

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA STROJNÍ  
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

TECHNOLOGIE NAVAŘOVÁNÍ ELEKTRICKÝM OBLOUKEM  
V OCHRANNÝCH ATMOSFÉRÁCH

TECHNOLOGY OF ARC CLADDING DEPOSITS WITH SHIELD GASES

AUTOR: Filip Trnka

STUDIJNÍ PROGRAM: Výroba a ekonomika ve strojírenství

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Karel Kovanda Ph.D. IWE

PRAHA 2018

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Trnka** Jméno: **Filip** Osobní číslo: **457274**  
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:

**Technologie navařování elektrickým obloukem v ochranných atmosférách**

Název bakalářské práce anglicky:

**Technology of arc cladding deposits with shield gases**

Pokyny pro vypracování:

Popis technologie navařování 3D struktur.  
Problematika navařování metodou MIG/MAG.  
Technologické přístupy.  
Návrh experimentu - měření parametrů při navařování, vyhodnocení geometrie návaru.  
Vyhodnocení - porovnání procesů přenosu kovu.  
Závěr - zhodnocení výsledků a doporučení.

Seznam doporučené literatury:

- IAC Intelligent Arc Control proces pro snižování rozstříku a vneseného tepla při zkratovém přenosu. Automig [online].
- KOLAŘÍK, Ladislav, Jan SUCHÁNEK a Marie KOLAŘÍKOVÁ. Navařování metodou WAAM. MM Průmyslové spektrum. 2018.
- BRAJER, J. 3D Technologie letem světem. MM Průmyslové spektrum. 2018.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

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

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

Platnost zadání bakalářské práce: **10.08.2018**



Ing. Karel Kovanda, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce



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



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

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

**4.4.5.2018**  
Datum převzetí zadání

  
Podpis studenta

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně, a to výhradně s použitím pramenů a literatury, uvedených v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne: .....

.....

Podpis

## Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou navařování 3D struktur metodou MIG/MAG. Jedná se o aditivní způsob výroby označován zkratkou WAAM. Při navařování hrají důležitou roli jednotlivé návarové housenky, zejména jejich rozměry a stabilita. Cílem této práce je porovnání různých druhů přenosů kovu a možností svařovacího zdroje technologie MIG/MAG. Výsledkem porovnání bude zhodnocení jejich vhodnosti pro technologii WAAM.

## Klíčová slova

Aditivní výroba, elektrický oblouk, návarová housenka, proud, napětí, teplo, stabilita geometrie

## Abstract

This paper focuses on 3D structure cladding using GMAW method. This technology is called Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM). WAAM is one of Additive Manufacturing (AM) technologies. During GMAW cladding, individual clad beads have significant influence on the final structure shape, mainly their dimensions and stability. The aim of this paper is to compare different metal transfers and the abilities of a GMAW source. The result of comparison is to evaluate the suitability for WAAM technology.

## Keywords

Additive manufacturing, electric arc, clad bead, current, voltage, heat, stability of geometry

## Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu práce Ing. Karlu Kovandovi Ph.D. IWE za cenné rady, věcné připomínky, pomoc při provádění experimentu a čas a trpělivost, které mi v nemalé míře věnoval při zpracovávání této bakalářské práce. Rovněž bych rád poděkoval společnosti Robert Bosch České Budějovice s.r.o. za poskytnutí kapacit měřícího zařízení pro experimentální část.

## Seznam zkratek

3D	Trojrozměrný
MIG	Metal Inert Gas, technologie svařování elektrickým obloukem v inertním plynu
MAG	Metal Active Gas, technologie svařování elektrickým obloukem v aktivním plynu
GMAW	Gas Metal Arc Welding, souhrnné označení pro MIG/MAG
AM	Additive Manufacturing, aditivní způsob výroby
WAAM	Wire and Arc Additive Manufacturing
PM	Přídavný materiál
ZM	Základní materiál
CNC	Computer Numeric Control, číslicové řízení
CAD	Computer Aid Design
BTF	Buy-to-fly poměr, poměr využití materiálu
SLM	Selective Laser Melting, metoda AM
EBM	Electric Beam Melting, metoda AM
DMLS	Direct Metal Laser Sintering, metoda AM
DMD	Direct Metal Deposition, metoda AM
LC	Laser Consalidation, metoda AM
LD	Laser Deposition, metoda AM
IAC	Intelligent Arc Control, modifikovaný přenos kovu
CMT	Cold Metal Transfer, modifikovaný přenos kovu

# Obsah

1. Úvod.....	11
2. Popis technologie navařování 3D struktur .....	12
2.1. Důvod vzniku technologie.....	13
2.2. Další technologie AM .....	15
2.3. Přednosti WAAM .....	16
2.3.1. Vstupní a provozní náklady .....	16
2.3.2. Otevřená platforma .....	17
2.3.3. Operativnost metody .....	17
2.3.4. Vysoké využití materiálu.....	17
2.3.5. Výkon odtavení.....	18
2.4. Úskalí WAAM .....	18
2.4.1. Výrobní čas .....	18
2.4.2. Vnesené teplo a zbytková pnutí .....	18
2.4.3. Mechanické vlastnosti .....	19
2.4.4. Přesnost .....	19
2.4.5. Obětovaný podklad .....	19
2.5. Komerční řešení .....	20
2.5.1. WAAM 3D tiskárny .....	20
2.5.2. Hybridní obráběcí stroje .....	21
3. Problematika navařování metodou MIG/MAG .....	22
3.1. Geometrie návarových housenek.....	22
3.1.1. Vliv proudu a rychlosti podávání drátu .....	23
3.1.2. Vliv napětí.....	23
3.1.3. Vliv rychlosti navařování.....	23



3.1.4.	Vliv ochranné atmosféry .....	23
3.1.5.	Vliv jakosti povrchu.....	24
3.1.6.	Vliv sklonu hořáku .....	24
3.1.7.	Vliv předehřevu .....	24
3.2.	Materiály vhodné pro navařování metodou MIG/MAG.....	25
3.3.	Matematické modely housenek .....	26
4.	Technologické přístupy metody MIG/MAG.....	27
4.1.	Zkratový přenos/Krátký oblouk .....	29
4.2.	Přechodový oblouk/Kapkový přenos.....	30
4.3.	Sprchový přenos .....	30
4.4.	Impulzní přenos .....	31
4.5.	Rotující oblouk .....	31
4.6.	Modifikované přenosy .....	32
4.6.1.	Intelligent Arc Control (IAC™).....	32
4.6.2.	Cold metal transfer (CMT) .....	34
4.6.3.	coldArc.....	35
5.	Návrh experimentu.....	37
5.1.	Popis pracoviště a vybavení.....	37
5.2.	Svařovací zdroj .....	37
5.2.1.	DUO plus.....	38
5.3.	Výběr vhodných metod.....	38
5.4.	Podmínky experimentu.....	38
6.	Vyhodnocení experimentu .....	40
6.1.	Vizuální posouzení .....	40
6.2.	Porovnání podle parametrů zdroje.....	44

6.3. Porovnání průběhů proudu .....	48
6.4. Měření geometrie návarových housenek.....	52
7. Závěr .....	59
8. Citované zdroje.....	61
9. Seznam obrázků.....	66
10. Seznam tabulek .....	68
11. Seznam grafů .....	68
12. Seznam příloh .....	68

## 1. Úvod

Aditivní způsoby výroby, anglicky Additive Manufacturing (AM) se staly technologií slibující snížení nákladů na výrobu součástí díky snížení odpadního materiálu a zkrácení času od návrhu k hotovému výrobku. AM je alternativou konvenčním způsobům výroby obráběním, a to zejména u součástí vyrobených z drahých materiálů jakými jsou například slitiny titanu a hliníku. Výroba součástí pomocí AM probíhá rozdělením 3D modelu do jednotlivých vrstev, do kterých je pak materiál přidáván. [1-3]

Systém AM se skládá z kombinace pohybového systému, zdroje tepla a přídavného materiálu. [4] Pohybovým systémem může být robotické rameno, nebo CNC portál. [1] Jako zdroj tepla lze použít laser, elektronový paprsek nebo elektrický oblouk. [3, 4] Jako přídavný materiál lze zvolit kovový prášek, nebo drát. [3, 4, 5] Díky tomu vzniklo mnoho metod AM jako je selective laser melting (SLM), electron beam melting (EBM), nebo wire and arc manufacturing (WAAM). [3, 5]

Metoda WAAM využívá jako zdroj tepla elektrický oblouk ze svařovacího zdroje a jako přídavný materiál drát. V porovnání s ostatními metodami AM je WAAM méně náročná z hlediska investičních a provozních nákladů. Metoda je vhodná pro výrobu součástí větších rozměrů jednodušších tvarů, které by bylo obtížné dosáhnout jinými způsoby. [2, 4, 5]

WAAM najde uplatnění zejména v leteckém a kosmickém průmyslu, kde požadavky na snížení hmotnosti vedou ke konstrukci odlehčených součástí z drahých slitin, jejichž výroba konvenčním způsobem má za následek vysoký BTF (buy-to-fly) poměr. [1, 4, 6]

Cílem této práce bude porovnání různých procesů přenosu kovu svařovacího MAG zdroje, z hlediska tvaru návarových housenek, jejich velikostí a parametrů změřených během navařování.

## 2. Popis technologie navařování 3D struktur

Technologie navařování elektrickým obloukem v ochranných atmosférách spočívá ve využití MIG/MAG nebo TIG svařovací technologie pro výrobu součástí. Součásti jsou vyráběny tvorbou a následným vrstvením a skládáním návarových housenek. Návarové housenky vznikají odtavováním přídavného materiálu ve formě drátové elektrody pomocí elektrického oblouku. Housenky jsou navařovány a vrstveny po obrysu požadovaného tvaru. Manipulaci se svařovacím hořákem zajišťuje zpravidla robotické rameno, nebo CNC portál. Pohyb robotického ramene, nebo CNC portálu zajistí přesnou polohu svařovacího hořáku vůči navařované struktuře dle nastaveného programu. [1, 4, 6]

Technologii lze využít k výrobě nových součástí, nebo k renovaci součástí stávajících. V případě výroby nové součásti je první vrstva návarových housenek a navařena na rovinnou desku z daného materiálu, která tvoří jakousi základnu pro návary. Další vrstvy návaru jsou vytvářeny vrstvením těchto housenek na sebe, popřípadě vedle sebe, pokud je nutné dosáhnout například širší stěny. Tímto způsobem můžeme vytvářet rozličné finální struktury a tvary podle CAD předlohy. Dokončená součást je pak z desky odříznuta a její funkční plochy následně obrobena. [1, 7]

V případě renovace jsou housenky navařovány na součást v místě opotřebení a následně obrobena pro dosažení požadovaného tvaru součásti.

Technologie se řadí mezi aditivní způsoby výroby, additive manufacturing (AM). Technologie AM spočívají v přidávání materiálu pouze v místech potřebných pro výrobu součástí. Na rozdíl od konvenčního způsobu výroby obráběním tak nabízí mnohem vyšší využití materiálu a nižší náklady. [4]

Technologii je označována jako WAAM (Wire and Arc Additive Manufacturing). Jedná se o velmi inovativní a flexibilní způsob výroby. [8]

## 2.1. Důvod vzniku technologie

Technologie aditivní výroby vznikly zejména kvůli hraničním možnostem dnešních CNC obráběcích center a snížení výrobních nákladů.

Výroba součástí aditivní technologií se vyplatí zejména v případě, kdy je při konvenčním způsobu výroby nevýhodný poměr mezi hmotností polotovaru a hmotností součásti. Tento poměr se nazývá BTF (buy-to-fly) poměr. V tomto případě pak může aditivní způsob výroby přinést značnou úsporu materiálu a tím také snížit náklady s ním spojené. Technologie WAAM navařuje materiál pouze v místech potřebných pro vznik součásti, odpad pak vzniká pouze z obrábění funkčních ploch součásti. [1, 4, 7]

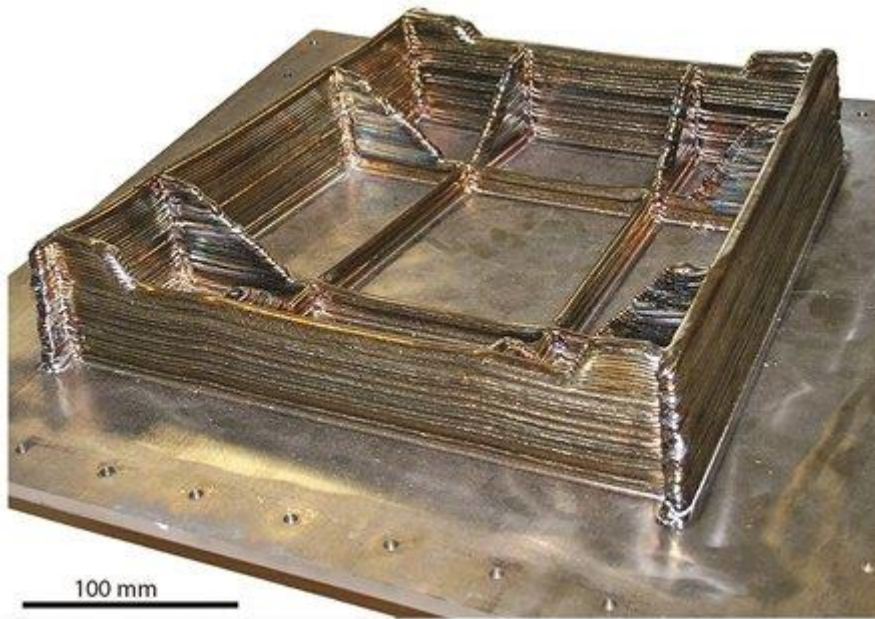
Technologii WAAM je vhodné využít i v případě, kdy jsou náklady na materiál velmi vysoké a je tedy zapotřebí maximalizovat jeho využití.

Ve spojitosti s technologií WAAM se nejčastěji hovoří s jejím využitím v leteckém a kosmickém průmyslu. Zejména potom k výrobě rozměrných součástí z drahých materiálů jako jsou slitiny hliníku, nebo titanu. [4, 6]

WAAM je rovněž vhodný k rychlé výrobě prototypových součástí, anglicky Rapid prototyping. Pomocí navařování lze vytvořit prototyp s požadovanou geometrií a mechanickými vlastnostmi ve velmi krátkém čase a s výraznou úsporou materiálu. [8]

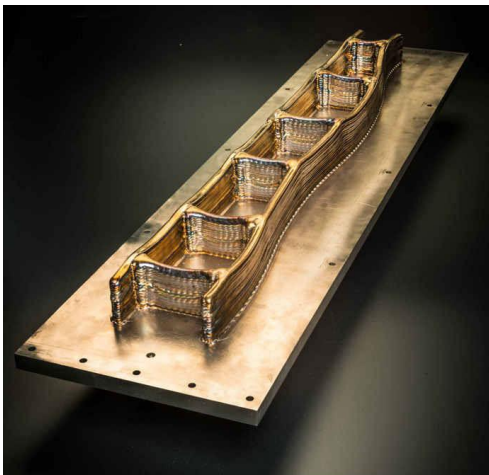
Možnosti WAAM bude nejlepší ukázat na příkladech.

Na obrázku číslo 1 je součást z podvozku letadla zhotovená ze slitiny Ti-6Al-4V. Hmotnost hotové součásti je 24 kg. Díky použití WAAM bylo ušetřeno 220 kg materiálu. Součást má po obrobení funkčních ploch hmotnost 21 kg. BTF poměr u WAAM je 1,15, zatímco u obrábění 11,6. Vzhledem k vysoké ceně slitiny Ti-6Al-4V se jedná o výrazné snížení nákladů.



Obrázek 1 - Součást podvozku letadla vyráběná metodou WAAM [4]

Součást na obrázku číslo 2 je výztuha křídla letadla zhotovená ze slitiny Ti-6Al-4V. Délka součásti je 1,2 m.



Obrázek 2 - Výztuha křídla letadla [6]



Obrázek 3 - Jízdní kolo vyrobené technologií WAAM [9]

WAAM lze využít i pro tvorbu nosných struktur. Na obrázku č. 3 je jízdní kolo jehož rám byl vyroben touto technologií.

## 2.2. Další technologie AM

Technologie AM lze rozdělit podle polohovacího systému, zdroje tepla, typu přídavného materiálu a způsobu jeho dodávání. Přídavným materiálem může být buď kovový prášek, nebo drát. V případě použití prášku existují dva způsoby dodávání. Prvním z nich je Powder Bed System, kdy je prášek sypaný v jednotlivých vrstvách po celé pracovní ploše stroje a následně je na vybraných místech spékán elektronovým, nebo laserovým paprskem. Druhým z nich je Powder Feed System, kdy je prášek dodáván hubicí na místo, kde dochází ke spékání.

V případě použití drátu je drát přiváděn pomocí podavačů a následně je odtavován. Jako zdroj tepla může sloužit laser, elektronový paprsek, plasma, nebo elektrický oblouk. Tento způsob je označován jako Wire Feed System.

Metody Powder Feed System jsou například Selective Laser Melting (SLM), Electron Beam Melting (EBM) a Direct Metal Laser Sintering (DMLS). Metody Powder Feed System jsou Direct Metal Deposition (DMD), Laser Consolidation (LC), Laser Deposition (LD). [3]

Práškové metody AM umožňují vytvářet součásti velmi složitých geometrií. Omezeny jsou velikostí součásti, rychlostí výroby, zpravidla 2-10 g/min a vysokými náklady. [3, 5, 7]

Kovové prášky mohou také znamenat jisté zdravotní riziko pro obsluhu výrobních zařízení.

Oproti tomu systémy založené na přídavném materiálu ve formě drátu přinášejí výhody nižších nákladů, vyšší rychlostí výroby (50-130 g·min<sup>-1</sup>) a možností výroby větších součástí. Nevýhodou je nižší přesnost výroby. [3, 7]

## 2.3. Přednosti WAAM

Technologie WAAM má celou řadu předností, které mohou vést k jejímu dalšímu využití a rozšíření.

### 2.3.1. Vstupní a provozní náklady

Pořizovací a provozní náklady WAAM jsou ve srovnání s jinými metodami AM (SLM, DMD, EBM) výrazně nižší. Základní WAAM vybavení je svařovací zdroj, podavače a hořák (700 000,- Kč), šestiosý robot (1 000 000,- Kč) a upínací nástroje (100 000,- Kč). Doplnkovým zařízením mohou být nezbytné bezpečnostní prvky. Takovéto zařízení poslouží k navařování ocelí a hliníkových slitin. V případě navařování titanových slitin je nutné opatřit pracoviště o systém, který bude zajišťovat ochranu plynem po dobu navařování. Pracoviště je možno doplnit ještě o další manipulátory, nebo více zdrojů a robotů.

Provozní náklady pak tvoří náklady na přídavný materiál, ochrannou atmosféru, spotřebovanou energii a odpisy. Svařovací dráty jsou běžně dostupné, na rozdíl od kovových prášků používaných u jiných metod AM. [4]

Pracoviště je možné vždy použít ke svařování.



Obrázek 4 - Příklad pracoviště WAAM [10]



### 2.3.2. Otevřená platforma

Pro WAAM lze použít svařovací zdroj od jakékoliv výrobce a kombinovat ho s vhodným polohovadlem. Jedinou povinností je zajištění komunikace mezi svařovacím zdrojem a robotem. [4]

### 2.3.3. Operativnost metody

Mezi hlavní přednosti technologie patří zcela jistě její operativnost. Můžeme tak vyrábět výrobky velmi rozdílných tvarů a velikostí na stejném zařízení. Dále nám otevírá zcela nové možnosti tvarů a konstrukce součástí, které byly doposud považovány za obtížně vyrobitelné. Součástí je vhodné navrhnout přímo s ohledem na možnosti aditivní technologie.

Výhodou je také rychlost zavedení výroby. Čas potřebný k dokončení výroby od jejího návrhu lze tak velmi snížit.

Velikost součástí je limitována pouze dosahem robotického ramene a polohovadel. Pomocí jednoduchých pojezdů, tak lze docílit dosahu až několika metrů a vyrábět rozměrné součásti. [1, 8]

### 2.3.4. Vysoké využití materiálu

Využití materiálu může být v některých případech až 100 %, obvykle ovšem dosahuje 80-90 %. Technologie WAAM navařuje materiál pouze v místech potřebných pro výrobu dané součásti, nebo struktury. Díky tomu dojde k poklesu nákladů na materiál a tím i na výrobu součásti jako celku. Úspora bude markantní zejména u tvarově různorodých součástí, kde se střídají malé a velké průřezy stěn. Výroba takové součásti obráběním by vyžadovala velkého polotovaru. Při využití technologie WAAM tak může úspora dosahovat až desítek procent. Významný pokles nákladů nastane i v případě, kdy je součást vyráběna z drahého materiálu.

Technologie WAAM také umožňuje již při výrobě umísťovat přímo do součásti různé senzory, nebo podobně jako u odlitek zálitky, například ve formě vnitřních závitů. Je ovšem nutné jejich umístění zohlednit při výrobě a upravit tak pohyb hořáku, aby nedošlo ke změně požadované geometrie. [1, 4, 7]

### 2.3.5. Výkon odtavení

Vysoký výkon odtavení materiálů umožňuje vyrábět rozměrné součásti v přijatelném čase. Výkon odtavení pro oceli a hliníkové slitiny se pohybuje v rozmezí od  $1 \text{ kg}\cdot\text{hod}^{-1}$  do  $4 \text{ kg}\cdot\text{hod}^{-1}$ . Lze dosáhnout i vyššího výkonu odtavení ( $10 \text{ kg}\cdot\text{hod}^{-1}$ ), ale dojde ke zhoršení geometrie součásti, což vyžaduje výrazné obrábění. To zvyšuje poměr BTF a proces se stává méně atraktivním z ekonomického hlediska. Výkon odtavení  $1 \text{ kg}\cdot\text{hod}^{-1}$  pro hliníkové slitiny a  $3 \text{ kg/hod}$  zajistí poměr BTF od 1,5 což maximalizuje úsporu nákladů. [4]

### 2.4. Úskalí WAAM

Úskalí spočívá hned v několika aspektech. K těmto aspektům, respektive k jejich závažnosti je třeba přistupovat s ohledem na konstrukci, náklady na materiál, náklady na zařízení, požadovanou jakost a sériovost výroby.

#### 2.4.1. Výrobní čas

Doba potřebná k výrobě součásti technologií WAAM může být dlouhá. Celkový čas závisí na objemu kovu, který je třeba navařit k výrobě dané součásti a v rychlosti navařování. Zejména u objemnějších součástí může výroba trvat i několik hodin. Proto je technologie WAAM nevhodná pro hromadnou výrobu, nebo výrobu příliš objemově náročných součástí ve větších sériích. Dlouhá doba výroby by pak mohla znamenat vyšší náklady než náklady ušetřené úsporou materiálu. [4]

#### 2.4.2. Vnesené teplo a zbytková pnutí

Značné množství tepla spojené s obloukovými zdroji vede stejně jako při svařování k negativnímu ovlivnění materiálu. Vlivem chladnutí součásti vzniká značné zbytkové pnutí, které může vést k deformacím. Nejvýraznější pnutí je ve směru navařování. Deformace je nejvýraznější na podkladu.

Deformace podkladu lze omezit symetrickým navařováním z obou stran podkladu. Navařovat lze střídavě na jednu a následně na opačnou stranu podkladu. Vzniklá pnutí na obou stranách se tak vyrovnají. Touto strategií byla navařena součást na obrázku č. 1. [4]

#### 2.4.3. Mechanické vlastnosti

Součást vyrobená metodou WAAM bude mít také rozdílné mechanické vlastnosti než ta, která byla vyrobená konvenčně. Tyto vlastnosti ale nemusí být vždy horší. Mechanické vlastnosti součásti by měly být stejné, jako mechanické vlastnosti svarového kovu. [3, 1]

Ke zlepšení mechanických vlastností lze využít zvláštní režim válcování jednotlivých vrstev. Válcováním lze snížit vnitřní pnutí až na polovinu. [1,4]

#### 2.4.4. Přesnost

Dalším úskalím je přesnost výroby. Technologie WAAM nedosáhne přesnosti technologie obrábění. Jednotlivými návarovými housenkami nelze docílit zcela rovného povrchu. Vliv na přesnost má stabilita procesu navařování a s ní spojená tvarová stabilita housenek. [5, 11]

Funkční plochy součásti jako jsou například díry, pouzdra pro ložiska, nebo dosedací plochy, je třeba po navaření obrobit. Těmto aspektům je třeba přizpůsobit konstrukci součásti a nevyžadovat vysokou přesnost v místech která nemají vliv na funkci součásti. [5]

#### 2.4.5. Obětovaný podklad

Podklad, na který navařování probíhá může, ale nemusí být součástí navařovaného výrobku. V případě že podklad není součástí je třeba z něj po dokončení navařování součást odřezat. Podklad a první vrstvy návaru tak znamenají odpad. Aby bylo možné podklad znovu použít bylo by třeba z něj obrobit zbytek návaru a případně narovnat. To bylo ekonomicky nevýhodné. [4]

Výzkumné práce ovšem ukazují jednodušší způsob oddělení návaru od podkladu pomocí uražení například Charpyho kladivem. Možnosti uražení je docíleno vytvořením oxidických vrstev na povrchu podkladu, například oxidu hlinitého a minimalizací závaru první vrstvy. První housenka pak není s podkladem pevně spojena a lze ji snadněji oddělit. [13]

## 2.5. Komerční řešení

Technologie WAAM je spojena především s použitím a spojením univerzálních zařízení do jednoho komplexu. Je třeba zajistit správnou komunikaci mezi jednotlivými komponenty. Kromě těchto univerzálních řešení vznikají i komplexní komerční řešení.

### 2.5.1. WAAM 3D tiskárny

3D tiskárny založené na technologii WAAM přináší výhodu rychlé výroby funkčních kovových součástí. Za tradiční metody 3D tisku jsou považovány metody SLM, EBM, nebo DMLS. Oproti těmto 3D tiskárnám nabízí WAAM tiskárny nižší provozní náklady a rychlejší rychlosti výroby. Velkou výhodou je také snadná dostupnost přídavných materiálů. Nevýhodou je nižší přesnost. Oproti univerzálním řešením mají komerční tiskárny omezený manipulační prostor, kterým je limitována i maximální velikost součástí.

Příkladem tohoto řešení je tiskárna Value Arc MA5000-S1 od japonské společnosti MUTOH Industries. [14]



Obrázek 5 - tiskárna Value Arc MA5000-S1 [14]

### 2.5.2. Hybridní obráběcí stroje

Hybridní obráběcí stroje kombinují technologii WAAM s technologií obrábění. Jednotlivé vrstvy jsou vždy zarovnány frézováním. Další housenky jsou tak navařovány na přesně definovanou geometrii. Díky této kombinaci lze docílit zvýšené přesnosti oproti pouhému navařování. Příkladem tohoto stroje je Weldprint 5AX od jihočeské společnosti Kovosvit MAS ze Sezimova Ústí. Stroj byl vyvíjen ve spolupráci s Výzkumným centrem pro strojírenskou techniku a technologii – RCMT, z Fakulty Strojní ČVUT v Praze. [15]



Obrázek 6 - Weldprint 5AX [15]

### 3. Problematika navařování metodou MIG/MAG

Problematika navařování metodou MIG/MAG spočívá zejména ve stabilitě hořícího oblouku a teplotní stabilitě celého procesu. Proces hoření oblouku můžeme rozdělit na 3 fáze. První fází je zapálení oblouku. V této fázi dochází k vysokému nárůstu proudu, ale ZM není v tuto chvíli nataven. Dojde k natavení velkého množství PM a k výskytu studeného spoje. Návarová housenka bude na jejím počátku vyšší a širší.

Po ustálení hořícího oblouku dochází k jeho stabilnímu hoření. V této fázi je vytvářena návarová housenka se stabilním tvarem v závislosti na zvolených parametrech, přenosu a materiálu. V konečné třetí fázi, kdy dochází ke zhasnutí oblouku dochází ke snížení návarové housenky. [15]

#### 3.1. Geometrie návarových housenek

Tvar jednotlivých návarových housenek má zásadní vliv na geometrii výsledné struktury. Struktura je tvořena jednotlivými vrstvami a řadami návarových housenek. Je tedy žádoucí, aby housenky měly co možná nejpravidelnější tvar, to znamená housenky o konstantní šířce a výšce. Naprosto ideálních housenek je ovšem v reálném případě velmi složité dosáhnout. [11, 12, 16]

Zároveň je důležité co možná nejvíce zamezit rozstříku, který působí negativně ekonomicky, jako nevyužitý, ztracený materiál a zároveň mohou kapičky rozstříku ulpít v dráze budoucí návarové housenky a tím způsobit nestabilitu. [17]

Nestabilita jednotlivých housenek bude negativně ovlivňovat celkovou geometrii vytvářené struktury, a to zejména s narůstajícím počtem vrstev. Nedokonalosti jednotlivých housenek se budou s přibývajícím počtem vrstev sčítat. Při navařování metodou MIG/MAG se nestabilita objevuje při zapalování a zhasínání oblouku. Je tedy nutné počítat s tím, že funkční plochy součásti je třeba zhotovit s dostatečným přídavkem na obrábění.

Na geometrii housenek a tím i navařované struktury mají vliv zejména navařovací parametry a zvolený proces přenosu kovu. Navařovací parametry mají na geometrii návarových housenek shodný vliv, jako svařovací parametry při svařování. [16, 18]

### 3.1.1. Vliv proudu a rychlosti podávání drátu

Navařovací proud a rychlost podávání drátu jsou závislé a přímo úměrné parametry. Při zvyšování proudu tedy musí docházet i ke zvýšení rychlosti podávání drátu a naopak. Proud má vliv zejména na celkový výkon odtavování elektrody. Při zvýšení proudu dojde k nárůstu množství nataveného kovu, proto je potřeba zvýšit také rychlost podávání drátu. Proud má vliv také na hloubku závaru do ZM, která s jeho zvyšováním roste.

Při zvyšování proudu a rychlosti podávání drátu dochází ke zvětšování návarových housenek, roste jejich šířka i výška. [15, 16, 18]

### 3.1.2. Vliv napětí

Navařovací napětí určuje délku oblouku hořícího mezi elektrodou a ZM. Délka oblouku je vzdálenost mezi svarovou lázní a elektrodou v okamžiku tavení PM. Při zvýšení napětí dojde k prodloužení hořícího oblouku. Delší oblouk vede k rozšíření a snížení návarových housenek při zapojení na přímou polaritu. Napětí nemá vliv na hloubku závaru. [15, 18]

### 3.1.3. Vliv rychlosti navařování

Zásadní vliv na geometrii návarových housenek má také rychlost navařování, respektive rychlost posuvu hořáku. Rychlost navařování má vliv jak na stabilitu, tak rozměry housenek. Zvýšením rychlosti navařování můžeme vytvářet housenky s menším průřezem vlivem menšího množství nataveného materiálu na jednotku délky. S vyšší rychlostí dochází k nižšímu závaru. V kombinaci s vyššími parametry proudu a napětí tak můžeme dosáhnout vyšší produktivity a zkrátit výrobní časy.

Při vyšší rychlosti navařování může docházet k nestabilnímu hoření oblouku vlivem nedostatečného přísunu PM. To může vést k nerovnoměrnému průřezu housenek po jejich délce. Zároveň je třeba brát ohled na dostatečný průtok ochranné atmosféry. V případě volby vysoké rychlosti navařování je třeba brát ohled na volbu vhodné ochranné atmosféry. [16]

### 3.1.4. Vliv ochranné atmosféry

Při volbě ochranné atmosféry je třeba brát ohledy zejména na navařovaný materiál a doporučení výrobce. Je třeba zvolit vždy nejvhodnější ochrannou atmosféru, aby bylo zajištěno stabilní hoření oblouku a ochrana návaru proti tvorbě oxidických vrstev. Zejména citlivé jsou hliníkové a titanové slitiny vzhledem k vysoké afinitě ke kyslíku. Oxidické vrstvy by

znamenalý značný problém ve struktuře navařované součásti. Došlo by k degradaci materiálu, zhoršení jeho mechanických vlastností a také změně geometrie v místech jejich vzniku.

Kromě složení ochranné atmosféry je třeba dbát i na dostatečný průtok plynu. V případě nízkého průtoku by se k vytvářeným návarům mohla dostat vzdušná atmosféra. To by opět vedlo k tvorbě oxidů a pórů. Příliš vysoký průtok plynu je neekonomický.

Ochrannou atmosféru je třeba zvolit v závislosti na materiálu, parametrech navařování a procesu přenosu. [19]

#### 3.1.5. Vliv jakosti povrchu

Při navařování je potřebné zajistit kovově čistý povrch, na který navařování probíhá. Čistý povrch je třeba zajistit jak na podkladovém materiálu, tak i na jednotlivých návarových housenkách. Základní desku je tedy nutné kvalitně očistit například tryskáním, nebo broušením.

Jakost povrchu návarů je třeba zajistit vhodnými navařovacími parametry, ochrannou atmosférou a jejím dostatečným průtokem a například i různými přípravky zajišťující ochranu plynem i při tuhnutí materiálu. [4]

#### 3.1.6. Vliv sklonu hořáku

Na tvar housenek má vliv také sklon hořáku ve směru navařování. Sklon má vliv zejména na poměr výšky a šířky návaru. Při sklonu hořáku ve směru navařování, tedy při tažném způsobu, budou housenky vyšší a užší, s nižší hloubkou závaru. Při tlačném způsobu budou housenky nižší a širší. [16, 20]

#### 3.1.7. Vliv předehřevu

Předehřev materiálu působí na tvar a stabilitu návarových housenek. Rozdílné teploty v různých místech podkladu mohou způsobit proměnný tvar housenky. V případě, že bude teplota podkladu nízká, bude housenka užší a vyšší s nepravidelnými okraji. Pokud bude teplota podkladu příliš vysoká, svarová lázeň bude proudit náhodně a tvar housenek nemůže být kontrolována. [8]



### 3.2. Materiály vhodné pro navařování metodou MIG/MAG

U volby materiálů, které je možné navařovat metodou MIG/MAG je nutné vybírat z materiálů, které jsou svařitelné a které se vyrábějí ve formě drátového PM. Metoda MIG/MAG je vhodná pro širokou škálu materiálů. Je možné navařovat uhlíkové, nízkolegované a korozivzdorné oceli, hliníkové slitiny, slitiny mědi, NiCr slitiny a slitiny titanu.

Ve spojitosti s navařováním je pozornost směřována hlavně k dražším, nebo špatně obrobitelným materiálům. Zejména se jedná o materiály využívané v leteckém průmyslu jako jsou hliníkové a titanové slitiny.

Slitiny hliníku a titanu jsou velmi náchylné k tvorbě oxidů při kontaktu se vzdušnou atmosférou. Slitiny titanu je třeba navařovat impulzním obloukem a chránit Argonem o čistotě 4.8. Při teplotách nad 400 °C se při kontaktu s kyslíkem na povrchu vytvoří vrstva oxidu titaničitého. Slitiny titanu je nutné chránit ochrannou atmosférou, dokud jejich teplota neklesne pod 400 °C. [1, 3, 4]

### 3.3. Matematické modely housenek

Pro přesnější celkovou geometrii a vyšší využití potenciálu technologie WAAM je třeba se zabývat definováním matematických modelů tvaru průřezu návarových housenek a vytvořit ideální model jejich překrývání. [2, 7]

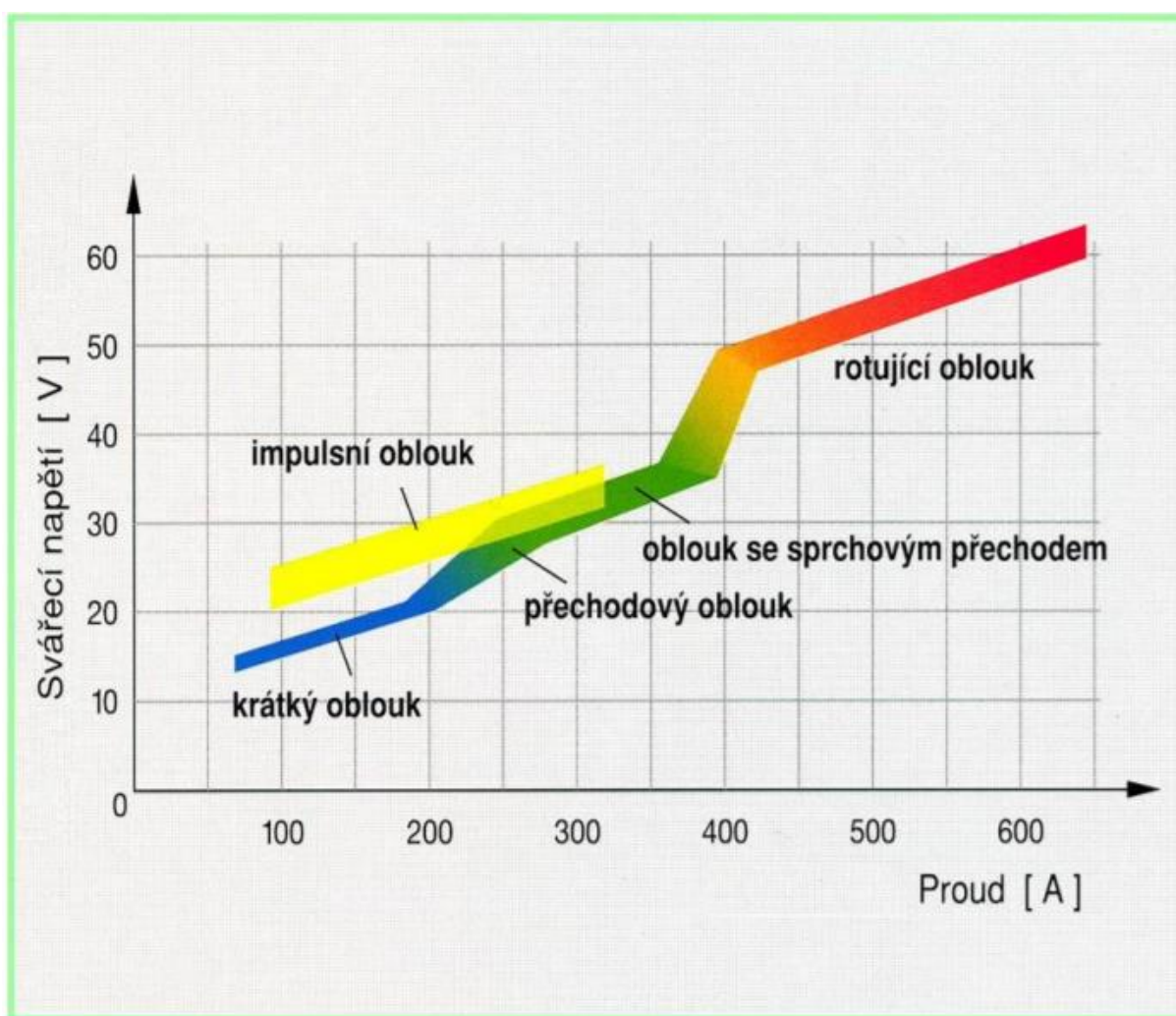
Současné studie ukazují proložení tvaru návarové housenky různými matematickými funkcemi tak, aby rozdíl mezi grafem funkce a skutečnou geometrií byl minimální. Přesné formulování těchto modelů by mohlo vést k vytvoření systému, který by na základě parametrů dokázal generovat a předpovídat tvar housenek. Díky tomuto systému by bylo možné přesně simulovat proces navařování. [2]

S geometrií jednotlivých housenek souvisí i jejich vzájemné překrývání. Ideálním případem je takové překrytí, které zajistí rovinnou plochu. Vytvoření matematického modelu překrývání housenek by mohlo vést ke stanovení ideální vzdálenosti mezi jednotlivými housenkami pro dané parametry, aby došlo k ideálnímu překrytí. [7]

Vytvoření takových modelů vyžaduje vysoký počet pokusů navařování housenek při různých parametrech, jejich přesné měření a následné vyhodnocování například regresní analýzou. Pokud by se podařilo vytvořit dostatečně přesný matematický model, mohlo by dojít ke zvýšení přesnosti výroby technologií WAAM a tím by se ještě více zvýšilo využití materiálu.

#### 4. Technologické přístupy metody MIG/MAG

Jako technologické přístupy můžeme označit různé metody přenosu kovu mezi elektrodou a základním materiálem nebo navařovanou součástí. Přenos kovu znamená roztavení přídavného materiálu a přechod do navařovaných housenek. Mezi tyto metody patří zkratový, kapkový a sprchový přenos, dále pak impulzní, rotující oblouk a jejich modifikace. Charakter přenosu kovu je ovlivněn parametry, a to zejména proudem, rychlostí podávání drátu a napětím. Přehled přenosů v závislosti na proudu a napětí jsou znázorněny na obrázku č. 7. Dále mají na charakter přenosu vliv také zvolená ochranná atmosféra, navařovaný materiál a průměr drátu.



Obrázek 7 - Přehled rozsahu parametrů pro jednotlivé přenosy [22]

Pro navařování je důležité posoudit vhodnost metody přenosu kovu. Základními kritérii jsou stabilita hořícího oblouku a množství vneseného tepla. Dalšími kritérii mohou být například množství přeneseného kovu, poměr výšky a šířky návarových housenek, nutnost použití jiné ochranné atmosféry a celkové provozní náklady.

Stabilita oblouku úzce souvisí s mírou rozstříku přídavného materiálu. Vzniká dynamickým účinkem odtavené kapky na svarovou/návarovou lázeň. Vlivem dopadu odtavené kapky do ještě neztužlého kovu tak dojde k jeho rozstříknutí do nejbližšího okolí. Rozstřík může vznikat také při opětovném zapalování oblouku. Jedná se o nežádoucí jev, který může při navařování vznikat a je nutno jej minimalizovat. Rozstřík totiž znamená nejen zvýšenou spotřebu přídavného materiálu, ale také možnost vzniku nestabilní geometrie návaru vlivem ulpění kapiček rozstříku v dráze budoucího návaru. Z hlediska stability oblouku je také nutné zajistit, aby oblouk v průběhu navařování nezhasínal. [17]

Množství vneseného tepla závisí na základních parametrech proudu, napětí a na rychlosti navařování. Lze jej určit z následujícího vztahu, kde za  $\eta$  můžeme dosadit hodnotu 0,8, což je hodnota doporučená normou ČSN EN ISO 1011 pro metodu MIG/MAG. Se zvyšujícím se množstvím vneseného tepla se prodlužuje doba ztuhnutí návaru, zvyšuje se riziko negativního ovlivnění materiálu a rozšiřuje se tepelně ovlivněná oblast. [17, 23]

$$Q = \frac{U \cdot I \cdot \eta}{v_{sv}} \quad [23]$$

Pro navařování je nutné minimalizovat množství vneseného tepla. Důvodem je nutnost rychlého ztuhnutí návaru, aby nedocházelo ke ztékání ještě roztaveného kovu v nežádoucím směru, nebo roztavení předchozích vrstev návaru. Dalším důvodem je možnost negativního vlivu tepla materiál, může docházet ke vzniku pórů. Příliš vysoké množství vneseného tepla a s tím spojená široká tepelně ovlivněná oblast, může také způsobit výrazné deformace při ztuhnutí návaru. [5, 8, 12]

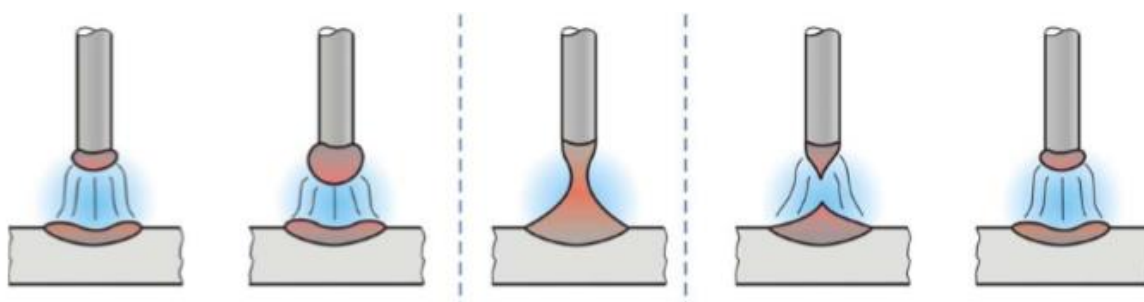
#### 4.1. Zkratový přenos/Krátký oblouk

Zkratový přenos je základní druh přenosu přídavného materiálu mezi elektrodou a základním materiálem. Při hoření oblouku se z elektrody odtaví kapka kovu, která následně vyplní mezeru mezi elektrodou a ZM. V okamžiku vyplnění mezery tak dojde k elektrickému zkratu. Vlivem zkratu se zvýší teplota a dojde k odtržení kapky a dopadu do návarové lázně. Po odtržení kapky dojde k opětovnému zapálení oblouku. Hořící oblouk je přerušován krátkými pravidelnými zkraty, ke kterým dochází při kontaktu elektrody s taveninou. Frekvence zkratů se pohybuje v rozmezí 20 až 200 Hz v závislosti na zvolených navařovacích parametrech.

Ke zkratovému přenosu dochází při nižších proudových hustotách. Spodní hranici proudu určují zpravidla možnosti svařovacího zdroje, zde se můžeme pohybovat kolem 40 A. Horní hranicí pro zkratový přenos je 180 až 190 A. Hodnota svařovacího napětí se pohybuje v rozmezí 14 až 22 V.

Při zvyšování navařovacího napětí dochází ke snižování frekvence zkratů a zároveň se zvyšuje velikost odtavených kapek. Větší kapky způsobují větší rozstřík. Vzhledem k nižším proudovým hustotám bude hodnota vneseného tepla relativně nízká. Navařovaný kov tak rychle tuhne, dochází k minimální deformaci návarů a ovlivnění materiálu.

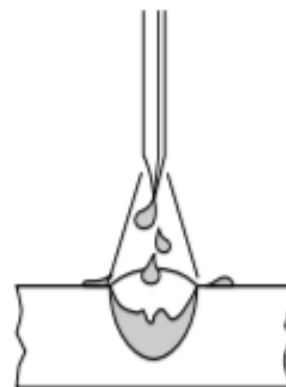
Značnou výhodou je, že zkratový přenos zvládnou všechny svařovací zdroje pro metodu MIG/MAG. Není potřeba dalšího zvláštního vybavení, nebo komplexních a drahých zdrojů. Při zkratovém přenosu lze rovněž použít libovolnou ochrannou atmosféru. [17, 19, 21, 22, 24]



Obrázek 8 - Schéma průběhu Zkratového přenosu, zleva: hoření oblouku, tvorba kapky kovu, zkrat, oddělení kapky a opětovné zapálení oblouku [24]

#### 4.2. Přejímový oblouk/Kapkový přenos

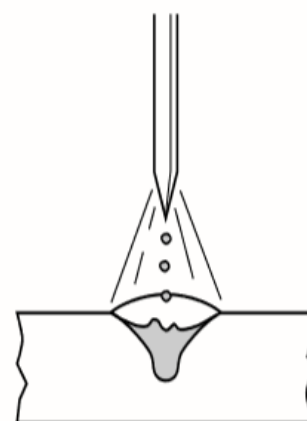
K přejímovému kapkovému přenosu dochází mezi přenosem zkratovým a sprchovým. Proud se pohybuje v rozmezí od 190 A do 260 A a při napětí 22 až 28 V. Při tomto přenosu je konec elektrody nataven do velké kapky, jejíž velikost může být větší, než je průměr elektrody. Oblouk hoří s nepravidelnými zkraty. Kapkový přenos má vysoký výkon odtavení, ale dochází k tvorbě nerovnoměrných a hrubých housenek. Zároveň dochází k výraznějšímu rozstříku než u zkratového přenosu a zvyšuje se i množství vneseného tepla. [20, 22]



Obrázek 9 - Schéma kapkového přenosu [19]

#### 4.3. Sprchový přenos

Sprchový přenos je charakterizován výrazně vyšší proudovou hustotou než zkratový přenos. Proud se pohybuje v rozmezí od 220 A až do horní hranice možností zdroje, nebo do 500 A, a napětím od 28 do 40 V. Při takto vysokých proudových hodnotách nedochází k tvorbě velkých kapek, ale tvoří se malé kapky s vysokou frekvencí 150 až 300 Hz, které jsou odtaveny ještě před kontaktem s taveninou. Tyto malé kapičky jsou přenášeny prouděním horkého plazmatu mezi elektrodou a základním materiálem. K přenosu kovu tak dochází sprchově a bez zkratů. Oblouk tak hoří velmi stabilně a nedochází k téměř žádnému rozstříku. Výkon odtavení sprchovým přenosem je velmi vysoký, zároveň ale dochází ke vnesení velkého množství tepla. [19, 20, 22]



Obrázek 10 - Schéma sprchového přenosu [19]

#### 4.4. Impulzní přenos

Impulzní přenos, nebo také impulzní oblouk je speciální druh přenosu materiálu mezi elektrodou a základním materiálem. Impulzní oblouk spočívá ve střídání, pulzování, hodnot navařovacího proudu a napětí. Toto pulzování je řízeno mikroprocesorem svařovacího zdroje. Při hoření impulzního oblouku probíhají dvě fáze.

První je fáze základního proudu  $I_G$ . Jejím úkolem je udržování stabilního hoření oblouku a zároveň předehřívání základního a přídavného materiálu. Hodnota základního proudu se pohybuje v rozmezí od 25 A do 80 A v závislosti na průměru elektrody.

Druhou fází je impulzní proud  $I_P$ . Při impulzní fázi dojde k výraznému zvýšení proudu až do oblasti sprchového přenosu. V této fázi dochází k přenosu materiálu mezi elektrodou a základním materiálem. Přenos probíhá bezzkratově a kontrolovaně. Doba trvání impulzní fáze je 1,5 až 3,0 ms.

Frekvence průběhu impulzní fáze se pohybuje od 25 Hz do 500 Hz. Kromě frekvence impulzů, je svařovacím zdrojem řízen i tvar průběhu proudu. Množství odtaveného materiálu je tak závislé na frekvenci impulzů.

Impulzní přenos se vyznačuje vysokým výkonem odtavení jako sprchový přenos, ale množství vneseného tepla je výrazně nižší. Při fázi základního proudu totiž dochází k ochlazení návaru i jeho okolí. Zároveň při impulzním přenosu nedochází k rozstříku materiálu. Pomocí velikosti impulzů lze také řídit hloubku závaru. [19, 22]

#### 4.5. Rotující oblouk

Rotujícího oblouku je bezzkratový, vysoce výkonný přenos mezi elektrodou a základním materiálem. Rotujícího oblouku lze dosáhnout vysokými proudy v rozmezí od 450 A do 650 A a napětím od 50 V do 65 V. Přenos kovu je uskutečňován intenzivním magnetickým polem, které roztáčí natavený konec elektrody. Odtavující se kov tak přechází na základní materiál ve formě kuželovité plochy vytvářené rotačním pohybem oblouku. Při tomto přenosu lze dosáhnout hlubokého a širokého závaru. Množství vneseného tepla je však vzhledem k parametrům velmi vysoké a je nutné použití dražších ochranných atmosfér s nízkým obsahem  $\text{CO}_2$  s přídavkem He a/nebo  $\text{O}_2$ . [22]

## 4.6. Modifikované přenosy

Kromě běžných metod přenosu kovu mezi elektrodou a základním materiálem, nabízí dnešní moderní svařovací zdroje i pokročilé funkce, které pomáhají snížit množství vneseného tepla a omezit rozstřík. Tyto speciální funkce, byly vytvořeny modifikacemi některé z běžných metod přenosu. Použití těchto funkcí při navařování by tak mohlo být velmi přínosné. [25]

Popis některých těchto funkcí je v následujících kapitolách.

### 4.6.1. Intelligent Arc Control (IAC™)

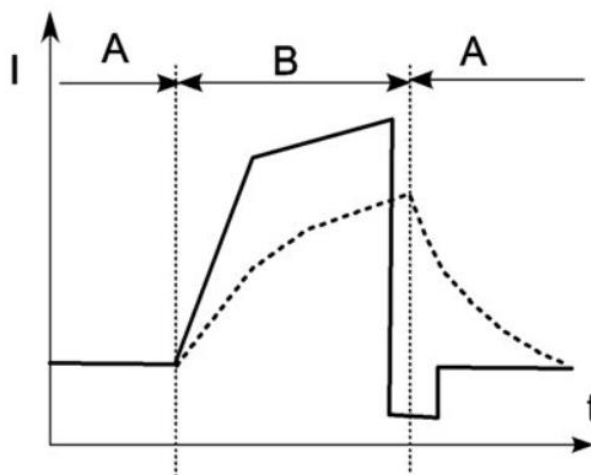
Intelligent Arc Control (zkráceně IAC™), v překladu Inteligentní řízení oblouku je technologie vyvinutá společností Migatronic za účelem kontroly svařovacího oblouku při zkratovém přenosu a minimalizaci vneseného tepla. Jedná se o modifikaci řízení zkratového přenosu.

Technologie IAC™ vznikla zejména kvůli problémům s vytvářením kořenových vrstev svarů, svarových spojů s velkou mezerou, nebo špatně připravené svarové plochy kde vlivem nerovnoměrnosti velikosti kapek svarového kovu dochází k velkému rozstříku. Problémem je také vysoká citlivost na nestálou vzdálenost mezi hořákem a základním materiálem, sklon hořáku, velikost mezery a riziko propálení základního materiálu. Cílem vývoje IAC™ bylo tyto problémy eliminovat.

Systém IAC™ je založen na měření parametrů hořícího oblouku a jejich rychlým vyhodnocením. Výsledkem vyhodnocení je úprava parametrů rychlými zásahy během svařovacího procesu. Proces IAC™ během hoření oblouku modeluje a optimalizuje jednotlivé fáze.

IAC™ zasahuje do procesu zkratového přenosu výrazným navýšením proudu v okamžiku zkratu. Samotné navýšení proudu by ovšem vedlo k vyššímu rozstříku. IAC™ tak pomocí algoritmů předpovídá kdy dojde k oddělení kapky nataveného kovu z elektrody. V návaznosti na předpověď poté zkracuje dobu trvání zkratového proudu. Porovnání průběhu proudu při běžném zkratu a při zásahu IAC™ je zobrazen na obrázku č. 11. Čárkovanou čarou je zobrazen průběh běžného zkratu, plnou čarou pak průběh proudu IAC™. [17, 25, 26]

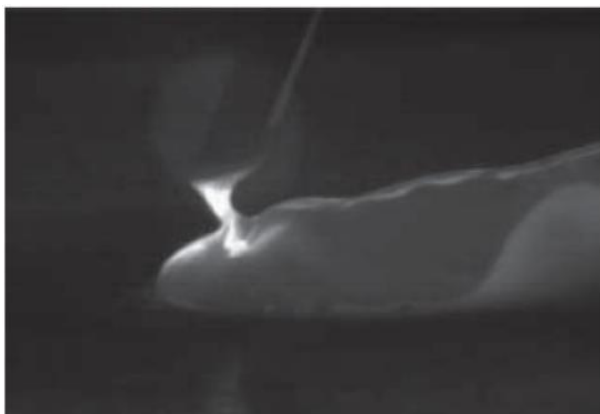




Obrázek 11 - Rozdíl v teoretickém průběhu proudu u IAC (plná čára) a zkratu (tečkovaná čára) [17]

Z obrázku je patrné, že při běžném zkratovém přenosu stoupá hodnota proudu až do okamžiku oddělení kapky, následuje pozvolný pokles proudu až do dalšího zkratu. Při IAC™ stoupá hodnota proudu na vyšší úroveň než při běžném zkratovém přenosu. Těsně před oddělením kapky dojde k poklesu proudu na nízkou úroveň, zároveň však musí být zajištěna stabilita procesu. Snížením proudu je zajištěna eliminace rozstříku. Po oddělení kapky dojde k mírnému navýšení proudu, aby byla opět zajištěna stabilita hoření oblouku.

Na obrázku č. 13 je zachycen okamžik těsně před oddělením kapky a opětovné zapálení oblouku při použití IAC™ obrázek č. 12.



Obrázek 13 - Okamžik oddělení kapky [17]



Obrázek 12 - Okamžik opětovného zapálení oblouku [17]

IAC™ nabízí tvorbu velmi hladkých a stabilních housenek s nízkým množstvím vneseného tepla. Díky tomu je IAC™ vhodnou technologií pro navařování. Funkcí IAC™ disponují zdroje Migatronic řady Sigma Galaxy. [17,26]

#### 4.6.2. Cold metal transfer (CMT)

Cold metal transfer (CMT) je technologie „studeného“ svařovacího procesu, vyvinutého společností Fronius. Jedná se o modifikovaný zkratový přenos, s velmi stabilním obloukem a přesnou regulací procesu u všech materiálů. CMT nabízí tvorbu velmi stabilních návarových housenek, bez výskytu rozstříku. Důvodem je mechanické zachycení a zastavení délky oblouku. Oblouk tak může zůstat stabilní bez ohledu na povrch svařence, nebo v našem případě povrch návarů, bez ohledu na rychlost svařování. Výsledkem jsou stabilní a hladké housenky. U ocelí umožňuje CMT zvýšit svařovací rychlost až o 50 %, u slitin hliníku lze svařovat až 10x rychleji. [25, 28, 29, 30]

CMT bylo původně vyvinuto jako technologie pro svařování hliníkových slitin, tvorbu svarových spojení mezi ocelí a hliníkem a svařování tenkých plechu do 0,3 mm. [27, 29]

Modifikace zkratového procesu CMT spočívá ve zpětném pohybu svařovacího drátu. Zpětný pohyb zajišťuje servomotor ve speciálním CMT hořáku. Pomocí digitální regulace procesu umí rozpoznat kontakt mezi svarovou lázní a koncem elektrody. Při kontaktu dojde ke zkratu. Při detekci zkratu dojde k zatažení drátu. Zpětný pohyb drátu podpoří uvolnění kapky kovu, a to s frekvencí až 130 Hz. Během oddělení kapky dojde ke kontrolovanému snížení proudu téměř až na nulovou hodnotu. Díky tomuto snížení je minimalizován rozstřík. Společnost Fronius uvádí proces CMT jako zcela bezrozstříkový způsob přenosu. Po oddělení kapky je svařovací proud opět navýšen a tím je zajištěno jeho stabilní hoření. Rozstřík se při svařování ocelí snižuje o 99 %, stejně se snižuje při svařování v ochranném plynu CO<sub>2</sub>. [28]

CMT je nazýváno studeným procesem z důvodu minimálního vneseného tepla při svařování. Díky mechanickému oddělování kapek přídavného materiálu pomocí zpětného pohybu drátu dochází jen k velmi nízkému vnesení tepla. Důvodem je, že hodnota proudu je stále udržována na nízké hodnotě. Generování tepla během hoření oblouku je omezeno jen na velmi krátkou dobu. U ocelí tak lze snížit množství vneseného tepla až o 50 %, u hliníkových slitin dokonce o 90 %. [29, 30] Průběh jednotlivých fází procesu CMT je zobrazen na obrázku č. 14.



Obrázek 14 – Průběh fází procesu CMT [29]

Kvůli zpětnému pohybu drátu, který je zajišťován svařovacím hořákem, musí být vedení drátu opatřeno speciálním kompenzátorem drátu. Tento kompenzátor má za úkol kompenzovat zpětný pohyb drátu z hořáku a dopředný pohyb drátu z podavačů.

Díky tvorbě stabilních hladkých housenek s minimálním množstvím vneseného tepla může být proces CMT vhodný pro navařování 3D struktur. Výhodou je rovněž možnost navařovat vyššími rychlostmi. Společnost Fronius označuje CMT za nejstabilnější proces MIG/MAG na světě. [29]

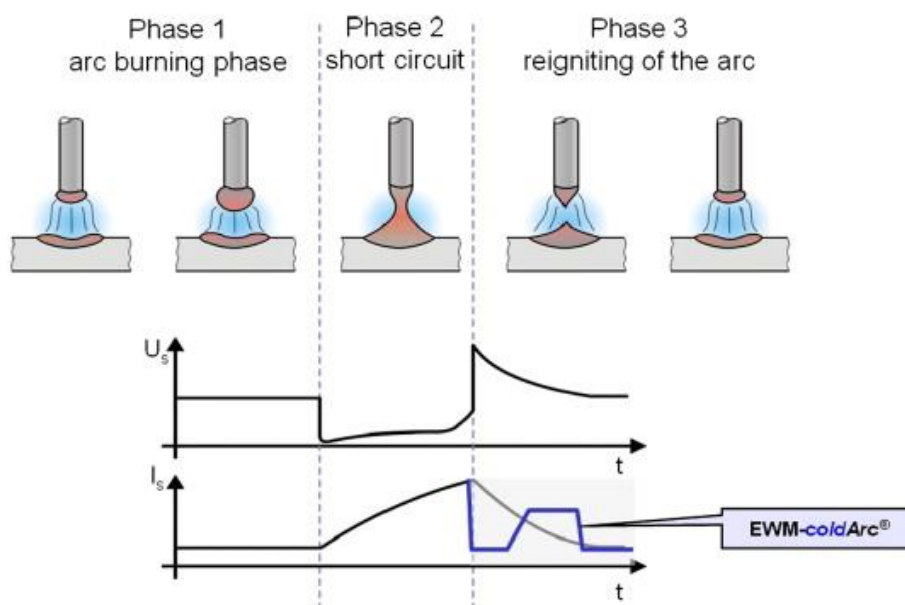
#### 4.6.3. coldArc

Dalším modifikovaným přenosem je proces coldArc od společnosti EWM. Jedná se modifikovaný zkratový přenos slibující minimalizaci vneseného tepla. Účelem vzniku coldArc bylo vytvoření nízkoenergetického procesu bez mechanického zásahu do podávání drátu. Výsledkem je proces, při kterém všechny potřebné zásahy probíhají ve svařovacím zdroji.

Díky tomuto novému procesu mělo být možné svařovat plechy velmi malých tloušťek, až 0,3 mm a plechy s povrchovou úpravou například pozinkované plechy.

Modifikace coldArc oproti běžnému krátkému oblouku spočívá ve změně průběhu proudu v okamžiku oddělení kapky a při opětovném zapálení oblouku. Průběh napětí je stejný jako u běžného zkratového přenosu. Právě pomocí průběhu napětí dokáže zdroj reagovat na jednotlivé fáze hoření oblouku a patřičně tak proud upravovat. Měření a výpočty jsou prováděny procesorem. Reakce na jednotlivé fáze hoření oblouku jsou zpracovány s periodou kratší než 1  $\mu$ s.

Během oddělení kapky je proud snížen na minimální hranici. Díky tomu proběhne opětovné zapálení velmi hladce. Aby se natavil konec elektrody, dojde k navýšení proudu po daný časový úsek. Tento úsek je označen jako tavící pulz. Poté je proud opět snížen na minimální hranici, při které hoří oblouk stabilně, aby bylo zabráněno dalšímu odtavování, cyklus se periodicky opakuje. Během části, kdy probíhá natavení drátu, vzniká na jeho konci kužel o konstantní velikosti. Díky tomu probíhá celý proces velmi hladce a rovnoměrně. Fáze zvýšeného proudu pro odtavení materiálu dovoluje hoření oblouku při velmi nízkém proudu mezi jednotlivými zkraty. [24, 25] Průběh coldArc je zobrazen na obrázku č. 15.



Obrázek 15 - Průběh procesu coldArc [24]

## 5. Návrh experimentu

V rámci experimentu proběhne navaření housenek v jedné vrstvě různými přenosy kovu v kombinaci s funkcemi svařovacího zdroje. Návary budou zhotovovány při konstantní svařovací rychlosti, nastavení úhlu hořáku a při rozdílných hodnotách proudu. Průběhy proudu a napětí budou monitorovány měřicí stanicí Weldmonitor a následně vzájemně porovnávány. Porovnání proběhne i v rámci tvaru a rozměru jednotlivých housenek mezi jednotlivými přenosy a funkcemi. Sledovanými parametry bude výška a šířka návaru. Porovnání bude provedeno i z hlediska množství vneseného tepla a množství nataveného kovu.

### 5.1. Popis pracoviště a vybavení

Návary byly zhotoveny na robotickém pracovišti pro obloukové svařování v prostorách Laboratoře výuky svařovacích technologií. Pracoviště je vybaveno univerzálním 6-ti osým robotickým ramenem FANUC Arc Mate 100iC s řídicím systémem R-J3iC. Dalším pohybovým zařízením je jednoosý polohovací stůl FANUC P250. K robotickému rameni je připojen hořák svařovacího zdroje Migatronik Sigma Galaxy 400. Vedení drátu je zajištěno připojeným podavačem a zásobníkem. Ke zdroji je dále připojen přívod ochranné atmosféry z tlakových lahví. Pracoviště je rovněž vybaveno centrálním odsáváním škodlivých plynů. Další výbavou jsou bezpečnostní prvky. Pracoviště je vybaveno ochranným plotem, světelnou závorou a koncovým spínačem na dveřích plotu zamezující vstupu osobám do pracovního prostoru.

### 5.2. Svařovací zdroj

Svařovací zdroj Migatronik Sigma Galaxy je moderní procesorem řízený svařovací zdroj umožňující svařování všemi druhy základních přenosů. Kromě standardních přenosů disponuje zdroj také dalšími funkcemi. První z těchto funkcí je modifikovaný zkratový přenos IAC™. Princip přenosu je popsán v části 4.7.1. Další funkcí je Intelligent Gas Control (IGC). Tato funkce má zajistit hospodárnější průtok ochranné atmosféry a zamezit tak jejímu plýtvání. Zdroj rovněž disponuje funkcí DUOplus. V rámci experimentu bude využita většina funkcí zdroje.



Obrázek 16 - Svařovací zdroj Migatronik Sigma Galaxy [31]

### 5.2.1. DUO plus

Funkce DUO plus má za úkol automaticky přepínat mezi dvěma sekvencemi. Funkce má za úkol redukcí vneseného tepla a zajištění kontroly svarové lázně. Funkce DUO plus má vliv na kresbu housenky. [32]

### 5.3. Výběr vhodných metod

Svařovací zdroj disponuje všemi základními přenosy a dalšími funkcemi. Ze základních přenosů popsaných v kapitole 4 byly na základě kritérií zvoleny zkratový a impulzní přenos.

Zkratový přenos je spojen s rizikem rozstříku, jedná se ovšem o přenos s nejnižším množstvím vneseného tepla ze základních přenosů. Rozstřík lze také omezit vhodnou volbou parametrů, ochranné atmosféry a jejím průtokem. Zkratovým přenosem disponují všechny MIG/MAG svařovací zdroje, proto je možné jej použít i na levnějším zařízení.

Impulzní přenos představuje ideální kombinaci nižšího vneseného tepla oproti sprchovému, nebo rotujícímu přenosu a zároveň minimální rozstřík.

Ostatní druhy přenosu nejsou pro navařování vhodné. Sprchový a rotující přenos znamenají velké množství vneseného tepla a kapkový přenos nestabilní hoření oblouku.

Kromě standartních přenosů byl k navaření použit modifikovaný zkratový přenos IAC™. Všechny druhy zvolených přenosů byly také zkombinovány s funkcí DUOplus.

### 5.4. Podmínky experimentu

Celkově proběhlo navaření šesti sérií návarů zkratovým, impulzním a IAC přenosem a poté i v kombinaci s funkcí DUOplus.

Navaření proběhlo na ocelové plechy z materiálu S235 o rozměrech 200x80x4 mm. Plechy byly před navařením otryskány.

Jednotlivé návarové housenky byly zhotovovány v délce 60 mm s mezerami 20 mm mezi sebou. Podkladové plechy nebyly napevno upnuty, aby bylo možné sledovat jejich deformace působením tuhnutí návarů. Mezi jednotlivými průběhy návarů, byly plechy ochlazovány pod tekoucí vodou a vysušeny, aby byla zajištěna stejná počáteční teplota podkladu pro všechny housenky.

Jako přídatný materiál byl použit poměděný drát pro zušlechťené a termomechanicky zpevněné jemnozrné oceli s obchodním označením Böhler Union X90, označen G89 6 M Mn4Ni2CrMo dle ČSN EN ISO 16834 [33, 34] o průměru 1 mm. Mechanické vlastnosti drátu jsou v zobrazeny v tabulce č. 1 a chemické složení v tabulce č. 2.

Tabulka 1 - Zaručené hodnoty mechanických vlastností materiálu Union X 90 [34]

$R_m$ [N·mm <sup>-2</sup> ]	$R_e$ [N·mm <sup>-2</sup> ]	$A_5$ [%]	$K_v$ [J]	$K_v$ /-60 °C [J]
950	890	15	90	47

Tabulka 2 - Chemické složení materiálu Union X 90 v hm.% [34]

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

Ochrannou atmosféru tvořil plyn M21, s obsahem 82 % Ar a 18 % CO<sub>2</sub>. Průtok plynu byl nastaven na 14 l/min. Hořák byl nastaven kolmo k podkladovým plechům. Rychlost posuvu svařovacího hořáku byla zvolena 30 cm/min. Výlet drátu byl nastaven na 12 mm.

Proměnným parametrem byl ve všech případech proud. Zdroj pracoval v synergickém režimu, hodnoty rychlosti podávání drátu a napětí byly automaticky dopočítávány zdrojem dle zvoleného proudu. Počáteční hodnota proudu byla vždy zvolena jako minimální hodnota, kterou lze na zdroji pro daný přenos nastavit. Pro každý další návar byla hodnota zvýšena o 10 A. Zkratovým a impulzním přenosem bylo navařeno 9 housenek, přenosem IAC™ bylo navařeno 10 housenek. Stejný počet housenek byl navařen s funkcí DUOplus.

Návary zkratovým přenosem byly vytvořeny v rozsahu proudu od 40 do 120 A, impulzním přenosem od 20 do 100 A a přenosem IAC od 40 do 130 A.

Po dokončení návarů byly vzorky vyleštěny ocelovým kartáčem. Rohy podkladových plechů byly zaobleny broušením.

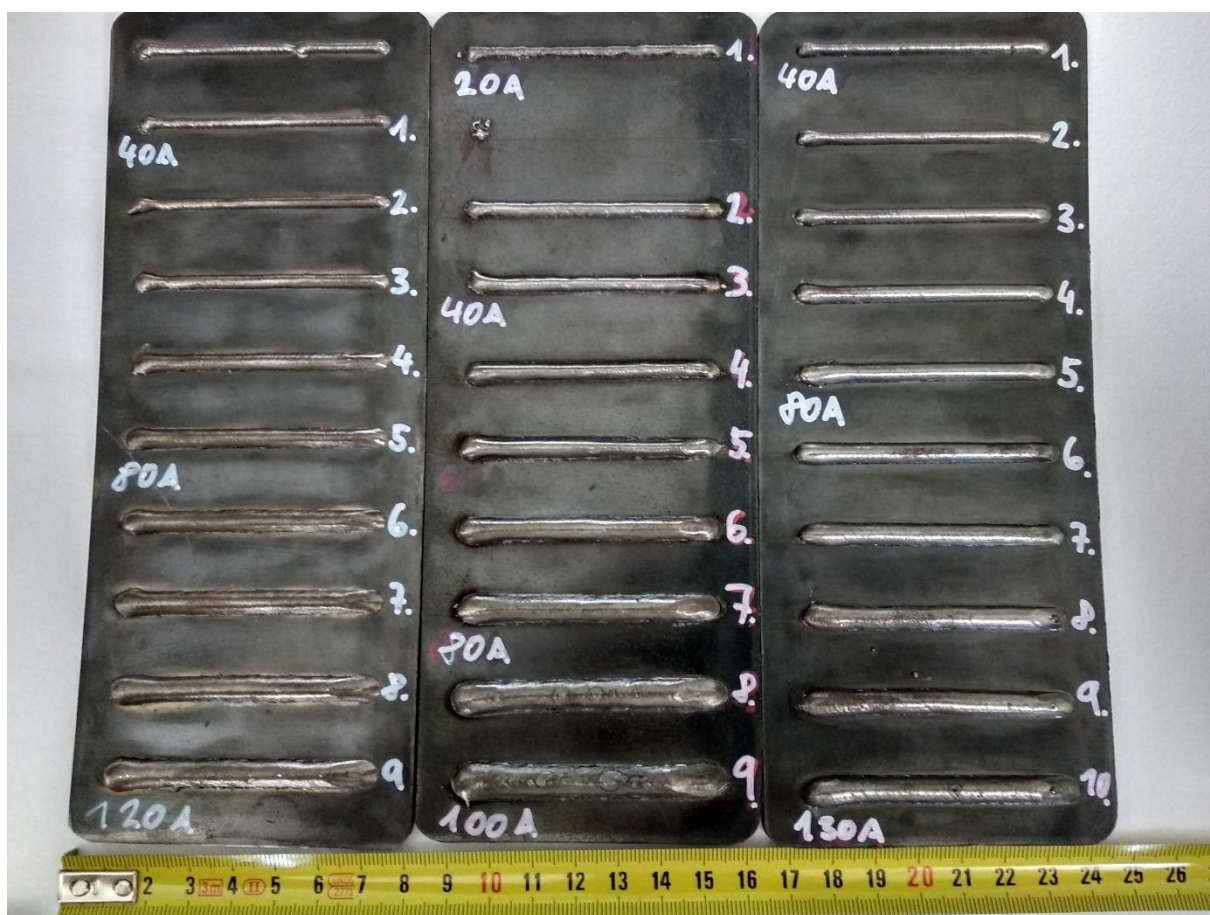
Během navařování byly zaznamenávány hodnoty proudu, napětí a rychlosti podávání drátu nastavené na svařovacím zdroji pro jednotlivé přenosy. Průběhy proudu a napětí během navařování byly zaznamenávány měřicím systémem Weldmonitor.

## 6. Vyhodnocení experimentu

Vyhodnocení experimentu bude probíhat ve čtyřech fázích. V první fázi budou návary posouzeny vizuálně a vzájemně porovnány. Posuzována bude stabilita jednotlivých housenek a jejich vzhled. V druhé fázi proběhne porovnání jednotlivých přenosů z parametrů zaznamenaných ze svařovacího zdroje. Ve třetí fázi proběhne porovnání dle naměřených průběhů proudu a napětí mezi jednotlivými přenosy i mezi různými proudovými hustotami v rámci jednoho přenosu. V poslední fázi proběhne k porovnání housenek z hlediska geometrie.

### 6.1. Vizuální posouzení

Při vizuálním vyhodnocení je brán ohled na stabilitu housenky, její vzhled a porovnání mezi jednotlivými přenosy a funkcemi. Také je posuzována přítomnost rozstříku na vzorcích.



Obrázek 17 - Housenky navařeny bez DUOplus, zleva: zkratový přenos, impulzní přenos, IAC (vlastní zdroj)



Na obrázku č. 17 jsou návary zhotovené zkratovým, impulzním a IAC přenosem. Při porovnání přenosů můžeme pozorovat značný rozdíl mezi impulzním a ostatními přenosy. U impulzního přenosu je velikost housenek při stejném proudu větší. U zkratového a IAC přenosu lze pozorovat mírnou nestabilitu housenky navařené proudem 40 A, při impulzním přenosu je nestabilita při 20 A výraznější.

U impulzního přenosu není přítomen žádný rozstřík, u zkratového přenosu se rozstřík začíná objevovat u housenky navařené 100 A, u IAC se rozstřík vyskytuje pouze u housenky navařené 120 A. Přenos IAC by měl být bezrozstříkový, přítomný rozstřík tak mohl vzniknout přítomností nečistoty na povrchu plechu.

U všech přenosů lze označit za stabilní všechny housenky kromě těch navařených minimálními parametry. U nestabilních housenek můžeme pozorovat změny ve výšce a šířce housenek.

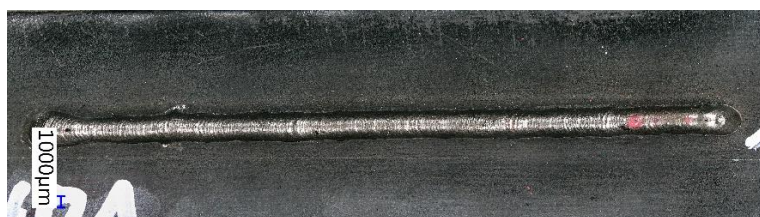
Začátek a konec housenek jsou pak nestabilní u všech housenek. Počátky housenek jsou výrazně vyšší a širší vlivem zapálení oblouku. Konce housenek výrazně klesají, patrné je to zejména u impulzního přenosu při proudu od 80 A. Porovnání bude názornější na detailních snímcích.



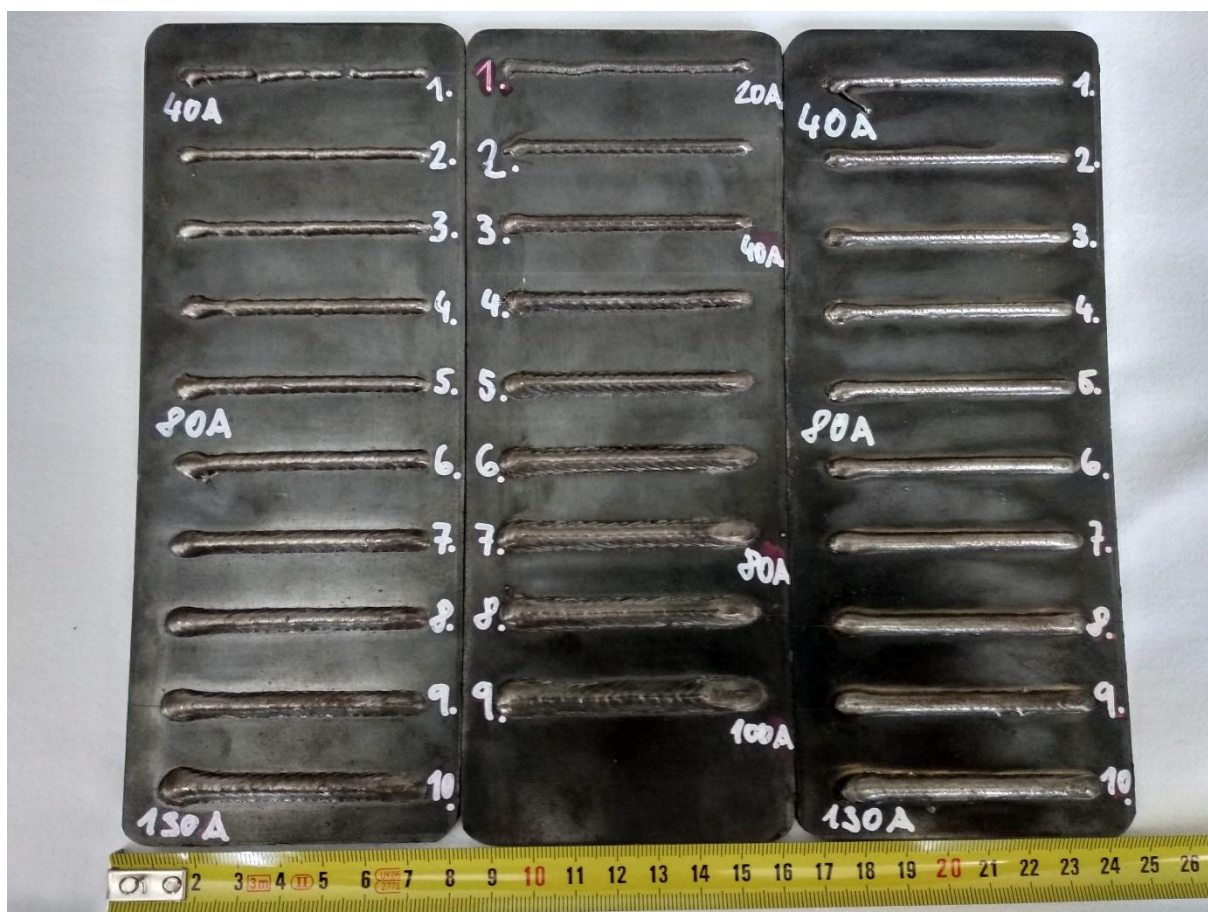
Obrázek 18 - Zkratový přenos 40 A (vlastní zdroj)



Obrázek 19 - Impulzní přenos 20 A (vlastní zdroj)



Obrázek 20 - IAC 40 A (vlastní zdroj)



Obrázek 21 - Návary zhotovené s funkcí DUOplus, zleva zkrat, impulz, IAC (vlastní zdroj)

Při zapnuté funkci DUO plus je u všech návarů znatelná změna jejich kresby. Ze struktury je patrné pulzní podávání drátu. Nejvýrazněji je změna struktury patrná u návarů vytvořených impulzním přenosem. Naopak nejméně je patrná u přenosu IAC. Housenky navařené minimálními parametry jsou velmi nestabilní. U zkratového přenosu došlo dokonce k přerušování housenky. Počátky a konce housenky jsou opět nestabilní stejně jako v předchozím případě. Porovnání struktury návaru se zapnutou a vypnutou funkcí DUOplus je ukázán na detailních snímcích č. 22 až 25.

Lze konstatovat že s výjimkou počátku a konce jsou housenky stabilní při všech parametrech navařování.

Na všech vzorcích je patrné prohnutí podkladového plechu, které vzniklo tuhnutím návaru, ohřevu a následném ochlazení.



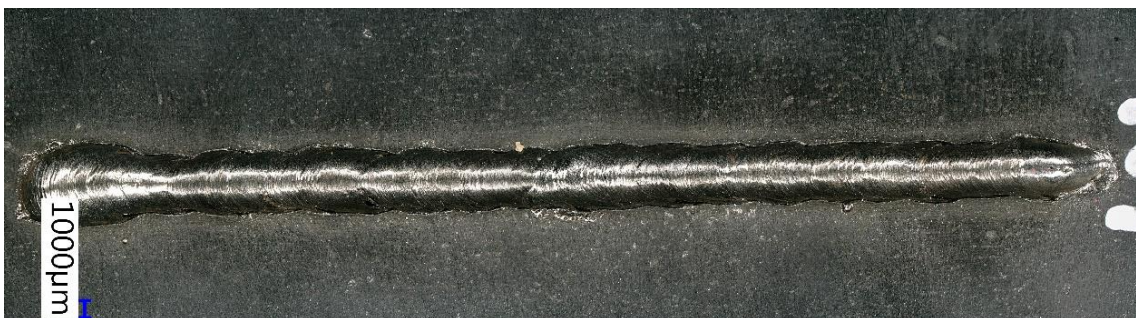
Obrázek 22 - Impulzní přenos 60 A DUOplus (vlastní zdroj)



Obrázek 23 - Impulzní přenos 60 A (vlastní zdroj)



Obrázek 24 - Zkratový přenos 60 A (vlastní zdroj)



Obrázek 25 - Zkratový přenos 60 A DUOplus (vlastní zdroj)

## 6.2. Porovnání podle parametrů zdroje

V této části jsou porovnány parametry odečtené přímo ze zdroje, patří mezi ně například napětí  $U$  a rychlost podávání drátu  $v_d$  v závislosti na zvoleném proudu  $I$  u jednotlivých přenosů. Dále veličiny z těchto parametrů vypočtené jako je množství vneseného tepla  $Q$ , množství nataveného kovu na jednotku času a vzdálenosti.

Množství vneseného tepla určíme dle rovnice v kapitole č. 4. Množství nataveného kovu na jednotku času  $\dot{m}$  lze určit z rychlosti podávání drátu. Množství nataveného kovu na jednotku vzdálenosti  $m$  lze vypočítat podílem množství za čas rychlostí drátu. Výpočty byly prováděny v programu Microsoft Excel. Údaje jsou zaznamenány v tabulkách č. 3 až 5. Hodnoty napětí a rychlosti podávání drátu odečtené při zapnuté a vypnuté funkci DUO plus byly shodné.

Tabulka 3 – Odečtené a vypočtené parametry pro Zkratový přenos

Zkrat		Naměřené hodnoty			Vypočtené hodnoty		
		$I$ [A]	$U$ [V]	$v_d$ [m·min <sup>-1</sup> ]	$Q$ [kJ·mm <sup>-1</sup> ]	$m$ [g·mm <sup>-1</sup> ]	$\dot{m}$ [g·min <sup>-1</sup> ]
č. svaru							
1	40	14,2	1,2	$90,9 \cdot 10^{-3}$	$24,7 \cdot 10^{-3}$	7,395	
2	50	15,1	1,6	$120,8 \cdot 10^{-3}$	$32,9 \cdot 10^{-3}$	9,859	
3	60	15,6	2,0	$149,8 \cdot 10^{-3}$	$41,1 \cdot 10^{-3}$	12,325	
4	70	16,1	2,4	$180,3 \cdot 10^{-3}$	$49,3 \cdot 10^{-3}$	14,789	
5	80	16,7	2,8	$213,8 \cdot 10^{-3}$	$57,5 \cdot 10^{-3}$	17,254	
6	90	17,2	3,1	$247,7 \cdot 10^{-3}$	$63,7 \cdot 10^{-3}$	19,103	
7	100	17,7	3,5	$283,2 \cdot 10^{-3}$	$71,9 \cdot 10^{-3}$	21,567	
8	110	17,7	4,0	$311,5 \cdot 10^{-3}$	$82,2 \cdot 10^{-3}$	24,649	
9	120	17,7	4,5	$339,8 \cdot 10^{-3}$	$92,4 \cdot 10^{-3}$	27,730	

Poznámka:  $m$  = hmotnost svarového kovu na jednotku délky,  $\dot{m}$  = hmotnost svarového kovu na jednotku času

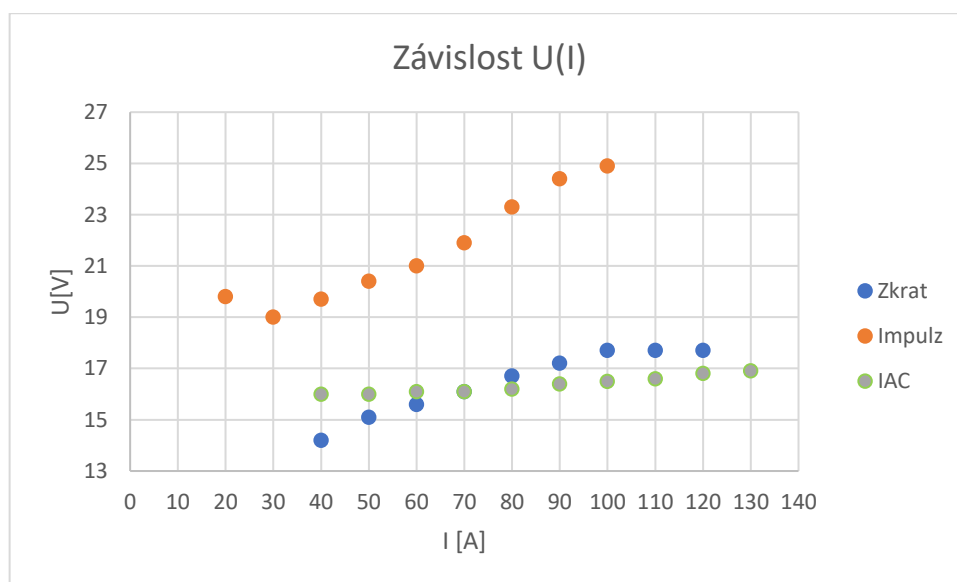
Tabulka 4 - Odečtené a naměřené parametry pro Impulzní přenos

Impulz		Naměřené hodnoty			Vypočtené hodnoty		
		$I$ [A]	$U$ [V]	$v_d$ [m·min <sup>-1</sup> ]	$Q$ [kJ·mm <sup>-1</sup> ]	$m$ [g·mm <sup>-1</sup> ]	$\dot{m}$ [g·min <sup>-1</sup> ]
č. svaru							
1	20	19,8	1,0	$63,4 \cdot 10^{-3}$	$20,5 \cdot 10^{-3}$	6,162	
2	30	19,0	1,5	$91,2 \cdot 10^{-3}$	$30,8 \cdot 10^{-3}$	9,243	
3	40	19,7	1,9	$126,1 \cdot 10^{-3}$	$39,1 \cdot 10^{-3}$	11,708	
4	50	20,4	2,4	$163,2 \cdot 10^{-3}$	$49,3 \cdot 10^{-3}$	14,789	
5	60	21,0	2,8	$201,6 \cdot 10^{-3}$	$57,5 \cdot 10^{-3}$	17,254	
6	70	21,9	3,3	$245,3 \cdot 10^{-3}$	$67,8 \cdot 10^{-3}$	20,335	
7	80	23,3	3,8	$298,2 \cdot 10^{-3}$	$78,1 \cdot 10^{-3}$	23,417	
8	90	24,4	4,2	$351,4 \cdot 10^{-3}$	$86,3 \cdot 10^{-3}$	25,882	
9	100	24,9	4,6	$398,4 \cdot 10^{-3}$	$94,5 \cdot 10^{-3}$	28,346	

Tabulka 5 - Odečtené a naměřené hodnoty pro IAC přenos

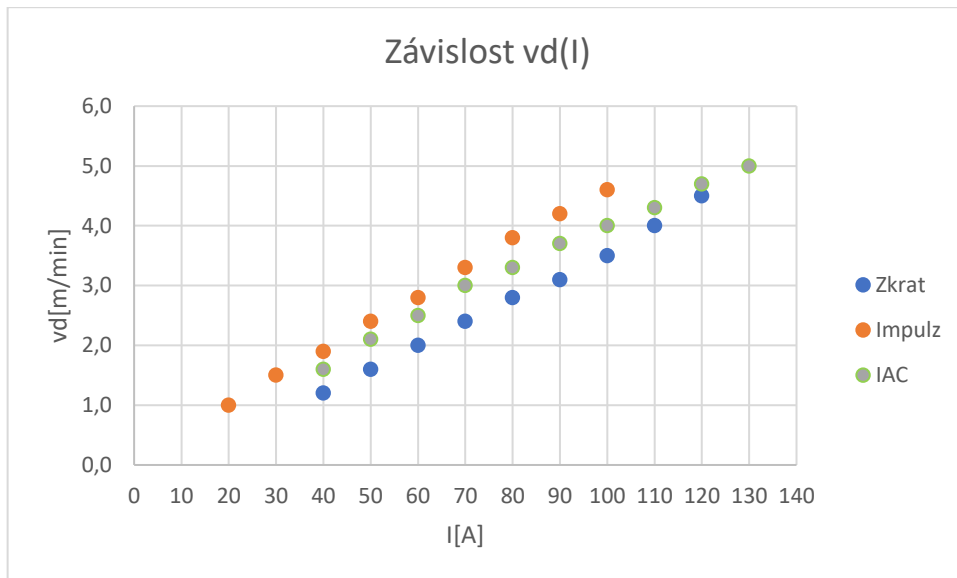
IAC č. svaru	Naměřené hodnoty			Vypočtené hodnoty		
	$I$ [A]	$U$ [V]	$v_d$ [m·min <sup>-1</sup> ]	$Q$ [kJ·mm <sup>-1</sup> ]	$m$ [g·mm <sup>-1</sup> ]	$\dot{m}$ [g·min <sup>-1</sup> ]
1	40	16,0	1,6	$102,4 \cdot 10^{-3}$	$32,9 \cdot 10^{-3}$	9,859
2	50	16,0	2,1	$128,0 \cdot 10^{-3}$	$43,1 \cdot 10^{-3}$	12,941
3	60	16,1	2,5	$154,6 \cdot 10^{-3}$	$51,4 \cdot 10^{-3}$	15,406
4	70	16,1	3,0	$180,3 \cdot 10^{-3}$	$61,6 \cdot 10^{-3}$	18,487
5	80	16,2	3,3	$207,4 \cdot 10^{-3}$	$67,8 \cdot 10^{-3}$	20,335
6	90	16,4	3,7	$236,2 \cdot 10^{-3}$	$76,1 \cdot 10^{-3}$	22,800
7	100	16,5	4,0	$264,0 \cdot 10^{-3}$	$82,2 \cdot 10^{-3}$	24,649
8	110	16,6	4,3	$292,2 \cdot 10^{-3}$	$88,3 \cdot 10^{-3}$	26,498
9	120	16,8	4,7	$322,6 \cdot 10^{-3}$	$96,5 \cdot 10^{-3}$	28,963
10	130	16,9	5,0	$351,5 \cdot 10^{-3}$	$102,7 \cdot 10^{-3}$	30,811

Z tabulkových hodnot byly sestaveny grafy pro přímé porovnání přenosů.



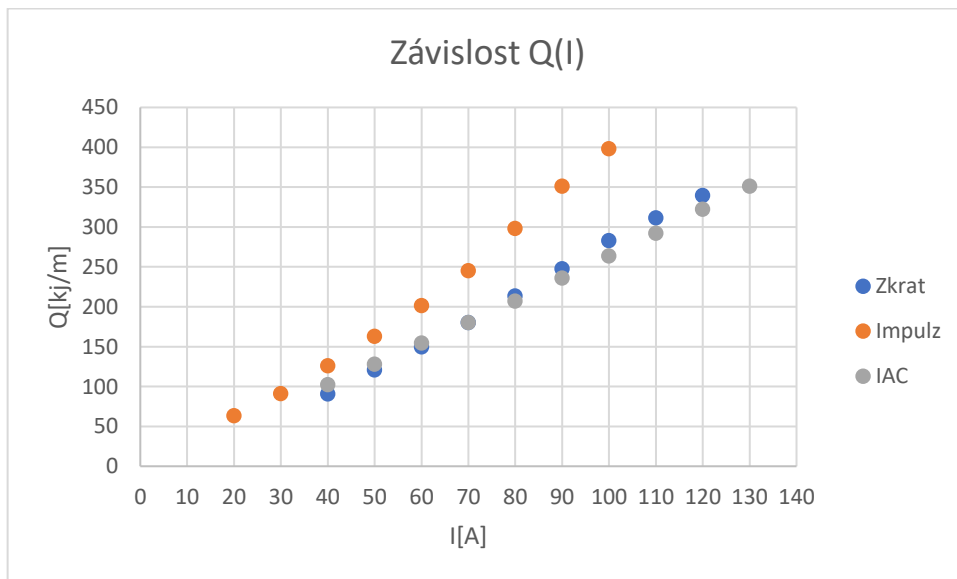
Graf 1 - Závislost U(I) u jednotlivých přenosů

Z grafu č. 1 závislosti napětí na proudu je patrné výrazně vyšší napětí u impulzního přenosu v porovnání se zkratovým a IAC přenosem. U všech přenosů má velikost napětí stoupající tendenci v závislost na proudu. U zkratového přenosu se velikost napětí od 100 A zásadně nemění. Napětí u IAC přenosu stoupá nejpomaleji. Při 70 A se napětí vyrovná zkratovému přenosu a u vyšších parametrů je již nižší.



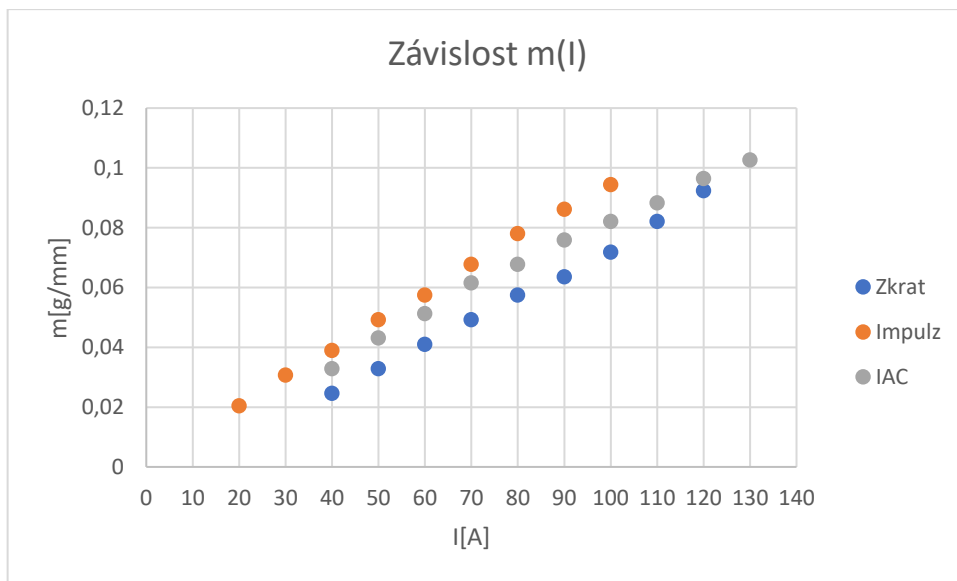
Graf 2 - Závislost  $v_d(I)$  u jednotlivých přenosů

Rychlost podávání drátu s přibývajícím proudem musí narůstat. Nárůst rychlosti podávání drátu je u všech přenosů lineární, viz graf č. 2. Nejvyšší rychlost podávání drátu je u impulzního přenosu. To je patrné také z velikosti housenek při stejném proudu.



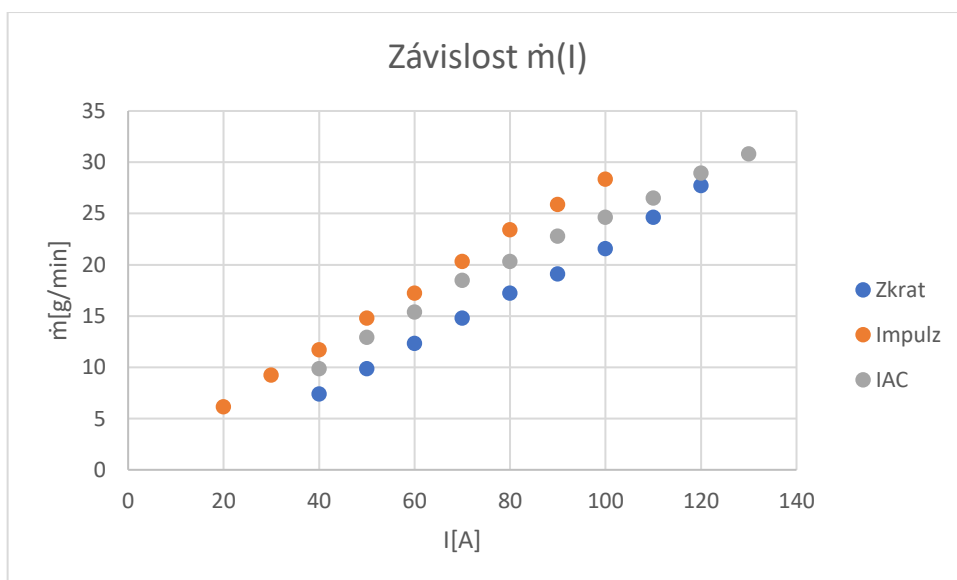
Graf 3 - závislost  $Q(I)$  u jednotlivých přenosů

Ze závislosti v grafu č. 3 je patrné že nejvyšší množství vneseného tepla je u impulzního přenosu. Průběhy tepla kopírují průběhy napětí u jednotlivých přenosů. Do 70 A je nejmenší množství tepla u zkratového přenosu, od 70 A výš pak u přenosu IAC. Vzhledem ke shodným parametrům při nastavení funkce DUO plus, není možné porovnat množství vneseného tepla při zapnutí funkce. Výpočty jsou zahrnuty pro účinnost elektrického oblouku 0,8 dle ČSN EN ISO 1011-1 pro technologii MIG/MAG. [23]



Graf 4 - Závislost  $m(I)$  u jednotlivých přenosů

Z průběhů v grafu č. 4 je patrné že, největší množství kovu na 1 mm je nataveno u impulzního přenosu a nejnižší při zkratovém. To je opět patrné i na návarových housenkách. Množství má lineární stoupající tendenci, stejně jako rychlost podávání drátu. Výpočty jsou zahrnuty pro měrnou hmotnost  $7850 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . [34]



Graf 5 - Závislost  $\dot{m}(I)$  u jednotlivých přenosů

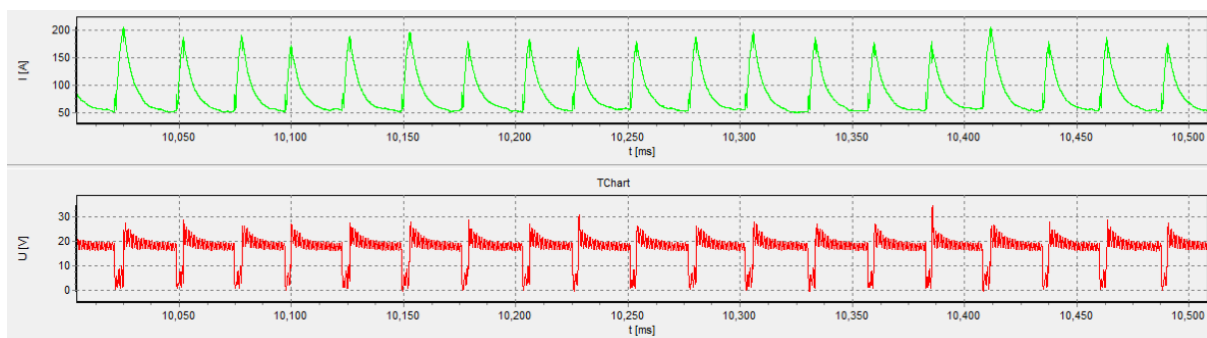
Průběhy kovu nataveného za 1 minutu jsou vzhledem k jednotné rychlosti pohybu hořáku shodné s průběhy kovu nataveného na 1 mm. Nejrychlejší odtavování při stejném proudu je u impulzního přenosu, nejpomalejší u zkratového, viz graf č. 5.

### 6.3. Porovnání průběhů proudu

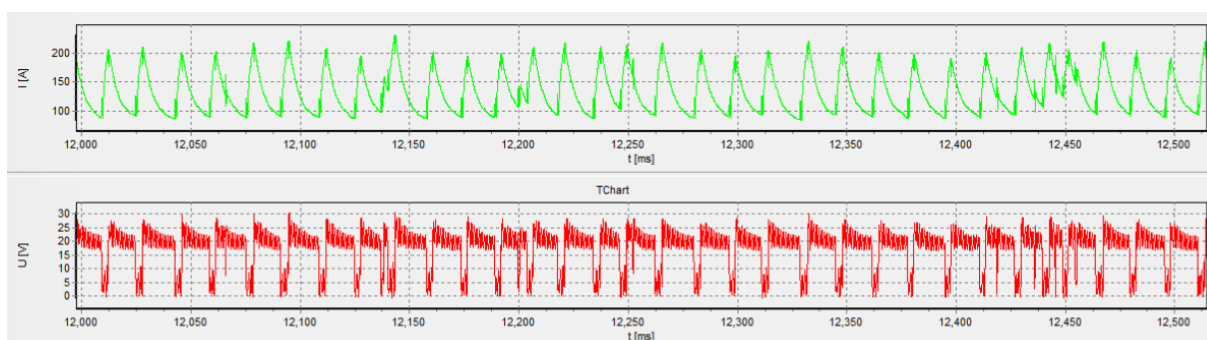
Průběhy proudu, napětí a dalších parametrů byly zaznamenávány Weldmonitorem. Parametry jsou porovnány v rámci jednoho přenosu při různém nastaveném proudu a vzájemně mezi jednotlivými přenosy.



Obrázek 26 - Průběh proudu a napětí zkratového přenosu při 40 A (vlastní zdroj)



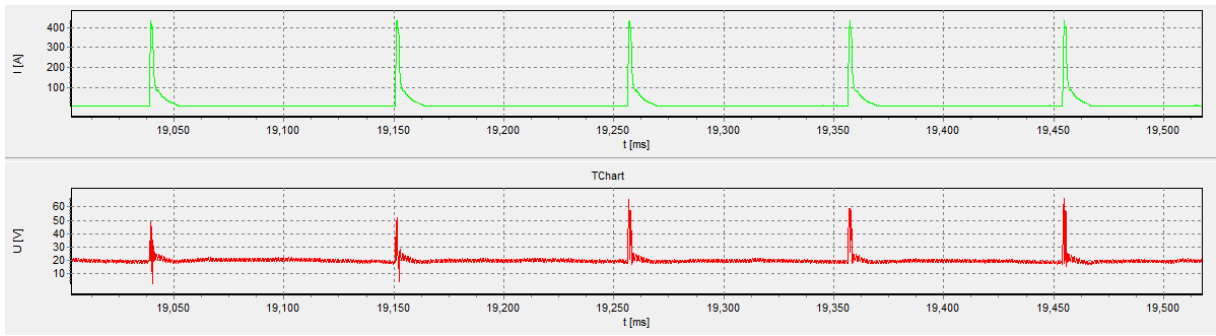
Obrázek 27 - Průběh proudu zkratového přenosu při 80 A (vlastní zdroj)



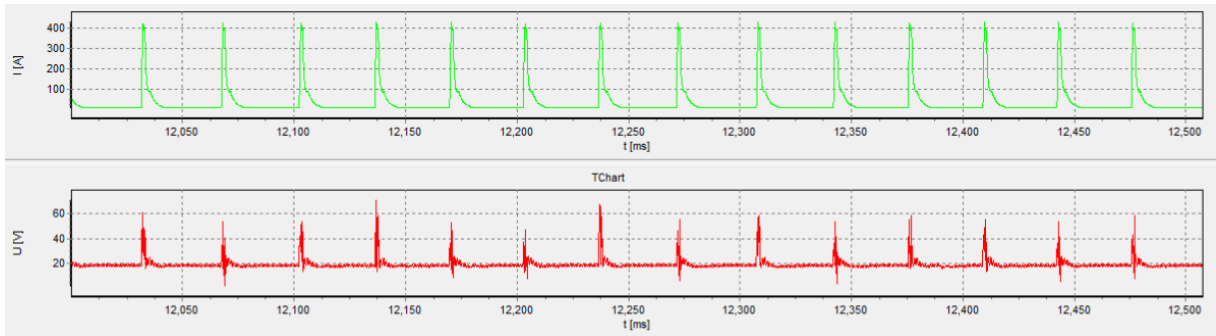
Obrázek 28 - Průběh proudu zkratového přenosu při 120 A (vlastní zdroj)

Z průběhů proudu zkratového přenosu je patrné zvyšování frekvence zkratů v závislosti na zvyšování proudu. Naměřené průběhy se shodují s teoretickými poznatky průběhu zkratového přenosu. U průběhu proudu při 40 A na obrázku č. 26 je patrná nestabilita procesu. Stabilní proces s pravidelnými zkraty je na obrázku č. 27.

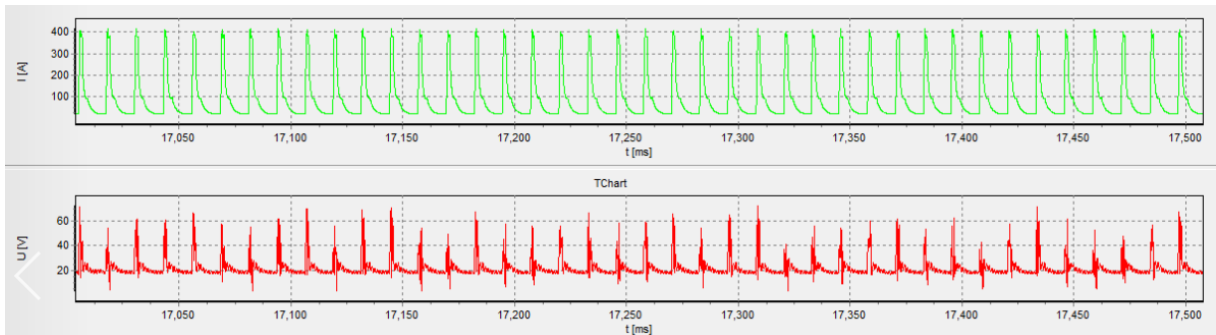




Obrázek 29 - Průběh proudu a napětí impulzního přenosu při 20 A (vlastní zdroj)



Obrázek 30 - Průběh proudu a napětí impulzního přenosu při 40 A (vlastní zdroj)

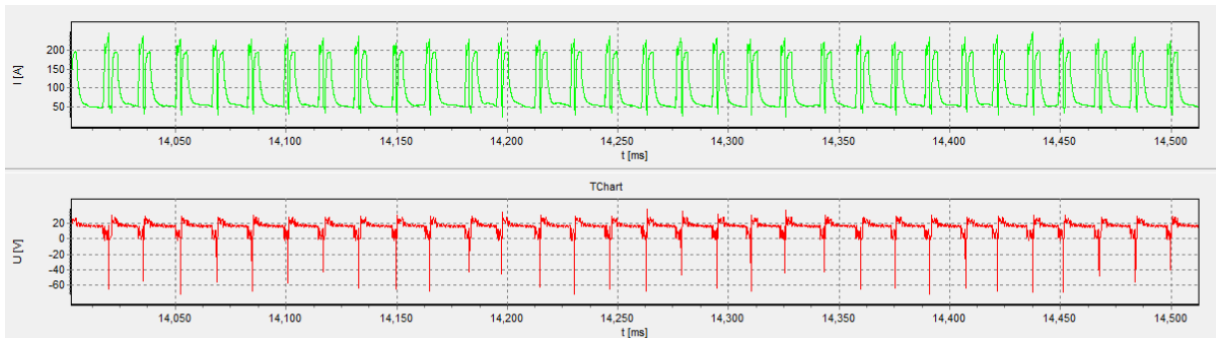


Obrázek 31 - Průběh proudu a napětí impulzního přenosu při 100 A (vlastní zdroj)

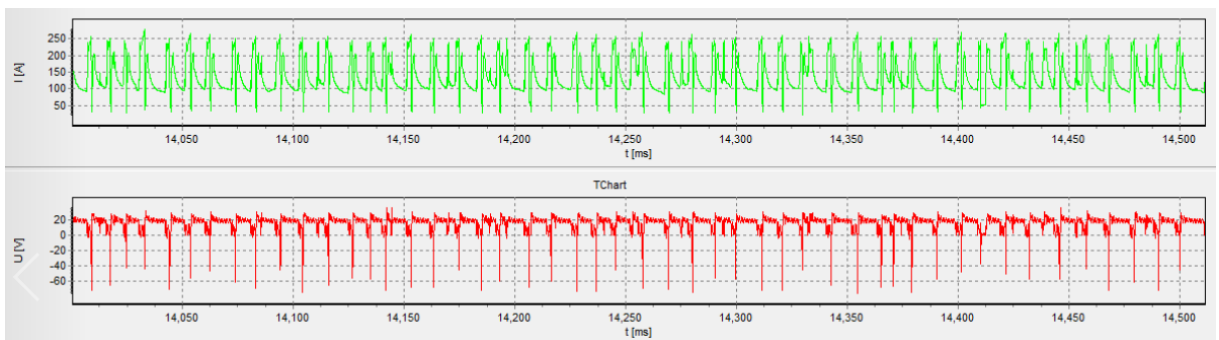
Na obrázcích č. 29-31 lze pozorovat průběh impulzního přenosu. Jedná se o bezkratový přenos. Lze pozorovat průběhy základního a impulzního proudu. Podobně jako se u zkratového přenosu zvyšovala s narůstajícím proudem frekvence zkratů, u impulzního přenosu dochází k nárůstu frekvence impulzního proudu, jak je patrné z grafů průběhů.



Obrázek 32 - Průběh proudu a napětí IAC přenosu při 40 A (vlastní zdroj)



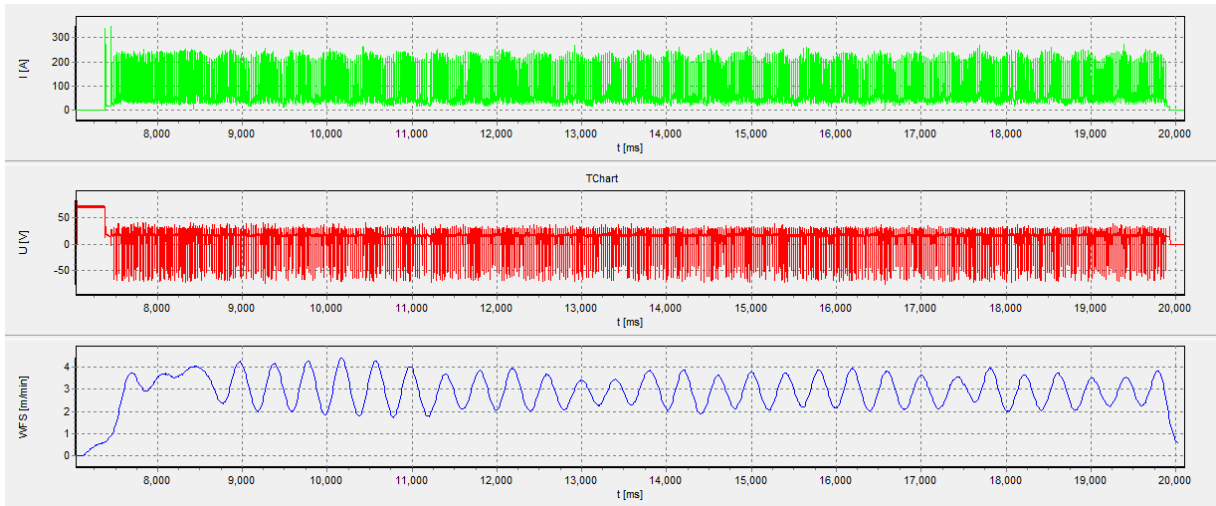
Obrázek 33 - Průběh proudu a napětí IAC přenosu při 80 A (vlastní zdroj)



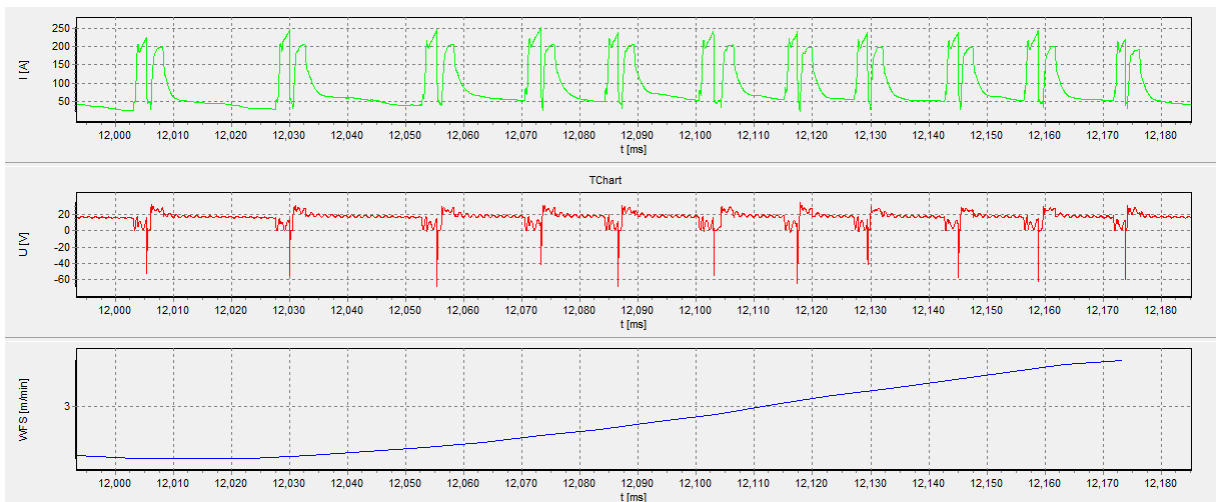
Obrázek 34 - Průběh proudu a napětí IAC přenosu při 130 A (vlastní zdroj)

Z průběhů na obrázcích č. 32-34 je patrný nárůst frekvence zkratů při zvyšujícím se proudu. Skutečný průběh IAC proudu je odlišný od průběhu teoretického. Zatímco u teoretického průběhu je nárůst proudu po zkratu minimální, skutečný průběh ukazuje nárůst vyšší.

Průběhy proudu a napětí při přenosu se zapnutou funkcí DUO plus nevykazovaly výraznou změnu. Změna je patrná pouze v celém rozsahu. Velký rozdíl je v rychlosti podávání drátu. Zatímco běžně je rychlost konstantní, při zapnutí DUO plus je rychlost proměnná, například v rozmezí od 2 do 4 m·min<sup>-1</sup> jak je patrné z průběhu na obrázku č. 35.



Obrázek 35 - Průběh proudu, napětí a rychlosti podávání drátu u IAC přenosu při 80 A v celém rozsahu (vlastní zdroj)



Obrázek 36 - Průběh proudu, napětí a rychlosti podávání drátu u IAC přenosu při 80 A (vlastní zdroj)

#### 6.4. Měření geometrie návarových housenek

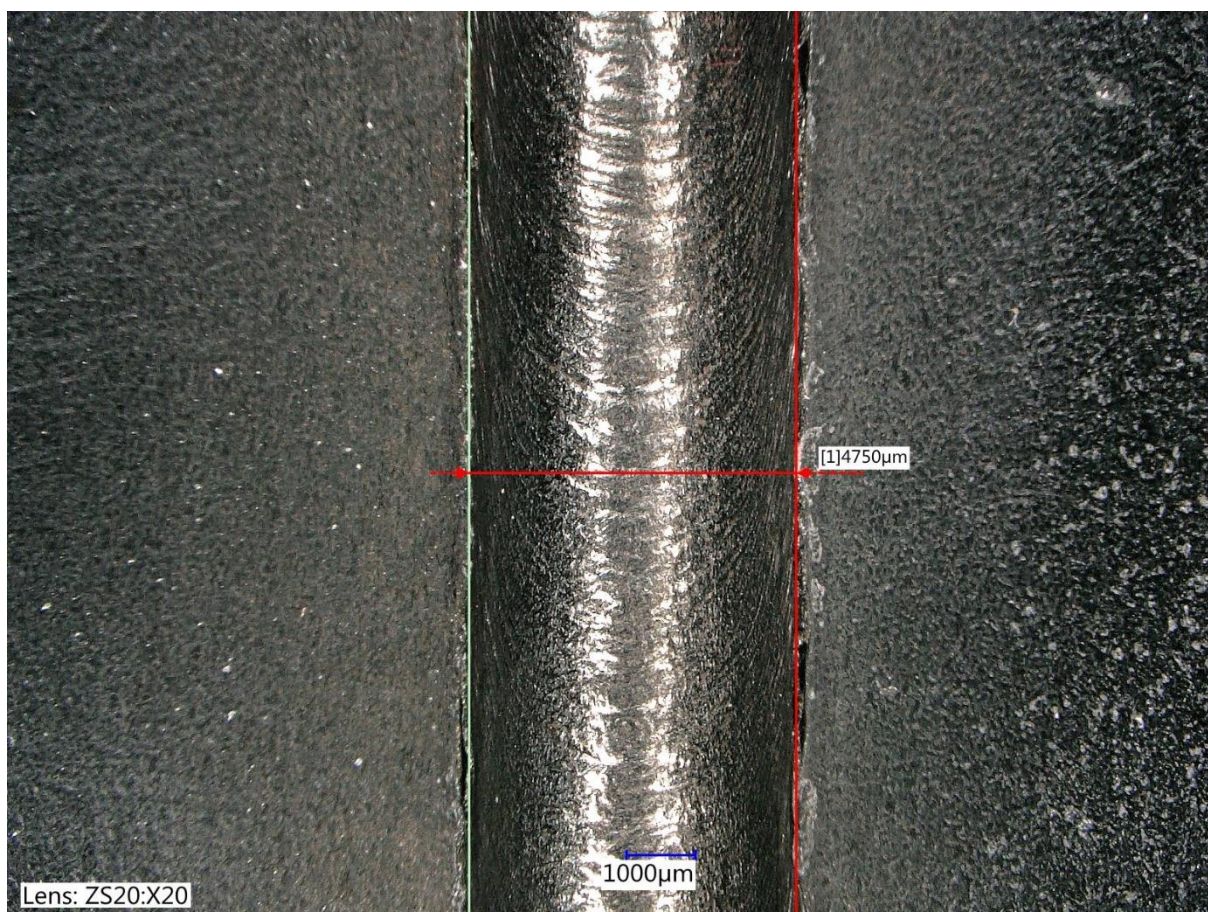
Měření housenek probíhalo na optickém mikroskopu Keyence VHX 6000 v prostorách Laboratoře čistoty společnosti Robert Bosch České Budějovice s.r.o. Měření šířky bylo prováděno v pohledu shora na vzorky. Mikroskop umožňuje vytváření 3D snímků. Díky těmto snímkům bylo možné změřit výšku housenek. Mikroskop rovněž umožňuje skládání obrázků a vytváření detailních snímků objektů větších, než je jeho záběr. Celkově bylo vytvořeno 228 použitelných snímků. Snímky všech housenek jsou k dispozici v příloze č. 1 na přiloženém DVD.

Měření probíhalo v prostřední části housenky. V těchto místech prokazovaly všechny housenky nejvyšší stabilitu. Zároveň je tak možné se vyhnout rozdílnému tvaru na jejich koncích. Příklad nestability na počátku housenky je na obrázku č. 37.



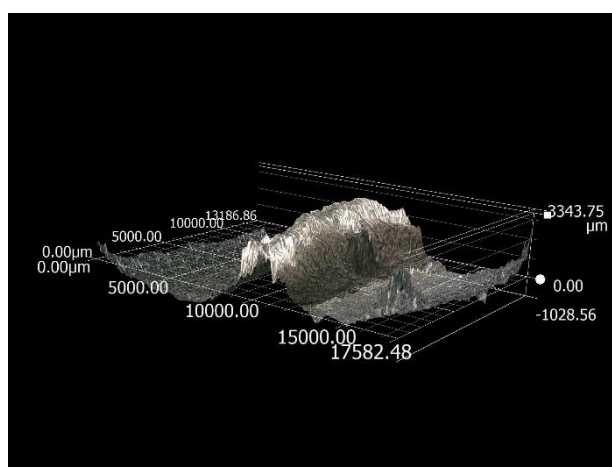
Obrázek 37 - Ukázka nestability na počátku housenky (vlastní zdroj)

Měření šířky probíhalo pomocí nástroje v ovládacím programu mikroskopu. Šířka je definována vzdáleností dvou rovnoběžek umístěných na okraje housenek. Příklad měření šířky je na obrázku č. 38.

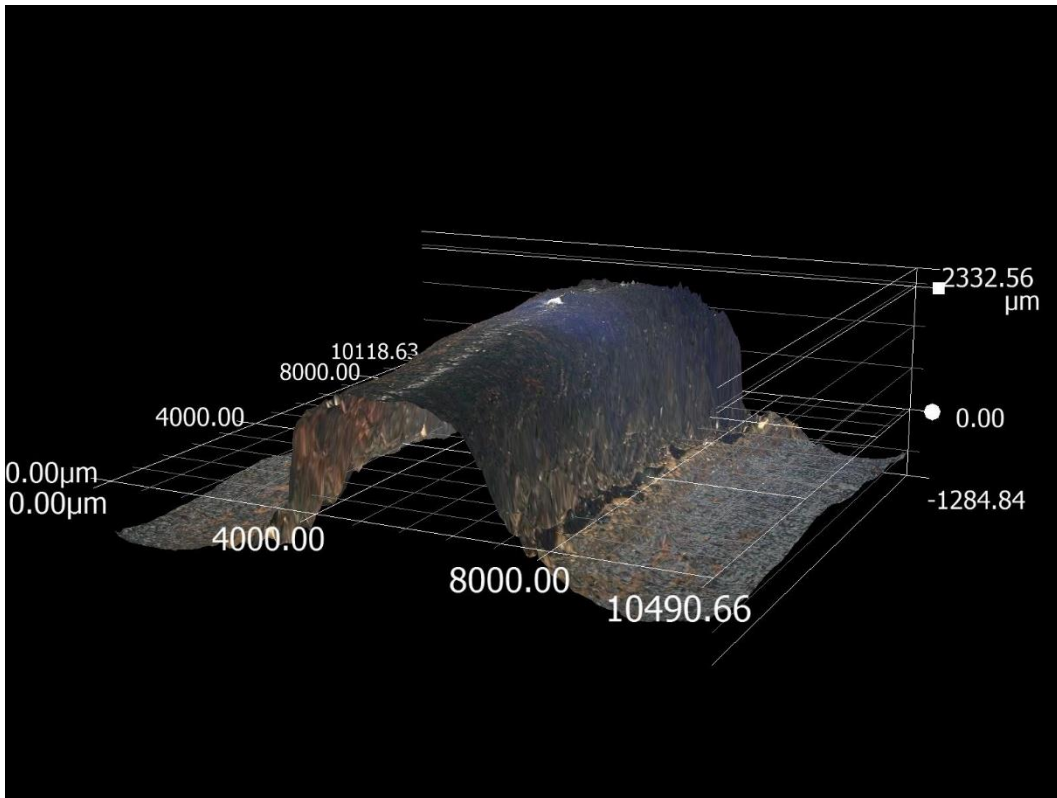


Obrázek 38 - Příklad měření šířky návaru (vlastní zdroj)

Měření výšky bylo komplikovanější. Nebylo možné použití stejného nastavení světla jako při měření šířky. Odlesky okolo osy návarů vytvářely nesrovnalosti v 3D snímcích. Pro správné měření bylo potřeba zamezit odleskům. Toho bylo docíleno nastavením polarizovaného světla. Hodnota výšky návaru je vzdálenost 2 rovin, kdy první rovina je umístěna do paty návaru a druhá na jeho vrchol.



Obrázek 39 - Příklad nevhodně vytvořeného 3D snímku (vlastní zdroj)



Obrázek 40 - Příklad 3D snímku pod polarizovaným světlem (vlastní zdroj)

Na obrázcích č. 39 a 40 je snímek shodné housenky. Na obrázku č. 39 je snímek s výrazným odrazem a nelze tak přesně určit výšku návaru. Snímek na obrázku č. 40 je bez odrazu. Je patrný značný rozdíl v geometrii na snímcích, rozdíl ve výšce tvoří 1 mm.

Vzhledem k prohnutí vzorků bylo potřeba návarů vždy vyrovnat, aby bylo možné patou návaru proložit rovinu a měření bylo přesné.

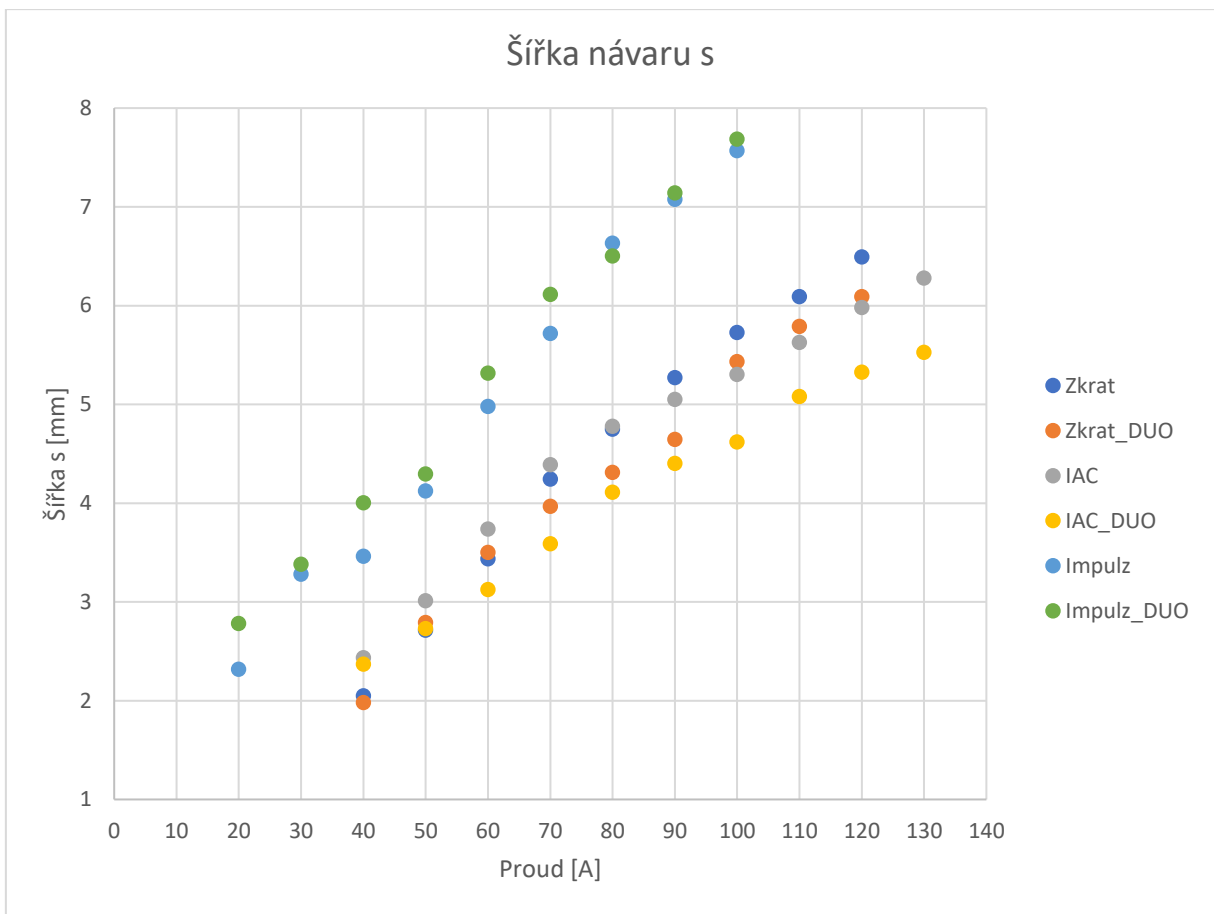
Vyhodnocovanými parametry z hlediska velikosti návarových housenek jsou výška  $h$ , šířka  $s$  a poměr výšky ku šířce  $h/s$ . Naměřené parametry jsou v tabulce č. 6. Hodnoty výšky a šířky u jednotlivých přenosů byly graficky porovnány. Grafické porovnání přenosů je v grafu č. 6.

Tabulka 6 - Naměřené hodnoty výšky a šířky návarů a jejich poměry

Proud [A]	č. návaru	Zkrat			Zkrat_DUO		
		s[mm]	h[mm]	s/h[-]	s[mm]	h[mm]	s/h[-]
40	1	2,052	1,801	1,139367	1,982	1,858	1,066738
50	2	2,715	1,987	1,366381	2,792	2,055	1,358637
60	3	3,437	2,144	1,603078	3,504	2,146	1,632805
70	4	4,245	2,324	1,826592	3,971	2,225	1,784719
80	5	4,750	2,477	1,917642	4,314	2,378	1,81413
90	6	5,273	2,609	2,021081	4,647	2,480	1,87379
100	7	5,731	2,742	2,09008	5,436	2,618	2,076394
110	8	6,092	2,812	2,16643	5,792	2,745	2,110018
120	9	6,493	2,963	2,19136	6,093	2,872	2,121518

Proud [A]	č. návaru	IAC			IAC_DUO		
		s[mm]	h[mm]	s/h[-]	s[mm]	h[mm]	s/h[-]
40	1	2,437	2,237	1,089405	2,370	2,084	1,137236
50	2	3,014	2,451	1,229702	2,731	2,183	1,251031
60	3	3,740	2,567	1,456954	3,127	2,404	1,300749
70	4	4,390	2,664	1,647898	3,591	2,535	1,416568
80	5	4,780	2,696	1,772997	4,113	2,608	1,577071
90	6	5,052	2,754	1,834423	4,404	2,683	1,641446
100	7	5,305	2,806	1,890592	4,621	2,752	1,679142
110	8	5,628	2,863	1,96577	5,082	2,821	1,801489
120	9	5,981	2,936	2,037125	5,327	2,876	1,852225
130	10	6,279	2,952	2,127033	5,528	2,929	1,887334

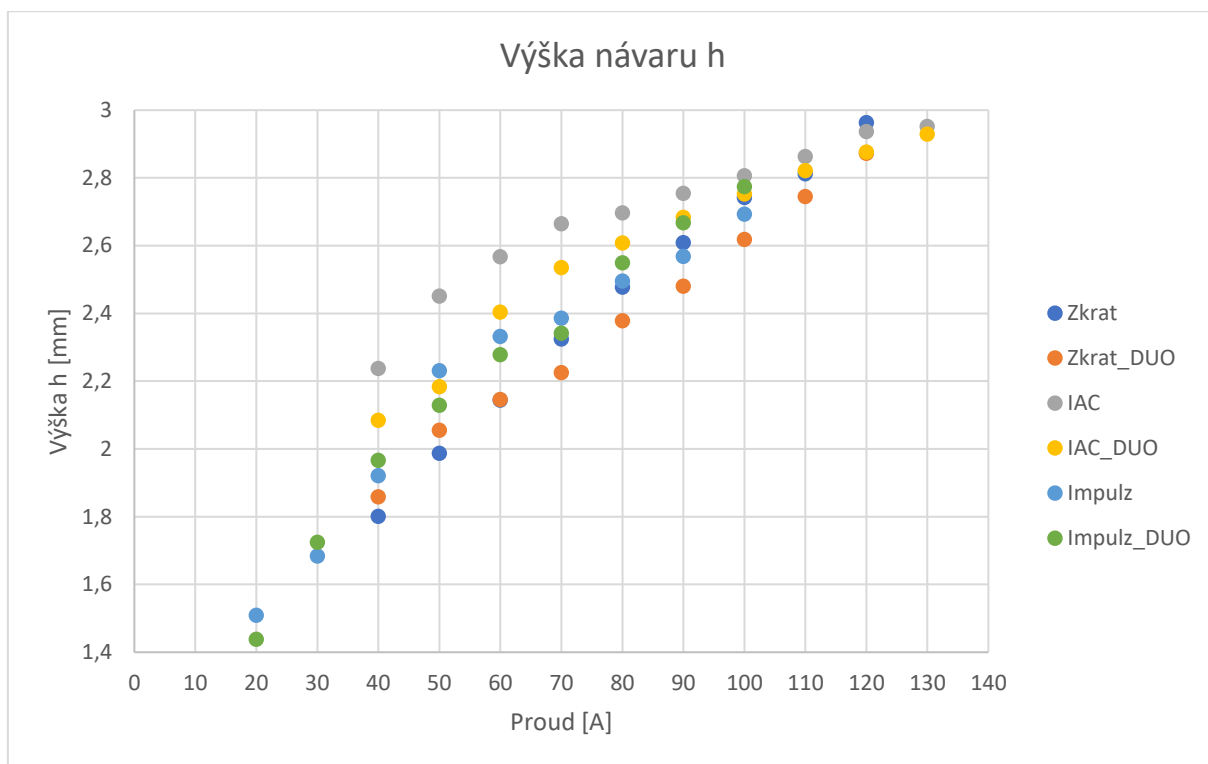
Proud [A]	č. návaru	Impulz			Impulz_DUO		
		s[mm]	h[mm]	s/h[-]	s[mm]	h[mm]	s/h[-]
20	1	2,320	1,509	1,537442	2,783	1,438	1,935327
30	2	3,282	1,684	1,948931	3,383	1,724	1,962297
40	3	3,465	1,921	1,803748	4,006	1,966	2,03764
50	4	4,126	2,231	1,849395	4,297	2,129	2,018318
60	5	4,980	2,332	2,135506	5,318	2,278	2,334504
70	6	5,720	2,386	2,397318	6,116	2,341	2,612559
80	7	6,635	2,495	2,659319	6,504	2,549	2,551589
90	8	7,079	2,568	2,75662	7,142	2,667	2,677915
100	9	7,569	2,693	2,81062	7,688	2,774	2,771449



Graf 6 - Porovnání šířky návarových housenek jednotlivých přenosů

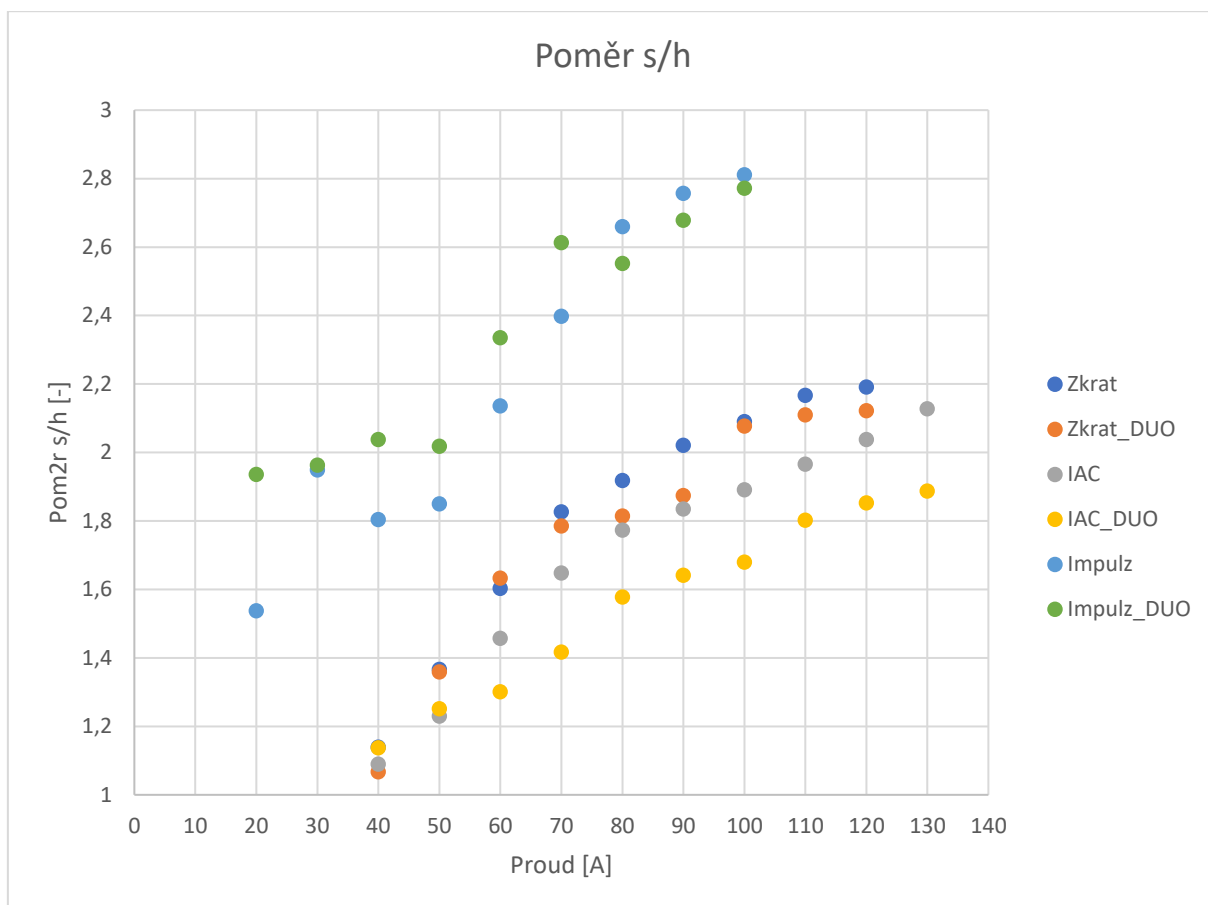
Z grafu č. 6 porovnávajícího šířku návarů je patrné, že při shodných parametrech je nejvyšší šířky dosaženo při impulzním přenosu. Nejužší housenky byly s výjimkou 40 A a 50 A navařeny přenosem IAC. Dále je patrné, že zatímco u impulzního přenosu dochází při zapnutí funkce DUOplus k rozšíření housenek, tak u zkratového a IAC přenosu dochází k zúžení housenek. Pokles šířky je výraznější u přenosu IAC. Je možné pozorovat výrazné zvýšení šířky housenek u impulzního přenosu při 60 A. V závislosti na proudu se šířka u všech návarových housenek zvětšuje. U impulzního přenosu lze pozorovat opačnou tendenci, než u zkratového a IAC přenosu.





Graf 7 - Porovnání výšky návarů u jednotlivých přenosů

Z grafu č. 7 porovnávajícího výšky návarů je patrné, že při shodném proudu lze největší výšky dosáhnout u IAC přenosu. Rozdíly jsou nejpatrnější od 40 A do 90 A. Nejmenší výšku mají housenky navařené zkratovým přenosem. Vliv funkce DUOplus je na všechny přenosy stejný, vždy dochází k poklesu výšky. Pokles je ovšem výrazný pouze u IAC a zkratového přenosu. Výška návarů se v závislosti na navyšování proudu zvětšuje.



Graf 8 - Porovnání poměru výšky ku šířce návarových housenek

Z grafu č. 8 porovnávajícího poměrů výšky ku šířce jednotlivých přenosů lze pozorovat, že poměr je nejvyšší u impulzního přenosu. Nejnižší poměr je u přenosu IAC při zapnuté funkci DUOplus. Funkce DUOplus má na poměr stejný vliv jako v případě šířky návarů. V případě zkratového a IAC přenosu dochází k poklesu poměru, u impulzního přenosu k jeho nárůstu. Poměr rovněž narůstá se zvyšováním proudu, a to u všech přenosů.

## 7. Závěr

Cílem této práce bylo porovnání různých přenosů svarového kovu technologie MIG/MAG a jejich zhodnocení ve spojitosti s technologií WAAM. Vyhodnocení probíhalo na základě parametrů navařování odečtených ze svařovacího zdroje Migatronic Sigma Galaxy 400, vypočtených parametrů, měření probíhajícího během navařování a měření šířky a výšky housenek. Pro porovnání byl zvolen zkratový, impulzní a IAC přenos. Zároveň byla ještě zvolena funkce DUOplus. Celkem bylo vytvořeno 57 návarových housenek.

Z hlediska parametrů odečtených ze svařovacího zdroje byla velikost napětí i rychlosti podávání drátu při stejném proudu nejvyšší u impulzního přenosu. Nejnižší hodnoty napětí byly do 70 A u přenosu zkratového, od 70 A potom u přenosu IAC. Nejnižší rychlost podávání drátu byla u přenosu zkratového. S odečtenými parametry souvisí i parametry vypočtené. Nejvyšší množství vneseného tepla bylo pozorováno u impulzního přenosu. Důvodem je vyšší napětí při stejném proudu i rychlosti posuvu hořáku. Nejnižší vnesené teplo vykazují pak zkratový a IAC přenos se stejnou závislostí jako v případě napětí. Nejvyšší výkon odtavení je opět u impulzního přenosu, souvisí to s rychlostí podávání drátu. Nejnižší pak u přenosu zkratového. Zapnutí funkce DUOplus tyto parametry neovlivnilo.

Z měření šířky a výšky návarů vyplývá, že při impulzním přenosu jsou housenky širší a nižší, zatímco u IAC přenosu jsou užší a vyšší. U zkratového přenosu byly housenky širší a nižší než u IAC, ovšem ne tak výrazně jako u přenosu impulzního. Výška i šířka housenek narůstaly v závislosti na zvyšování proudu.

Efekt funkce DUOplus byl znatelný zejména na celkovém tvaru housenek, které připomínaly housenky technologie TIG. U IAC a zkratového přenosu docházelo při stejných parametrech ke snížení výšky a šířky. U impulzního přenosu pak k jejich nárůstu. Funkce DUOplus tak měla vliv zejména na tvar průřezu housenek.

U všech housenek byly pozorovány nestability geometrie v místech jejich začátku a konce. Zatímco na začátcích housenek docházelo k nárůstu výšky a šířky housenek, ke konci docházelo k výškovému propadu. Nestabilní začátky jsou nejvíce patrné při nižších nastavených proudech, naopak konce jsou patrnější při proudech vyšších.

Z hlediska stability housenek lze říci, že k navařování jsou vhodné s výjimkou housenek navařených při nejnižších parametrech, 20 A u impulzního přenosu, 40 A u zkratového a IAC přenosu. Všechny další navařené housenky pak vykazují stabilní tvar po celé délce.

Pro technologii navařování je z vyzkoušených přenosů nejvhodnější IAC přenos. Tímto přenosem je možné vytvářet stabilní housenky s nízkým poměrem výšky ku šířce. Lze tak vytvářet například tenkostěnné výrobky.

Vhodnými přenosy jsou i impulzní a zkratový. U impulzního přenosu ovšem vzniká výrazně vyšší množství vneseného tepla. To by se dalo omezit vyšší rychlostí posuvu hořáku, což by zároveň vedlo k navařování užších housenek. Zkratový přenos je zejména při vyšších parametrech spojený s rozstříkem. Ovšem při nižším proudu do 90 A nebyl rozstřík pozorován.

Na tuto práci je možné navázat. Lze například řešit hloubku závaru jednotlivých přenosů. K tomu by bylo nutné ze vzorků vyřezat úseky a vytvořit výbrusy. Dále je možné zaměřit se na použití různých ochranných atmosfér, vnitřní strukturu navařeného kovu, která je ovlivněna teplem vnikajícím z hořícího oblouku a jeho mechanické vlastnosti. Další možností je tvorba návarů těmito přenosy ve více vrstvách a porovnávat a zhodnocovat jejich celkovou stabilitu. Lze se rovněž zaměřit na eliminaci nestabilit z oblastí začátku a konce návarových housenek, vznikajících při zapálení, respektive zhasnutí oblouku.

## 8. Citované zdroje

[1] – KOLAŘÍK, Ladislav, Jan SUCHÁNEK a Marie KOLAŘÍKOVÁ. Navařování metodou WAAM. MM průmyslové spektrum [online]. 2018, 07.02.2018, 2018(1), 60 [cit. 2018-07-30].

Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/navarovani-metodou-waam.html>

[2] – Jun Xiong, Guangjun Zhang, Hongming Gao, Lin Wu, Modeling of bead section profile and overlapping beads with experimental validation for robotic GMAW-based rapid manufacturing, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Volume 29, Issue 2, 2013, Pages 417-423, ISSN 0736-5845, <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2012>.

Dostupné z: (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0736584512001147>)

[3] – FRAZIER, William E. Metal Additive Manufacturing: A Review. Journal of Materials Engineering and Performance [online]. 2014, 23(6), 1917-1928 [cit. 2018-07-30]. DOI: 10.1007/s11665-014-0958-z. ISSN 1059-9495.

Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11665-014-0958-z>

[4] – S. W. Williams, F. Martina, A. C. Addison, J. Ding, G. Pardal & P. Colegrove (2016) Wire + Arc Additive Manufacturing, Materials Science and Technology, 32:7, 641-647, DOI: 10.1179/1743284715Y.0000000073

[5] – Mariacira Liberini, Antonello Astarita, Gianni Campatelli, Antonio Scippa, Filippo Montevicchi, Giuseppe Venturini, Massimo Durante, Luca Boccarusso, Fabrizio Memola Capece Minutolo, A. Squillace, Selection of Optimal Process Parameters for Wire Arc Additive Manufacturing, Procedia CIRP, Volume 62, 2017, Pages 470-474, ISSN 2212-8271.

Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.06.124>.

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827117301968>)

[6] – Welding makes its mark in 3D printing. Aerospace manufacturing [online]. 15.05.2016 [cit. 2018-07-30].

Dostupné z: <https://www.aero-mag.com/welding-makes-its-mark-in-3d-printing/>

[7] – Donghong Ding, Zengxi Pan, Dominic Cuiuri, Huijun Li, A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM), Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Volume 31, 2015, Pages 101-110, ISSN 0736-5845.

Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2014.08.008>.

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0736584514000696>)

[8] – YuMing Zhang, Yiwei Chen, Pengjiu Li, Alan T Male, Weld deposition-based rapid prototyping: a preliminary study, Journal of Materials Processing Technology, Volume 135, Issues 2–3, 2003, Pages 347-357, ISSN 0924-0136.

Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00867-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00867-1).

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013602008671>)

[9] – BENNETT, Jay. This Steel Bike Frame Was 3D Printed with a Robotic Welding Arm. Popular Mechanics [online]. 04.02.2016 [cit. 2018-07-30].

Dostupné z: <https://www.popularmechanics.com/technology/a19287/steel-bike-frame-3d-printed-with-a-robotic-welding-arm/>

[10] – Pracoviště WAAM (obrázek). In: WAAMMAT [online]. [cit. 2018 07 30].

Dostupné z: [https://waammat.com/blog/filo.jpg/@\\_images/3e1b3f8a-bc2a-421e-b335-3f4e2c58298a.jpeg](https://waammat.com/blog/filo.jpg/@_images/3e1b3f8a-bc2a-421e-b335-3f4e2c58298a.jpeg)

[11] – P. Sreeraj, T. Kannan, Subhasis Maji, Optimization of weld bead geometry for stainless steel cladding deposited by GMAW, America Journal of Engineering Research (AJER), Volume 02, Issue 05, Pages 178-187, ISSN 2320-0847.

Dostupné z: [http://www.ajer.org/papers/v2\(5\)/X02501780187.pdf](http://www.ajer.org/papers/v2(5)/X02501780187.pdf)

[12] – XIONG, Jun, Guangjun ZHANG, Jianwen HU a Lin WU. Bead geometry prediction for robotic GMAW-based rapid manufacturing through a neural network and a second-order regression analysis. Journal of Intelligent Manufacturing [online]. 2014, 25(1), 157-163 [cit. 2018-07-30]. DOI: 10.1007/s10845-012-0682-1. ISSN 0956-5515.

Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s10845-012-0682-1>

[13] – SIMON. New research into gas metal arc weld 3D printing unveils easier part removal techniques. 3D printer and 3D printing news [online]. 29.07.2015 [cit. 2018-07-30].

Dostupné z: <https://www.3ders.org/articles/20150729-new-research-into-gas-metal-arc-weld-3d-printing-unveils-easier-part-removal-techniques.html>

[14] – KRASSENSTEIN, Eddie. Mutoh Industries Unveils New Metal Arc Welding 3D Printer, the Value Arc MA5000-S1. 3Dprint [online]. 27.07.2015 [cit. 2018-07-30].

Dostupné z: <https://3dprint.com/84633/mutoh-industries-value-arc-3d/>

[15] – Daniel Ramos-Jaime, Ismael López- Juárez, Pedro Perez, Effect of Process Parameters on Robotic GMAW Bead Area Estimation, Procedia Technology, Volume 7, 2013, Pages 398-405, ISSN 2212-0173.

Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.04.050>.

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212017313000510>)

[16] – KANNAN, T. a J. YOGANANDH. Effect of process parameters on clad bead geometry and its shape relationships of stainless steel claddings deposited by GMAW. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology [online]. 2010, 47(9-12), 1083-1095 [cit. 2018-07-30]. DOI: 10.1007/s00170-009-2226-1. ISSN 0268-3768.

Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-009-2226-1>

[17] – IAC™ Intelligent Arc Control - proces pro snižování rozstříku a vneseného tepla při zkratovém přenosu. Automig – internetový magazín [online]. [cit. 2018-07-30].

Dostupné z: <http://automig.cz/o-svarovani/funkce/iactm-intelligent-arc-control/>

[18] – RAUSCH, Jason. Gas Metal Arc Welding Basics: Welding Current & Welding Voltage. EWI [online]. 30.06.2015 [cit. 2018-07-30].

Dostupné z: <https://ewi.org/gas-metal-arc-welding-basics-welding-current-welding-voltage/>

[19] – NADZAM, Jeff, ed. Gas Metal Arc Welding Product and Procedure Selection: Publication C4.200. Lincoln Global, 2014.

[20] – Guidelines For Arc Metal Arc Welding (GMAW). 154 557 C. Miller, 2012.

[21] – HEINRICH, Petr, Jan SMOLÍK a Ivan DIVIŠ. První český stroj pro hybridní výrobu. MM Průmyslové spektrum [online]. 12.04.2017, 2017(4), 104 [cit. 2018-07-30].

Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prvni-cesky-stroj-pro-hybridni-vyrobu.html>

[22] – Svařování tavící se elektrodou v ochranné atmosféře MIG/MAG [online]. [cit. 2018-07-30].

Dostupné z: <https://coptkm.cz/portal/reposit.php?action=0&id=33457&revision=-1&instance=2>

[23] – ČSN EN ISO 1011-1. Svařování - Doporučení pro svařování kovových materiálů: Část 1: Všeobecná směrnice pro obloukové svařování. Praha: Český normalizační institut, 2009.

[24] – GOECKE, S.F. Low Energz arc Joining Process for Materials Sensitive to Heat [online]. Germany: EWM high-tech welding, 2005, 1-5 [cit. 2018-07-30].

Dostupné z: <https://www.industrialsolutions-llc.com/resources/downloads/ewm-coldarc-brochure-detailed.pdf>

[25] – KAH, P., R. SUORANTA a J. MARTIKAINEN. Advanced gas metal arc welding processes. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology [online]. 2013, 67(1-4), 655-674 [cit. 2018-07-30]. DOI: 10.1007/s00170-012-4513-5. ISSN 0268-3768.

Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-012-4513-5>

[26] – Nový proces svařování studeným obloukem. Automig [online]. [cit. 2018-07-30].

Dostupné z: <http://automig.cz/svarovani-v-praxi/svarovani-ve-vyrobe/iactm/>

[27] – Additive manufacture of aluminium alloy components using the Cold Metal Transfer (CMT) process. TWI [online]. 13.01.2015 [cit. 2018-07-30].

Dostupné z: <https://www.twi-global.com/news-events/case-studies/additive-manufacture-of-aluminium-alloy-components-using-the-cold-metal-transfer-cmt-process-590/>

[28] – Nový standard ve svařovací technice Proces CMT (Cold Metal Transfer). Technický Portál [online]. 1.1.2006 [cit. 2018-07-30].

Dostupné z: [https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/novy-standard-ve-svarovaci-technice-proces-cmt-cold-metal-transfer\\_10667.html](https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/novy-standard-ve-svarovaci-technice-proces-cmt-cold-metal-transfer_10667.html)



- [29] – Cold Metal Transfer. Fronius [online]. [cit. 2018-07-30].  
Dostupné z: <http://www.hbt-weld.cz/wp-content/uploads/CMT-COLD-METAL-TRANSFER.pdf>
- [30] - S. Selvi, A. Vishvaksenan, E. Rajasekar, Cold metal transfer (CMT) technology - An overview, Defence Technology, Volume 14, Issue 1, 2018, Pages 28-44, ISSN 2214-9147.  
Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2017.08.002>.  
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214914717301022>)
- [31] – Migatronic Sigma Galaxy: (obrázek) [online]. [cit. 2018-07-30].  
Dostupné z: <https://www.weldingdirect.co.uk/ekmps/shops/nozallsLtd96/images/Migatronic-Migatronic-Sigma-Galaxy-C-MIG-Welder-400-Amp-10786-p.jpg>
- [32] – DUO Plus™ puls - MIG/MAG. Automig [online]. [cit. 2018-07-30].  
Dostupné z: <http://automig.cz/o-svarovani/funkce/duo-plustm-puls-migmag/>
- [33] – ČSN EN ISO 16834. Svařovací materiály: Drátové elektrody, dráty a tyče pro obloukové svařování vysokopevnostních ocelí tavící se elektrodou v ochranném plynu a jejich svarové kovy. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [34] – Nejpoužívanější přídavné materiály pro svařování, navařování a pájení a přípravky pro moření nerezavějících ocelí. In: Voestalpine Böhler Welding [online]. [cit. 2018-08-07].  
Dostupné z: [http://www.bohler-uddeholm.cz/media/nejpouzivanejsi\\_materialy\\_2015\\_2.pdf](http://www.bohler-uddeholm.cz/media/nejpouzivanejsi_materialy_2015_2.pdf)

## 9. Seznam obrázků

Obrázek 1 - Součást podvozku letadla vyráběná metodou WAAM [4] .....	14
Obrázek 2 - Výztuha křídla letadla [6] .....	14
Obrázek 3 - Jízdní kolo vyrobené technologií WAAM [9] .....	14
Obrázek 4 - Příklad pracoviště WAAM [10] .....	16
Obrázek 5 - tiskárna Value Arc MA5000-S1 [14] .....	20
Obrázek 6 - Weldprint 5AX [15].....	21
Obrázek 7 - Přehled rozsahu parametrů pro jednotlivé přenosy [22] .....	27
Obrázek 8 - Schéma průběhu Zkratového přenosu, zleva: hoření oblouku, tvorba kapky kovu, zkrat, oddělení kapky a opětovné zapálení oblouku [24] .....	29
Obrázek 9 - Schéma kapkového přenosu [19].....	30
Obrázek 10 - Schéma sprchového přenosu [19] .....	30
Obrázek 11 - Rozdíl v teoretickém průběhu proudu u IAC (plná čára) a zkratu (tečkovaná čára) [17].....	33
Obrázek 12 - Okamžik opětovného zapálení oblouku [17] .....	33
Obrázek 13 - Okamžik oddělení kapky [17] .....	33
Obrázek 14 – Průběh fází procesu CMT [29] .....	35
Obrázek 15 - Průběh procesu coldArc [24].....	36
Obrázek 16 - Svařovací zdroj Migatronic Sigma Galaxy [31] .....	37
Obrázek 17 - Housenky navařeny bez DUOplus, zleva: zkratový přenos, impulzní přenos, IAC (vlastní zdroj) .....	40
Obrázek 18 - Zkratový přenos 40 A (vlastní zdroj) .....	41
Obrázek 19 - Impulzní přenos 20 A (vlastní zdroj).....	41
Obrázek 20 - IAC 40 A (vlastní zdroj) .....	41
Obrázek 21 - Návary zhotovené s funkcí DUOplus, zleva zkrat, impulz, IAC (vlastní zdroj).....	42
Obrázek 22 - Impulzní přenos 60 A DUOplus (vlastní zdroj) .....	43

Obrázek 23 - Impulzní přenos 60 A (vlastní zdroj).....	43
Obrázek 24 - Zkratový přenos 60 A (vlastní zdroj) .....	43
Obrázek 25 - Zkratový přenos 60 A DUOplus (vlastní zdroj) .....	43
Obrázek 26 - Průběh proudu a napětí zkratového přenosu při 40 A (vlastní zdroj) .....	48
Obrázek 27 - Průběh proudu zkratového přenosu při 80 A (vlastní zdroj) .....	48
Obrázek 28 - Průběh proudu zkratového přenosu při 120 A (vlastní zdroj) .....	48
Obrázek 29 - Průběh proudu a napětí impulzního přenosu při 20 A (vlastní zdroj) .....	49
Obrázek 30 - Průběh proudu a napětí impulzního přenosu při 40 A (vlastní zdroj) .....	49
Obrázek 31 - Průběh proudu a napětí impulzního přenosu při 100 A (vlastní zdroj) .....	49
Obrázek 32 - Průběh proudu a napětí IAC přenosu při 40 A (vlastní zdroj) .....	50
Obrázek 33 - Průběh proudu a napětí IAC přenosu při 80 A (vlastní zdroj) .....	50
Obrázek 34 - Průběh proudu a napětí IAC přenosu při 130 A (vlastní zdroj) .....	50
Obrázek 35 - Průběh proudu, napětí a rychlosti podávání drátu u IAC přenosu při 80 A v celém rozsahu (vlastní zdroj) .....	51
Obrázek 36 - Průběh proudu, napětí a rychlosti podávání drátu u IAC přenosu při 80 A (vlastní zdroj).....	51
Obrázek 37 - Ukázka nestability na počátku housenky (vlastní zdroj) .....	52
Obrázek 38 - Příklad měření šířky návaru (vlastní zdroj).....	53
Obrázek 39 - Příklad nevhodně vytvořeného 3D snímku (vlastní zdroj) .....	53
Obrázek 40 - Příklad 3D snímku pod polarizovaným světlem (vlastní zdroj) .....	54

## 10. Seznam tabulek

Tabulka 1 - Zaručené hodnoty mechanických vlastností materiálu Union X 90 [34].....	39
Tabulka 2 - Chemické složení materiálu Union X 90 v hm.% [34] .....	39
Tabulka 3 – Odečtené a vypočtené parametry pro Zkratový přenos.....	44
Tabulka 4 - Odečtené a naměřené parametry pro Impulzní přenos.....	44
Tabulka 5 - Odečtené a naměřené hodnoty pro IAC přenos.....	45
Tabulka 6 - Naměřené hodnoty výšky a šířky návarů a jejich poměry .....	55

## 11. Seznam grafů

Graf 1 - Závislost $U(I)$ u jednotlivých přenosů .....	45
Graf 2 - Závislost $vd(I)$ u jednotlivých přenosů .....	46
Graf 3 - závislost $Q(I)$ u jednotlivých přenosů .....	46
Graf 4 - Závislost $m(I)$ u jednotlivých přenosů.....	47
Graf 5 – Závislost $\dot{m}(I)$ u jednotlivých přenosů.....	47
Graf 6 - Porovnání šířky návarových housenek jednotlivých přenosů .....	56
Graf 7 - Porovnání výšky návarů u jednotlivých přenosů.....	57
Graf 8 - Porovnání poměru výšky ku šířce návarových housenek.....	58

## 12. Seznam příloh

Příloha č. 1 – soubor snímků návarů na přiloženém DVD