru. Pro experiment byl zvolen jeden puls a jedna mezera. Součet doby trvání pulsu a mezery byl blízký svojí hodnotou době otevření závěrky.

Laser byl nastavený do režimu external synchronization, což znamená, že laser je v tzv. režimu slave (podřízený) a je řízen vysokorychlostní kamerou, která posílá externí signál a pokaždé, kdy pošle signál, jsou vyzářeny laserem pulsy tak, jak byly uživatelem nadefinovány [24].

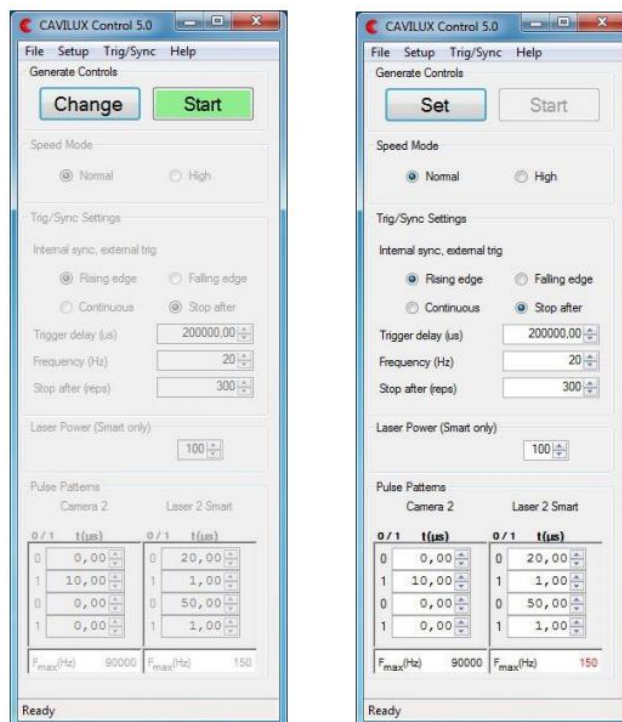
V režimu external synchronization bylo možné přepínat mezi high a normal mode. Dále bylo možné nastavovat pulsy laseru a mezery mezi pulsy, jak jejich počet, tak jejich dobu trvání, což pro potřeby experimentu bylo dostačující [24].

CAVILUX Smart má dva základní rychlostní módy. První je Normal mode, kde laser vydrží svítit po zapnutí nepřetržitě do té doby, než dojde k vypnutí uživatelem.

Druhý je High mode, kdy laser svítí 10 sekund, pak dojde k vypnutí a následnému chlazení, kdy laser nemůže být spuštěn. Chlazení trvá 1 minutu. Pro experiment byl použit high mode [24].

Práce v softwaru laseru je intuitivní. Vždy, když bylo nutné změnit nastavení, bylo stisknuto tlačítko Change, jinak nebylo možné žádné změny učinit. Změny se uložily tlačítkem Set a samotný laser se pouští zeleným tlačítkem Start (obrázek 17) [24].

Červené číslo na obrázku 17 vpravo dole udává maximální možnou snímkovou frekvenci, kterou je možné nastavit na vysokorychlostní kameře při pořizování záznamu. Čím je delší trvání pulsů, tím nižší snímkovou frekvenci je možné nastavit. Přehled maximálních hodnot, které lze pro určitou snímkovou frekvenci nastavit, je dán výrobcem laseru [24].



Obrázek 17 Software pro ovládání laseru [24]

3.1.3 Svařovací zdroj

Pro svařování byl použit svařovací zdroj Sigma Galaxy (Migatronic) (obrázek 18). Patří mezi nejnovější svařovací zdroje. Jedná se o zdroj pro svařování metodou MAG a MIG. Lze na něm nastavit mnoho předdefinovaných programů. Byl zvolen především proto, jelikož je u něj možnost nastavit svařovací programy pro metodu IAC, což je metoda pro svařování modifikovanou vlnou [25].



Obrázek 18 Svařovací zdroj Sigma Galaxy [25]

Kromě metody IAC disponuje zdroj i funkcí IGC (intelligent gas control). Funkce IGC dokáže na základě měnících se parametrů regulovat průtok ochranného plynu. To způsobuje menší spotřebu a celý proces je ekonomičtější [25].

Nastavování programů a úprava parametrů se provádí přes obrazovku na svařovacím zdroji (obrázek 19).



Obrázek 19 Ovládací panel svařovacího zdroje

Přes šedá tlačítka se v menu vybere program, který je žádoucí a potvrdí se. Program obsahuje informace o rychlosti podávání drátu, o tom, jaký je ochranný plyn, jaký je průměr drátu, pro jaký materiál se program hodí. Poté se zelenými tlačítky na pravé straně nastavují konkrétní hodnoty. Na škále pod ukazatelem hodnot je zelenou barvou vidět, v jaké části rozsahu se parametry nacházejí (obrázek 19).

3.1.4 Svařovací traktor

Pro pohyb základního materiálu pod hořákem byl využit svařovací traktor WELDYCAR (obrázek 20). Traktor má čtyřkolový podvozek. Jsou poháněná všechna čtyři kola. Je vybaven i magnetickým přitlakem, který lze páčkou na boku vypnout



Obrázek 20 Svařovací traktor WELDYCAR [26]

a zapnout. Napájení je nezávislé na elektrické síti, je vybaveno baterií, která lze po vybití opět nabít, což trvá přibližně 60 minut. Na jedno nabití vydrží traktor pracovat až 6 hodin. Traktor lze složitěji programovat, ovšem pro účely pokusu stačilo pouze manuální nastavování rychlosti a směru pohybu. Nejvyšší rychlost použitého typu je 70 cm/min [26].

3.2 Uspořádání pracoviště

Uspořádání pracoviště bylo takové, aby hořák s přídavným materiálem byl ve statické poloze a pohyboval se základní materiál pod hořákem. Tato varianta byla zvolena z důvodu, aby mohla být kamera, která bude svařovací proces natáčet, nehybná ve statické poloze a bylo zaostřeno na špičku drátu, který vycházel z hořáku (obrázek 21). Celý proces tak může být dobře zdokumentován.



Obrázek 21 Uspořádání pracoviště

1 - hliníková konstrukce unašeče vzorku
2 - svařovací traktor
3 - svařovací stůl
4 - svařovací zdroj
5 - hořák

6 - spínač svařovacího procesu
7 - Weldmonitor
8 - vysokorychlostní kamera
9 - počítač
10 - laser

Jako unašeč vzorku bylo využito hliníkové konstrukce obdélníkového tvaru o vnitřních rozměrech cca 400 x 250 mm. Na konstrukci je upínkou přidržený plech, který slouží jako základní materiál (obrázek 22).



Obrázek 22 Hliníková konstrukce

Unašeč vzorku je přes hliníkový nosník připevněn na svařovací traktor, který zajišťuje lineární pohyb vzorku. Traktor byl programovatelný. Bylo možné nastavit směr, kterým se traktor pohybuje a zároveň bylo možné nastavit i rychlost jakou traktor pojede. Jelikož byl traktor napájen přes baterii, není limitován místem, kde je umístěn. Jediný omezující fakt byl, aby kolem sebe měl svařovací traktor dostatek místa a nic mu nepřekáželo v pohybu dopředu a dozadu.

Svařovací traktor s připevněnou konstrukcí byl umístěn na svařovací stůl a bylo zajištěno a následně zkontrolováno, jestli při zapnutí a puštění traktoru dojde k pohybu hliníkové konstrukce a nic v pohybu nevádí. Po vyzkoušení byly na konstrukci, co nejdále od traktoru, připevněny podpůrná kolečka, aby bylo zajištěno, že se konstrukce nebude ohýbat a bude dost tuhá při pohybu.

Hořák byl nastaven tak, aby byl v ideální poloze vůči plechu, který se připevnil pomocí upínky na hliníkovou konstrukci. Nastavení hořáku bylo docíleno tak, že byl vytvořen speciální přípravek, který byl připevněn přes stojan k základnímu stolu, na kterém byl i traktor. Hořák byl tedy statický. Spouštění svařování bylo zajištěno spínačem vyvedeným z konektoru ovládání hořáku.

Svařovací parametry byly sledovány systémem Weld Monitor, umožňující sledovat rychlé děje svařovacího procesu s frekvencí až 250 kHz. Naměřené parametry byly dále graficky zpracovány.

Rychlostní kamera byla umístěna na stojan a postavena vedle stolu tak, aby objektiv kamery mířil na hořák s drátem a základní materiál. Před objektiv byl umístěn ochranný kryt, který byl na stojanu samostatně vedle kamery a chránil objektiv před kapičkami kovu, které vyletovaly při svařování. Kryt byl v takové vzdálenosti, aby se na kameru daly libovolně umisťovat v případě potřeby další objektivy nebo filtry. Bylo-li to nutné, vzdálenost mezi krytem a kamerou bylo možno měnit (obrázek 23).



Obrázek 23 Kryt, filtry a objektiv kamery (AF-S Micro NIKKOR 60 mm F/2.8G ED, Nikon)

Ovládání kamery bylo prováděno firemním softwarem ze stolního počítače. Záznamy byly uloženy na pevný disk ovládacího počítače.

Byla možnost umístit laser buď vedle kamery a nasvěcovat proces z boku nebo laser umístit na protější stranu stolu proti kameře. Byla vyzkoušena obě umístění. V experimentu bylo rozhodnuto umístit laser v pozici proti kameře, jelikož zde bylo

dosaženo lepšího nasvícení a lepší výsledné kvality obrazu. Laser nesvítí přímo do objektivu kamery, ovšem na místo svařování. Kamera snímala světlo odražené.

Laser byl kabelem připojen ke zdroji laserového záření. Tento zdroj byl připojen ke stejnému počítači jako vysokorychlostní kamera. Ze softwaru laseru, lze nastavovat různé módy laseru a byla zde možnost spuštění laseru.

Při práci s laserem bylo nutné dodržovat bezpečnost práce. V momentě, kdy byl spuštěn laser, který se spouštěl přes speciální klíček, byla místnost uzamčená. Okna i dveře byly zastíněny černými závěsy a všichni pracovníci měli nasazené ochranné brýle po celou dobu spuštění laseru.

Když se nastavily požadované parametry, bylo zapnuto svařování. Následně ihned puštěn svařovací traktor. Ve chvíli rozjetí traktoru byl po vizuální kontrole procesu svařování zapnut laser a jako poslední bylo zapnuto nahrávání záznamu. Po pořízení dostatečné délky záznamu bylo vše vypnuto v libovolném pořadí.

Měření na Weldmonitoru probíhalo odděleně od vizualizace. Zmonitorovány byly všechny předem určené parametry. Parametry byly stejné jako pro vizualizaci.

3.3 Rozvržení experimentu

3.3.1 Navržení parametrů svařování

Jako vstupní data byly k dispozici parametry z jiného experimentu, kde bylo prováděno kalorimetrické měření svařovacího procesu. Ve zmíněném experimentu se svařovalo pomocí metody CMT a byly zvoleny proudy 140, 170 a 200 A. WFS = rychlost podávání drátu a TS = rychlost posuvu (Tabulka 1) byly navrženy v závislosti na svařovacím proudu.

Tabulka 1 Data ze svařování CMT

proud [A]	WFS [m/min]	TS [cm/min]
140	5,6	20
170	7	30
200	9,1	35

Z těchto hodnot byla vypočtena hodnota velikosti plochy průřezu svaru jako $18,33 \text{ mm}^2$. Ideální případ průběhu experimentu týkajícího se vizualizace by byl dodržet hodnoty proudu a velikost průřezu svaru. To z toho důvodu, aby se následně daly výsledky těchto prací porovnat a popřípadě použít pro další studie.

Metoda svařování modifikovanou vlnou je na použitém zařízení reprezentována programem č. 182 (metoda IAC). Použit byl drát o průměru 1 mm a jako ochranný plyn byl použit argon a oxid uhličitý v poměru 80/20. Bylo zjištěno, že hodnoty svařovacího proudu programu č. 182 nelze nastavit až na požadovaných 200 A, jelikož maximální nastavitelný svařovací proud pro program č. 182 bylo 150 A. Tudíž byly zvoleny nové hodnoty proudu, které pokrývaly celý nastavitelný rozsah. Zvoleno bylo 60, 80 a maximální hodnota 140 A. K nově zvoleným hodnotám proudu byla programem zvolena rychlost podávání drátu WFS a napětí (Tabulka 2).

Tabulka 2 Zvolené hodnoty pro svařování metodou IAC

proud [A]	napětí [V]	WFS [m/min]	TS [cm/min]
60	16,1	2,5	10,7
80	16,2	3,3	14,1
140	17,6	5,5	23,5

K tomu, aby byly známy všechny hodnoty, bylo potřeba dopočítat rychlost posuvu TS. U výpočtu se vycházelo z kalorimetrického experimentu a ze zjištěné teoretické plochy průřezu svaru 18,33 mm², která je konstantní při všech měřeních. Pro výpočet byl použit vztah (obrázek 24):

$$S = \frac{s * WFS}{TS}$$

Obrázek 24 Vztah pro výpočet plochy průřezu svaru

S = plocha průřezu svaru [mm²]
s = plocha průřezu drátu [mm²]
WFS = rychlost podávání drátu (wire feed speed) [mm/min]
TS = rychlost posuvu (travel speed) [mm/min]

Po dosažení a dopočítání rychlostí posuvu (Tabulka 2). Bylo vyzkoušeno svařování se získanými hodnotami. Bylo zhodnoceno, že vypočtené rychlosti posuvu byly nízké. Kov se spíše shromažďoval na jednom místě. Vzniklý svar byl nekvalitní. Následkem toho bylo zvýšení rychlosti posuvu na dvakrát vyšší hodnoty (Tabulka 3).

Tabulka 3 Výsledné zvolené hodnoty pro svařování metodou IAC

proud [A]	napětí [V]	WFS [m/min]	TS [cm/min]
60	16,1	2,5	21,4
80	16,2	3,3	28,2
140	17,6	5,5	47

Zkratový přenos byl reprezentován programem č. 112.

Proto, aby bylo možné programy č. 182 a 112 porovnat. Byly zachovány hodnoty rychlosti podávání drátu a rychlosti posuvu.

Pro co největší přiblížení hodnotám z kalorimetrického experimentu byly u vizualizace zkratového přenosu přidány ještě hodnoty rychlosti podávání drátu 7 a 9,1 m/min. Tyto rychlosti odpovídají v kalorimetrickém experimentu hodnotám pro 170 a 200 A (Tabulka 4). U programu č. 112 nebyl problém s rozsahem proudu, ovšem u hodnoty WFS = 9,1 m/min bylo dosaženo proudu 209 A, který se nacházel v přechodové oblasti mezi zkratovým a sprchovým přenosem. Hodnoty pro rychlost

posuvu TS byly dopočítány podle obrázku 24 a zvětšeny dvakrát jako v případě metody IAC.

Tabulka 4 Výsledné hodnoty pro zkratový přenos

proud [A]	napětí [V]	WFS [m/min]	TS [cm/min]
74	16,3	2,5	21,4
95	17,4	3,3	28,2
138	18,0	5,5	47
163	19,3	7,0	59,4
209	25,2	9,1	77,2

Pro proud 209 A s rychlostí posuvu 77,2 cm/min bylo svařováno rychlostí posuvu 70 cm/min, jelikož to byla maximální dosažitelná rychlost, kterou mohl svařovací traktor vyvinout.

3.3.2 Navržení osvětlení, snímkové frekvence, clon, filtrů

Byla zvolena konfigurace, kdy laser byl statický a byl namířen proti kameře. Světlo laseru do objektivu nepřicházelo přímo, ale bylo odražené od základního materiálu. V konfiguraci, kdy byl laser umístěn vedle kamery, byl pořízen pouze jeden kvalitní záznam. V ostatních případech tato konfigurace dávala horší výsledky. To bylo způsobeno laserem, který nebyl schopen proces dostatečně nasvítit.

Bylo rozhodnuto, že se měření provede ve dvou stavech. Jedna sada měření proběhne v podmínkách, kdy bude laser vypnutý a bude se zaznamenávat obraz, který bude nasvícen pouze světlem vyprodukovaným plazmatem z elektrického oblouku při svařování.

V tomto případě bylo nutné na objektiv kamery umístit i další pomocná zařízení. Nejprve bylo nutné připevnit ND2 filtr, nazývá se tak proto, že tlumí všechny vlnové délky stejně a nemá vliv na výslednou barvu světla, které přes filtr projde. Tímto filtrem je dosaženo tmavšího obrazu, což je užitečné v tom, že výsledný pořízený záznam nebude přesvícený [27].

Po nasazení ND2 filtrů byly ještě připevněny hranové filtry (Cavitar), ty slouží k tomu, aby došlo k filtraci vlnových délek mimo vlnovou délku laseru (810 nm).

Finální světlost obrazu scény byla upravena ručním nastavením clony objektivu. Vložený clonový kroužek je kalibrován ve stupních podle abecedy. Na základě zkoušek byl zvolen stupeň D.

Jestliže nebude použit na osvětlení laser, má pořizování záznamu výhodu v tom, že není omezení v snímkové frekvenci. Lze nastavit snímkovou frekvenci tak vysokou, jak dovolí vysokorychlostní kamera a přirozená světelnost scény. Pro účely experimentu byla hodnota fps zvolena 50 400 snímků za sekundu a 8 000 snímků za sekundu. 8 000 fps bylo zvoleno, aby bylo možné následně záznamy se stejnými parametry porovnat při nasvícení laserem a při nepoužití laseru.

Ve druhé sadě měření byl použitý laser pro přesvícení vyzařování plazmatu oblouku. V této části byl použit opět ND2 filtr. Byly použity hranové a čárové filtry od Cavitaru. Zde měly tyto filtry za úkol vyfiltrovat všechny ostatní vlnové délky kromě vlnové délky laseru, která je 810 ± 10 nm.

Snímková frekvence byla zvolená 500 fps a výše zmiňovaných 8 000 fps. Vyšších snímkových frekvencí nebylo možno dosáhnout, jelikož použitý laser nebyl tak výkonný. Rychlost pulzace laseru byla omezena tím, že s vyšší hodnotou snímkové frekvence úměrně klesala i velikost intenzity pulsu. Zvolených 8 000 fps byla nejvyšší hranice, kdy byla intenzita, tím pádem přesvícení, dostatečná.

Pro 500 fps byla zvolena clona L a pro pořizování záznamu se snímkovou frekvencí 8 000 fps byla zvolena clona O.

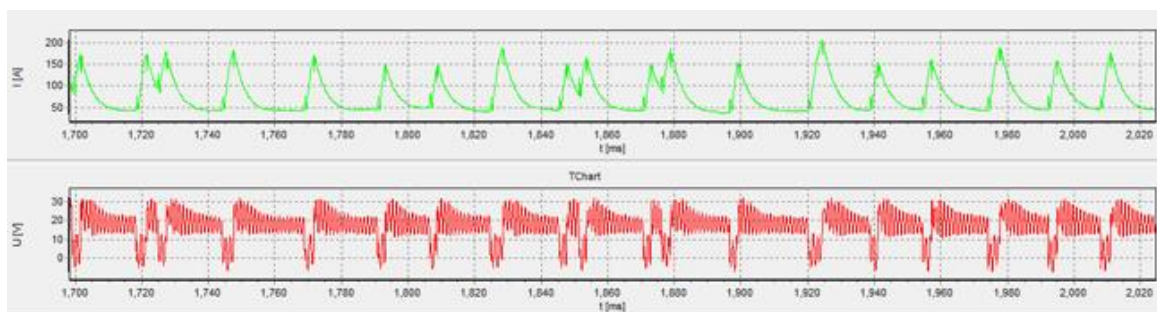
Pro všechny svařovací parametry u zkratového přenosu a všechny parametry u metody IAC byl pořízen záznam vysokorychlostní kamerou jak bez použití laseru, tak s použitím laseru.

4 Výsledky a diskuse

Zkratový přenos a metoda svařování IAC byly zmapovány za různých parametrů. Jednotlivé děje, ke kterým dochází při svařování jak u zkratového přenosu, tak u metody IAC byly vizualizovány a zmapovány.

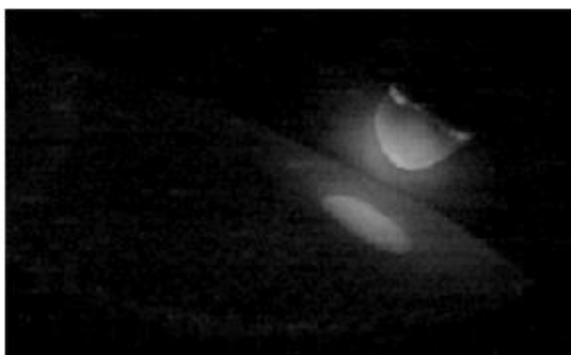
4.1 Zkratový přenos

Průběh svařovacího proudu a napětí při zkratovém přenosu odpovídá teoretickým poznatkům, což bylo zjištěno měřením pomocí Weldmonitoru (viz obrázek 25).



Obrázek 25 Průběh svařovacího proudu a napětí u zkratového přenosu v čase, 74 A, 16,3 V

Nejprve se začne na elektrodě odtavovat postupně větší množství kovu, což je na průběhu proudu znázorněno intervaly mezi jednotlivými vrcholy (obrázek 25, zelená křivka).



Obrázek 26 Zkratový přenos, odtavování kapky kovu,
WFS = 2,5 m/min, TS = 21,4 cm/min



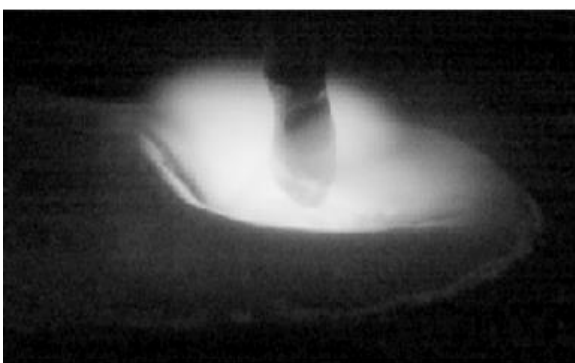
Obrázek 27 Zkratový přenos, odtavování kapky kovu
WFS = 3,3 m/min, TS = 28,2 cm/min



Obrázek 28 Zkratový přenos, odtavování kapky kovu,
WFS = 5,5 m/min, TS = 47 cm/min



Obrázek 29 Zkratový přenos, odtavování kapky kovu,
WFS = 7 m/min, TS = 59,4 cm/min

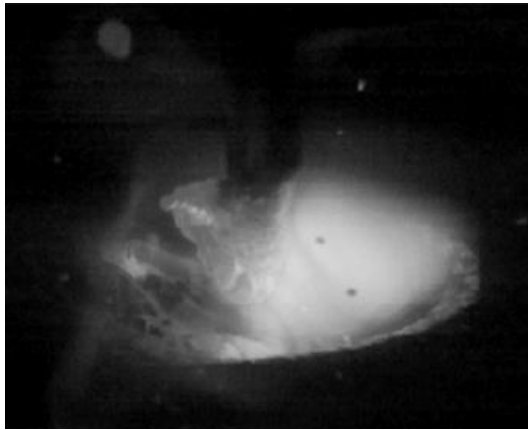


Obrázek 30 Zkratový přenos, odtavování kapky kovu,
WFS = 9,1 m/min, TS = 70 cm/min

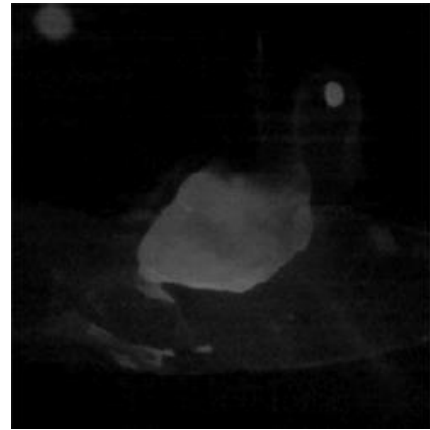
U zkratového přenosu je patrné, že se zvyšujícími se parametry proudu a napětí se samotné odtavování kapky kovu stává dynamičtější. U nízkých parametrů, jako je proud 74 A s napětím 16,3 V, má kapka kovu kulovitý tvar. Její odtavování je postupné. Lze vidět, jak kapka postupně nabývá na objemu. Odtavování je velmi klidné. Okamžik, kdy dojde k dotyku kapky s lázní, je dobře předpověditelný. Svarová lázeň je klidná, má vypouklý charakter, vlny se nevytvářejí. To samé lze říct i o parametrech 95 A, 17,4 V (obrázek 26 a obrázek 27).

U parametrů 138 A, 18 V a 163 A, 19,3 V (obrázek 28 a obrázek 29) je odtavování dynamičtější. Kapka začíná mít oválný charakter a je prodloužená ve směru osy drátu. Okamžik dotyku kapky přídatného materiálu se svarovou lázní nelze predikovat. Ve svarové lázni se začínají vytvářet vlny. Pod kapkou se ve svarové lázni začíná modelovat prohlubeň, což je způsobeno zvýšením parametrů svařování.

U parametrů 209 A a 25,2 V se jedná už o dynamický děj (obrázek 30). Kapka kovu již nemá definovatelný tvar. Nejčastěji se zde objevuje ještě více protáhlý tvar kapky než v předchozích případech, již není tvar kapky pravidelný jako u nižších parametrů. Okamžik dotyku kapky s lázní není možné předpovědět. Nejedná se o pravidelný jev.



Obrázek 31 Zkratový přenos, odraz kapky od lázně,
WFS = 9,1 m/min, TS = 70 cm/min



Obrázek 32 Zkratový přenos, dotyk kapky,
bez oddělení,
WFS = 9,1 m/min, TS = 70 cm/min

Také dochází k dotyku mezi kapkou a svarovou lázní častěji, ovšem ne při každém dotyku dojde ke spojení svarové lázně a kapky. Na obrázku 31 je zachycen moment, kdy se kapka dotkla lázně, odrazila se a ke spojení nedošlo. V tomto momentu může docházet k rozstříku.

Další typický jev pro vyšší parametry je dotyk kapky a svarové lázně bez následného oddělení kapky. V tomto případě oblouk zaniká (obrázek 32). Poté se kapka svarového kovu opět oddělí od svarové lázně, zůstane připevněna k drátu a k oddělení kapky do svarové lázně dojde při jiném dotyku. I tento jev je možný zdroj rozstříku.

Pro vyšší parametry je lázeň vlnitá. Prohlubeň pod odtavujícím se kovem je ještě výraznější. Při dalším zvýšení parametrů lze dosáhnout přechodového přenosu, kde již nebude možné detekovat zkratový přenos.

Při odtavování kapky u všech parametrů je možné vidět mezi kapkou a svarovou lázní světélkující mlhovinu, což je elektrický oblouk. Konkrétně se jedná o částice pohybující se v elektrickém oblouku mezi kapkou a svarovou lázní (obrázek 26 až obrázek 30). Mlhovina při spuštěném záznamu problikává.

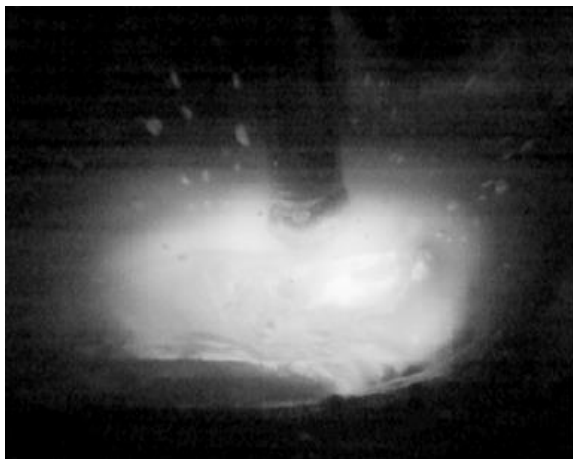


*Obrázek 33 Zkratový přenos, moment před oddělením kapky do svarové lázně,
WFS = 2,5 m/min, TS = 21,4 cm/min*

Po dostatečném zvětšení kapky dochází k dotyku kapky odtavovaného kovu a svarové lázně. Elektrický oblouk zanikne, což je znázorněno na grafu proudu jednotlivými vrcholy (obrázek 25, zelená křivka). Díky tzv. pinch efektu se kapka oddělí do lázně. Obrázek 33 ukazuje moment před oddělením kapky svarového kovu do svarové lázně.

Kapka se dotkne svarové lázně. Ke spojení dojde v celé šířce kapky. Následně se spojení zaškrcuje, viz obrázek 33, až se kapka zcela oddělí. Tento způsob oddělování je typický pro zkratový přenos u svařování metodou MAG.

Po oddělení kapky dochází k opětovnému zažehnutí oblouku, což představuje na záznamu výbuch (obrázek 34 a obrázek 35), a celý proces začíná od začátku opětovným odtavováním kapky. Samotné zažehnutí a výbuch má také velmi podobný charakter pro všechny parametry u zkratového přenosu.



Obrázek 34 Zkratový přenos, moment po oddělení kapky do svarové lázně,
WFS = 9,1 m/min, TS = 70 cm/min



Obrázek 35 Zkratový přenos, moment po oddělení kapky do svarové lázně,
WFS = 3,3 m/min, TS = 28,2 cm/min

Při explozi a opětovném zažehnutí oblouku dochází k oddělování částí natavené elektrody a svarové lázně. Tyto částičky následně odletují do okolí ve formě rozstříku (obrázek 36 a obrázek 37). Rozstřík může být způsoben, jak již bylo zmíněno opětovným zažehnutím oblouku, dotykem a nepropojením kapky se svarovou lázní (obrázek 31) nebo spojením a následným rozpojením kapky přídavného materiálu a svarové lázně (obrázek 32).



Obrázek 36 Zkratový přenos, rozstřík,
WFS = 9,1 m/min, TS = 70 cm/min



Obrázek 37 Zkratový přenos, rozstřík,
WFS = 2,5 m/min, TS = 21,4 cm/min

Při vyšších parametrech je ztráta materiálu zapříčiněná rozstříkem markantnější (obrázek 36) a charakter rozstříku je spíše sprchový. Odletující částice jsou spíše menší a je jich větší počet oproti nižším parametrům, kde jsou částice spíše větších rozměrů a v menším počtu.

Exploze způsobená obnovením hoření elektrického oblouku je doprovázena také jevem, kdy se do okolí uvolní plyn (obrázek 38 a obrázek 39). Jev není pravidelný, ovšem při rozstříku je zde vyšší pravděpodobnost výskytu tohoto jevu. Zde se jedná o ohřátou ochrannou atmosféru, která naakumulovala teplo vzniklé při svařování nebo oblak plazmatu.



Obrázek 38 Zkratový přenos, plyn uvolňující se do okolí,
WFS = 2,5 m/min, TS = 21,4 cm/min



Obrázek 39 Zkratový přenos, plyn uvolňující se do okolí,
WFS = 9,1 m/min, TS = 70 cm/min

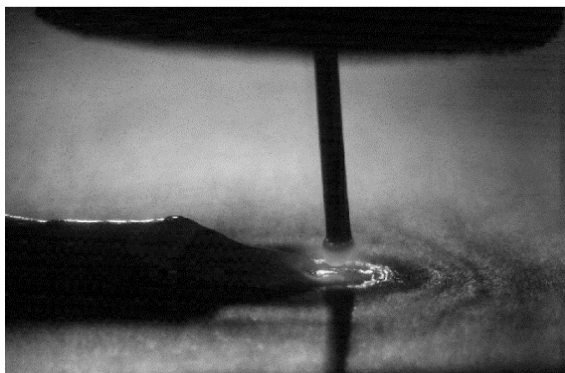
Pro celistvý pohled na zkratový přenos při různých parametrech byly použity snímky, u kterých bylo použito osvětlení pomocí laseru. Na obrázku 40 až obrázku 44 je vidět základní materiál, svarová lázeň, odtavující se elektroda a hořák. Je patrné, že pro nižší parametry svarová lázeň roste více do výšky a pro vyšší parametry je svarová lázeň plošší.



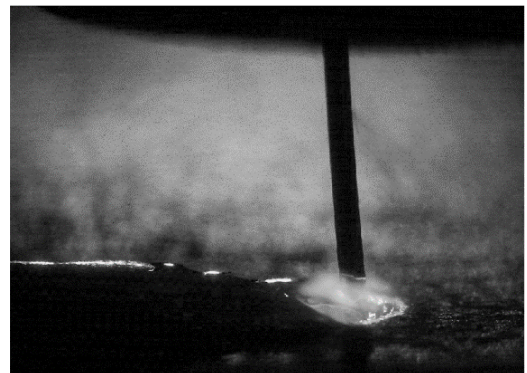
Obrázek 40 Zkratový přenos, odtavování kapky kovu, laser,
WFS = 2,5 m/min, TS = 21,4 cm/min



Obrázek 41 Zkratový přenos, odtavování kapky kovu, laser,
WFS = 3,3 m/min, TS = 28,2 cm/min



Obrázek 42 Zkratový přenos, odtavování kapky kovu, laser,
WFS = 5,5 m/min, TS = 47 cm/min



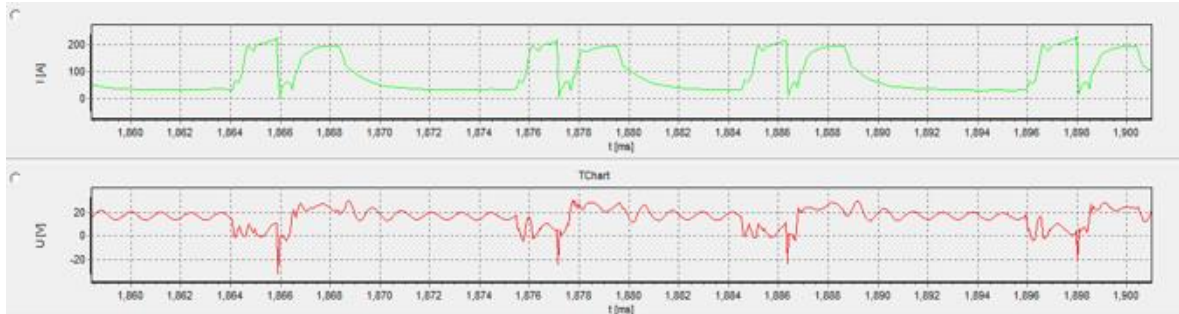
Obrázek 43 Zkratový přenos, odtavování kapky kovu, laser,
WFS = 7 m/min, TS = 59,4 cm/min



Obrázek 44 Zkratový přenos, odtavování kapky kovu, laser,
WFS = 9,1 m/min, TS = 70 cm/min

4.2 Přenos IAC

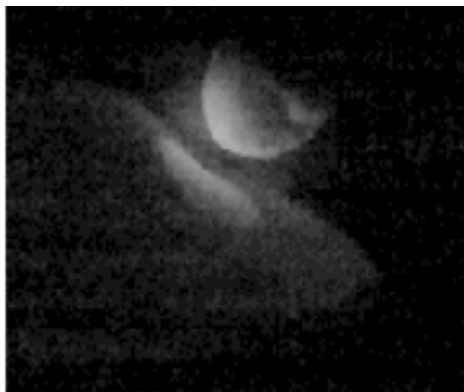
Průběh svařovacího proudu a napětí při svařování metodou IAC odpovídá také teoretickým poznatkům, což bylo zjištěno měřením pomocí Weldmonitoru (obrázek 45).



Obrázek 45 Průběh svařovacího proudu a napětí u metody IAC v čase, 80 A, 16,2 V

Je zde charakteristické snížení a následné zvýšení proudu, které zamezuje rozstříku materiálu. V grafu působí vrchol proudu rozdělen na dvě části (obrázek 46).

U nižších parametrů, což je 74 A, 16,1 V a 80 A, 16,2 V, je postupné narůstání odtavené kapky přídavného materiálu velmi podobné zkratovému přenosu (obrázek 46 a obrázek 47). Kapka je klidná, symetrická. Má kulovitý tvar. Narůstání je plynulé. Svarová lázeň má vypouklý tvar, hladina svarové lázně je klidná.

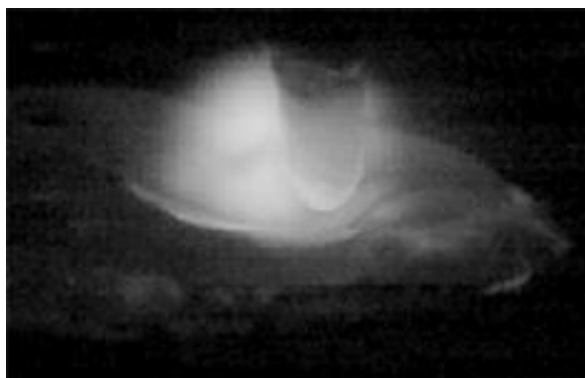


Obrázek 46 IAC, odtavování kapky kovu,
WFS = 2,5 m/min, TS = 21,4 cm/min



Obrázek 47 IAC, odtavování kapky kovu,
WFS = 3,3 m/min, TS = 28,2 cm/min

U 140 A a 17,6 V je odtavování přídavného materiálu velmi podobné zkratovému přenosu s nejvyššími nastavenými parametry, což bylo 209 A a 25,2 V. Odtavovaná kapka má výrazně protáhlý tvar (obrázek 48). Pod kapkou se v lázni vytváří stejně jako u zkratového přenosu u vyšších parametrů prohlubeň. Svarová lázeň je oproti nižším parametrům vlnitá.



*Obrázek 48 IAC, odtavování kapky kovu,
WFS = 5,5 m/min, TS = 47 cm/min*

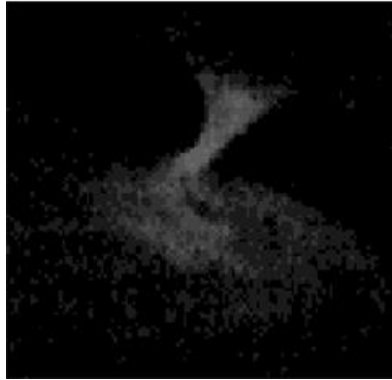
I při svařování metodou IAC je možné vidět na záznamu světélkující mlhovinu, což je elektrický oblouk, který hoří mezi přídavným a základním materiálem (obrázek 49). Tato mlhovina na záznamu problikává.



*Obrázek 49 IAC, odtavování kapky kovu, elektrický oblouk,
WFS = 2,5 m/min, TS = 21,4 cm/min*

Odtavování kapky při metodě IAC je ve všech případech v porovnání s klasickým zkratovým přenosem klidnější. Nedochozí zde k odražení kapky od lázně nebo k spojení kapky se svarovou lázní bez odtržení.

Když se kapka přídavného materiálu zvětší natolik, že dojde k dotyku se svarovou lázní, dojde ke spojení v celé šířce. Následně se spojení stává užší (obrázek 50), až dojde k oddělení kapky do svarové lázně.



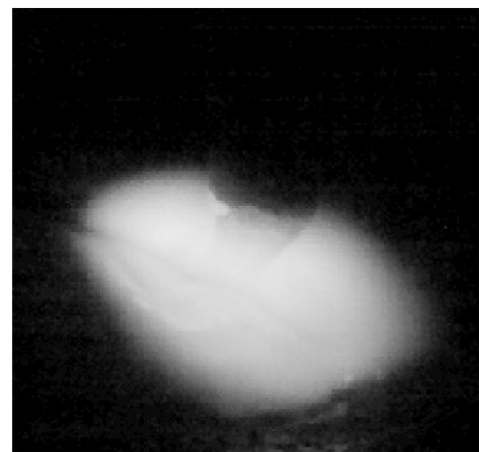
*Obrázek 50 IAC, moment před oddělením kapky do svarové lázně,
WFS = 2,5 m/min, TS = 21,4 cm/min*

Oddělování přídavného materiálu u metody IAC je pro všechny parametry velmi podobné.

Po oddělení kapky přídavného materiálu dochází k opětovnému zažehnutí elektrického oblouku, což je doprovázeno explozí. Zde je rozdíl mezi klasickým zkratovým přenosem a metodou IAC, kdy exploze při zažehnutí elektrického oblouku u zkratového přenosu je neuspořádaná a mohutnější. Zažehnutí oblouku u IAC je uspořádané a méně výrazné (obrázek 51 a obrázek 52).



*Obrázek 51 Zkratový přenos,
moment po oddělení kapky do svarové lázně,
WFS = 2,5 m/min, TS = 21,4 cm/min*



*Obrázek 52 IAC,
moment po oddělení kapky
do svarové lázně,
WFS = 2,5 m/min, TS = 21,4 cm/min*

Kromě exploze je vidět i další charakteristický znak metody IAC, což je absence rozstříku. U zkratového přenosu je rozstřík běžným jevem, který svařování doprovází. U IAC se rozstřík nevyskytuje běžně ani při vyšších parametrech. V případě, že se rozstřík objeví u metody IAC, jedná se spíše o výjimku a částice, které se ve formě rozstříku uvolňují, jsou zanedbatelné.

Uvolňující se ochranná atmosféra nebo oblak plazmatu byly u zkratového přenosu velmi častým jevem při rozstříku. U metody IAC se vyskytovaly stejně sporadicky jako rozstřík.

5 Závěr

V teoretické části práce bylo charakterizováno svařování metodou MAG a přenosy kovu typické pro MAG. Pro vizualizaci a zmapování byl zvolen zkratový přenos, jelikož jeho průběh a jednotlivé fáze jsou velmi dobře definovatelné a jedná se o stabilní přenos.

Svařování MAG s modifikovanou vlnou bylo též charakterizováno. Byli vybráni tři typičtí zástupci, což byla metoda STT, metoda CMT a metoda IAC. U všech těchto metod byl popsán princip a jejich výhody oproti standardnímu MAG svařování. Pro vizualizaci byla zvolena metoda IAC.

Byla popsána metoda stínů jako nejpoužívanější metoda, která se používá pro vizualizaci svařování metodou MAG. Byl přiblížen princip, jakým tento způsob funguje.

Pro účely vizualizace bylo navrženo a sestaveno pracoviště osazené stacionárním svařovacím hořákem, pojezdem vzorku, vysokorychlostní kamerou, nasvícovacím laserovým zařízením a řídicím systémem.

Vizualizace zkratového přenosu a metody IAC byla provedena metodou s protisvětlem a bez přisvícení laserem. Všechny parametry byly nasnímány a vzniklo velké množství dat (cca 330 GB).

Z pořízených záznamů je dobře patrný rozdíl mezi běžným zkratovým přenosem a metodou IAC. Explosivní zapalování oblouku při IAC je na rozdíl od standardního zkratu tlumené a klidnější. Rozstřík je u metody IAC výrazně menší v porovnání s klasickým zkratovým přenosem. Tvar odtavující se kapky kovu při metodě IAC se prodlužuje již při nižších parametrech než u zkratového přenosu, ovšem kapka je stabilnější. U IAC nedochází k vedlejším jevům, které způsobují rozstřík, jako je dotyk kapky se svarovou lázní a její neodtržení, nebo odražení kapky od svarové lázně.

Pro další vizualizaci svařovacího procesu lze doporučit využití dalšího laserového zdroje (nebyl z technických důvodů k dispozici).

Vizualizace pomocí vysokorychlostní kamery se jeví jako velice užitečná nejen pro potřeby výuky, ale i pro optimalizaci procesů svařování a navařování.

Seznam citované literatury

- [1] Svarox.cz, 2016. *Přehled metod tavného svařování* [online]. Plzeň: Svarox Technology [cit. 2021-02-08]. Dostupné z: <http://svarox.cz/wp-content/uploads/P%C5%99ehled-metod-sva%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD.pdf>.
- [2] KOVANDA, Karel, 2018. *Úvod do svařování* [online]. Praha [cit. 2021-02-08]. Dostupné z: <http://u12134.fs.cvut.cz/podklady/MT2/2018%20-%20svarovani.pdf>. Přednáška. ČVUT v Praze, Fakulta strojní.
- [3] KUBÍČEK, Jaroslav, 2006. *Technologie II Část svařování -I* [online]. Brno [cit. 2021-02-15]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/125837213-Technologie-ii-cast-svarovani-1.html>. Syllabus přednášek. Vysoké učení technické v Brně.
- [4] Fronius.com, 2020. *Co je svařování MIG/MAG?* [online]. Praha: Fronius [cit. 2021-02-15]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/cs-cz/czech-republic/perfect-welding/svet-svarovani/svaovn-migmag>.
- [5] ONDREJČEK, P. *Zváranie ocelí v ochrane plynov taviacou sa elektródou*. 1.vyd. Bratislava: Eterna Press. 2003. 204 s. Fyzika Metalurgia Technológia Automatizácia. ISBN 80-968359-5-5.
- [6] MINAŘÍK, V. *Obloukové svařování*. 1. vyd. Praha: Scientia, 2007. 241 s. ISBN 80-01-00345-0.
- [7] ORSZÁGH, P., ORSZÁGH, V. *Zváranie MIG/MAG ocelí a neželezných kovov*. 1. vyd. Bratislava: Vydavateľstvo vedeckej literatury a časopisov, 2000. 460 s. ISBN 80-88780-36-5.
- [8] MORAVEC, Jaromír. *Svařování tavící se elektrodou v ochranném plynu – metody MIG/MAG* [online] dostupné na: <https://docplayer.cz/41120960-Svarovani-tavici-se-elektrodou-v-ochrannem-plynumetody-mig-mag.html>.
- [9] Lincolnelectric.com, 2015. *GMAW Welding Guide* [online]. Cleveland, Ohio, USA: Lincoln electric [cit. 2021-06-08]. Dostupné z: <https://lmaccareercentre.com/Online%20Resources/Welding%20&%20Fitting/Module%2015%20-%20Applying%20the%20GMAW%20Process/GMAW%20Welding%20guide.pdf>.
- [10] Kolektiv autorů. *Technologie svařování a zařízení*. 1. vyd. Ostrava: Zeross, 2001. 395 s. ISBN 80-85771-81-0.

- [11] SUORANTA, Raimo, 2007. *Welding of sheet metal using modified short arc MIG/MAG welding process* [online]. Lappeenranta [cit. 2021-01-26]. Dostupné z: <https://lutpub.lut.fi/bitStream/handle/10024/46902/nbnfi-fe200909012068.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Master's thesis. Lappeenranta University of Technology. Vedoucí práce Jukka Martikainen.
- [12] Millerwelds.com, 2021. *Switch to Modified Short-Circuit MIG (RMD®) to Significantly Improve Welding Productivity* [online]. Appleton, Wisconsin, USA: Millerwelds [cit. 2021-07-25]. Dostupné z: <https://www.millerwelds.com/resources/article-library/switch-to-modified-short-circuit-mig-to-significantly-improve-welding-productivity>.
- [13] CZ WELD, 2008. *STT-PRVNÍ ZDROJ S ŘÍZENÝM ZKRATOVÝM PŘENOSEM* [online]. Medlešice: CZ WELD [cit. 2021-01-22]. Dostupné z: http://www.czweld.cz/oc_stt.htm.
- [14] CZ WELD, 2008. *INVERTEC STT II* [online]. Medlešice: CZ WELD [cit. 2021-01-22]. Dostupné z: http://www.czweld.cz/z_stt2.htm.
- [15] Technický týdeník, 2006. *Nový standard ve svařovací technice Proces CMT (Cold Metal Transfer)* [online]. Praha: Technický týdeník [cit. 2021-07-25]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/novy-standard-ve-svarovaci-technice-proces-cmt-cold-metal-transfer_10667.html.
- [16] Fronius.com, 2017. *Brožura CMT* [online]. Praha: Fronius [cit. 2021-07-25]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/cs-cz/czech-republic/hledat?searchedBU=#!/searchconfig/%7B%22searchword%22%3A%22CMT%22%2C%22dateStart%22%3Anull%2C%22dateEnd%22%3Anull%2C%22countryPath%22%3A%22%2Fsitecore%2Fcontent%2FCzech%20Republic%22%2C%22language%22%3A%22cs-CZ%22%2C%22token%22%3A%22kqvxdq4g0fu71zx1nzst%22%2C%22activeDepartment%22%3Anull%2C%22initialSearch%22%3Atrue%7D>.
- [17] Migatronic.com, 2020. *Intelligent Arc Control* [online]. Teplice: Migatronic [cit. 2021-06-08]. Dostupné z: <https://www.migatronic.com/cz/produkty-a-reseni/svarovaci-funkce/intelligent-arc-control-iac/>.
- [18] Automig.cz. *IAC™ Intelligent Arc Control-proces pro snižování rozstříku a vneseného tepla při zkratovém přenosu* [online]. Teplice: Migatronic [cit. 2021-06-08]. Dostupné z: <http://automig.cz/o-svarovani/funkce/iactm-intelligent-arc-control/>.

- [19] ERIKSSON, Ingemar, 2013. *High speed imaging analysis of laser welding* [online]. Luleå [cit. 2021-01-26]. Dostupné z: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:991791/FULLTEXT01.pdf>. Doctoral Thesis. Luleå University of Technology.
- [20] RATTO, Hernan, 1996. *Visualisation study of metal transfer in gas metal arc welding (GMAW)* [online]. Wollongong [cit. 2021-01-26]. Dostupné z: <https://ro.uow.edu.au/theses/2531/>. Master of Engineering (Hons.) thesis. University of Wollongong.
- [21] BÁLSAMO, Paulo S. S., Américo SCOTTI, Louriel O. VILARINHO a Márcio VILELA, 2000. Development of an experimental technique for studying metal transfer in welding: synchronised shadowgraphy. *International Journal for the Joining of Materials* [online]. **12**(1), 12 [cit. 2021-01-15]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/265199823_Development_of_an_experimental_technique_for_studying_metal_transfer_in_welding_Synchronised_shadowgraphy.
- [22] *FASTCAM SA-Z: Hardware manual*, 2013. Revision 1.00 USEU. Tokyo.
- [23] Eizo.cz, © 2021. In: *HDR detailně – co je HDR?* [online]. Praha: EIZO Corporation [cit. 2021-06-08]. Dostupné z: <https://www.eizo.cz/poznatky-z-praxe/vedomosti-o-monitorech/hdr-detailne-co-je-hdr/>.
- [24] *CAVILUS Smart: Operating Manual*, 2018. Tampere.
- [25] Kjellberg-trading.com, 2018. *Sigma Galaxy* [online]. Teplice: Migatronic [cit. 2021-06-08]. Dostupné z: <https://kjellberg-trading.com/userFile/5889>.
- [26] Esvarovani.cz, © 2021. *Traktor svařovací WELDYPAR PRO pro MIG/MAG* [online]. Liberec: Artweld [cit. 2021-06-08]. Dostupné z: <https://www.esvarovani.cz/produkt/86182-traktor-svarovaci-weldypar-pro-pro-mig-mag>.
- [27] Austadpro.com/, 2011. *Neutral Density Filters and Graduated ND Filters* [online]. New Jersey NJ: Austadpro [cit. 2021-06-08]. Dostupné z: <http://www.austadpro.com/blog/neutral-density-filters-and-graduated-nd-filters/>.

Seznam obrázků

Obrázek 1 Princip svařování MAG [2].....	9
Obrázek 2 Schéma přenosu svarového kovu [3].....	11
Obrázek 3 Schéma zkratového přenosu [3].....	11
Obrázek 4 Průběh impulsního přenosu v čase [5].....	13
Obrázek 5 Průběh proudu a napětí metody STT v čase [13].....	16
Obrázek 6 Pohyb drátu při svařování CMT [16].....	19
Obrázek 7 Porovnání průběhu proudu IAC a MAG v čase [18].....	20
Obrázek 8 Jeden snímek ze záznamu cválajícího koně [19].....	22
Obrázek 9 Princip metody stínů s nasvícením laserem, konfigurace laser proti kaměře [21].....	24
Obrázek 10 Závislost intenzity na čase [19].....	24
Obrázek 11 Závislost intenzity na vlnové délce [19].....	25
Obrázek 12 Vysokorychlostní kamera FASTcam SA-Z [22].....	26
Obrázek 13 Zadní strana Kamery [22].....	27
Obrázek 14 Přední strana kontrolní jednotky laseru [24].....	28
Obrázek 15 Laserová jednotka [24].....	29
Obrázek 16 Ukončení optického kabelu [24].....	29
Obrázek 17 Software pro ovládání laseru [24].....	30
Obrázek 18 Svařovací zdroj Sigma Galaxy [25].....	31
Obrázek 19 Ovládací panel svařovacího zdroje.....	31
Obrázek 20 Svařovací traktor WELDYCAR [26].....	32
Obrázek 21 Uspořádání pracoviště.....	33
Obrázek 22 Hliníková konstrukce.....	34
Obrázek 23 Kryt, filtry a objektiv kamery (AF-S Micro NIKKOR 60 mm F/2.8G ED, Nikon).....	35
Obrázek 24 Vztah pro výpočet plochy průřezu svaru.....	38
Obrázek 25 Průběh svařovacího proudu a napětí u zkratového přenosu v čase, 74 A, 16,3 V.....	41
Obrázek 26 Zkratový přenos, odtavování kapky kovu, WFS = 2,5 m/min, TS = 21,4 cm/min.....	41
Obrázek 27 Zkratový přenos, odtavování kapky kovu, WFS = 3,3 m/min, TS = 28,2 cm/min.....	41

Obrázek 28 Zkratový přenos, odtavování kapky kovu, WFS = 5,5 m/min, TS = 47 cm/min	42
Obrázek 29 Zkratový přenos, odtavování kapky kovu, WFS = 7 m/min, TS = 59,4 cm/min	42
Obrázek 30 Zkratový přenos, odtavování kapky kovu, WFS = 9,1 m/min, TS = 70 cm/min	42
Obrázek 31 Zkratový přenos, odraz kapky od lázně, WFS = 9,1 m/min, TS = 70 cm/min	43
Obrázek 32 Zkratový přenos, dotyk kapky, bez oddělení, WFS = 9,1 m/min, TS = 70 cm/min	43
Obrázek 33 Zkratový přenos, moment před oddělením kapky do svarové lázně, WFS = 2,5 m/min, TS = 21,4 cm/min	44
Obrázek 34 Zkratový přenos, moment po oddělení kapky do svarové lázně, WFS = 9,1 m/min, TS = 70 cm/min	45
Obrázek 35 Zkratový přenos, moment po oddělení kapky do svarové lázně, WFS = 3,3 m/min, TS = 28,2 cm/min	45
Obrázek 36 Zkratový přenos, rozstřík, WFS = 9,1 m/min, TS = 70 cm/min	45
Obrázek 37 Zkratový přenos, rozstřík, WFS = 2,5 m/min, TS = 21,4 cm/min .	45
Obrázek 38 Zkratový přenos, plyn uvolňující se do okolí, WFS = 2,5 m/min, TS = 21,4 cm/min	46
Obrázek 39 Zkratový přenos, plyn uvolňující se do okolí, WFS = 9,1 m/min, TS = 70 cm/min	46
Obrázek 40 Zkratový přenos, odtavování kapky kovu, laser, WFS = 2,5 m/min, TS = 21,4 cm/min	47
Obrázek 41 Zkratový přenos, odtavování kapky kovu, laser, WFS = 3,3 m/min, TS = 28,2 cm/min	47
Obrázek 42 Zkratový přenos, odtavování kapky kovu, laser, WFS = 5,5 m/min, TS = 47 cm/min	47
Obrázek 43 Zkratový přenos, odtavování kapky kovu, laser, WFS = 7 m/min, TS = 59,4 cm/min	47
Obrázek 44 Zkratový přenos, odtavování kapky kovu, laser, WFS = 9,1 m/min, TS = 70 cm/min	47
Obrázek 45 Průběh svařovacího proudu a napětí u metody IAC v čase, 80 A, 16,2 V	48

Obrázek 46 IAC, odtavování kapky kovu, WFS = 2,5 m/min, TS = 21,4 cm/min.....	48
Obrázek 47 IAC, odtavování kapky kovu, WFS = 3,3 m/min, TS = 28,2 cm/min.....	48
Obrázek 48 IAC, odtavování kapky kovu, WFS = 5,5 m/min, TS = 47 cm/min.....	49
Obrázek 49 IAC, odtavování kapky kovu, elektrický oblouk, WFS = 2,5 m/min, TS = 21,4 cm/min.....	49
Obrázek 50 IAC, moment před oddělením kapky do svarové lázně, WFS = 2,5 m/min, TS = 21,4 cm/min.....	50
Obrázek 51 Zkratový přenos, moment po oddělení kapky do svarové lázně, WFS = 2,5 m/min, TS = 21,4 cm/min.....	50
Obrázek 52 IAC, moment po oddělení kapky do svarové lázně, WFS = 2,5 m/min, TS = 21,4 cm/min.....	50

Seznam tabulek

Tabulka 1 Data ze svařování CMT	37
Tabulka 2 Zvolené hodnoty pro svařování metodou IAC.....	37
Tabulka 3 Výsledné zvolené hodnoty pro svařování metodou IAC	38
Tabulka 4 Výsledné hodnoty pro zkratový přenos	39