



ČVUT
ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

Ověření koeficientu účinnosti procesu CMT svařování

DIPLOMOVÁ PRÁCE

AUTOR: Ing. Štěpán Dlouhý

VEDOUcí PRÁCE: doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE

STUDIJNÍ PROGRAM: Výrobní inženýrství

STUDIJNÍ OBOR: Bez specializace

Praha 2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Dlouhý** Jméno: **Štěpán** Osobní číslo: **457589**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Výrobní inženýrství**
Specializace: **Bez specializace**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Ověření koeficientu účinnosti procesu CMT svařování

Název diplomové práce anglicky:

Verification of the efficiency of the CMT welding process

Pokyny pro vypracování:

- 1) Popis výpočtu tepelného příkonu při obloukovém svařování a rešerše současného způsobu stanovení účinnosti jednotlivých metod svařování el. obloukem
- 2) Rozdělení a popis způsobů přenosu svarového kovu při MAG svařování a popis moderních modifikací metody
- 3) Rozbor problematiky kalorimetrického měření účinnosti metody MAG svařování
- 3) Návrh experimentu a realizace zkušebních měření pomocí robotizovaného svařování (včetně srovnání s CMT procesem)
- 4) Vyhodnocení dosažených výsledků

Seznam doporučené literatury:

- [1] Ježek, Š., Gurčík, T., Kolařík, L., Rohan, P. Calorimetric evaluation of thermal efficiency of selected metal transfers for MAG welding, Technological forum 2020, Praha, 2020
- [2] Pépe B., N., Egerland, S., Colegrove, P., A., Yapp, D., Leonhartsberger, A., Scotti, A. Measuring the Process Efficiency of Controlled Gas Metal Arc Welding Processes, Science and Technology of Welding and Joining, Volum 16, Issue 5, 2011, page 412-417
- [3] Egerland, S., Colegrove, P. Using Solid State Calorimetry for Measuring Gas Metal Arc Welding Efficiency, Arc welding, InTech, 2011, ISBN 978-953-307-642-3

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

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

Ing. Tomáš Gurčík, ústav strojírenské technologie FS

Datum zadání diplomové práce: **15.04.2021** Termín odevzdání diplomové práce: **20.08.2021**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2021**

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

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

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením pana doc. Ing. Ladislava Kolaříka, Ph.D., IWE, a to pouze pomocí podkladů uvedených v seznamu použité literatury v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

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 autora

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat panu doc. Ing. Ladislavu Kolaříkovi, Ph.D., IWE za vedení této diplomové práce a panu Ing. Tomášovi Gurčíkovi, IWE za asistenci při navařování vzorků pro experimentální část diplomové práce a také paní doc. Ing. Marii Kolaříkové, Ph.D., IWE za pomoc s metalografií. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Tomáši Horažďovskému z Ústavu fyziky, Fakulty strojní, ČVUT v Praze za spolupráci při měření měrné tepelné kapacity materiálů. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat celé své rodině za podporu v průběhu celého studia.

Anotace

Název diplomové práce:	Ověření koeficientu účinnosti procesu CMT svařování
Autor práce:	Ing. Štěpán Dlouhý
Vedoucí práce:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
Konzultant:	Ing. Tomáš Gurčík, IWE
Akademický rok:	2020-2021
Vysoká škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	12133 – Ústav strojírenské technologie
Vedoucí ústavu:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
Rozsah práce:	89 stránek, 16 tabulek, 45 obrázků
Klíčová slova:	CMT, Cold Metal Transfer, koeficient tepelné účinnosti, svařování

V posledních letech bylo vyvinuto mnoho inovativních svářecích technologií, které umožňují spojovat hybridní materiály jako např. ocel s hliníkovými slitinami. Mezi tyto nové technologie také patří svařovací proces CMT- Cold Metal Transfer od společnosti Fronius. CMT je technologie s nízkým vnesením tepla při svařování. Ověření tepelné účinnosti CMT metody svařování se věnovalo několik studií, avšak ty proběhly za různých podmínek. Cílem této diplomové práce je návrh experimentu a realizace zkušebních měření pomocí robotizovaného pracoviště a ověření koeficientu účinnosti procesu CMT svařování.

Tato práce vznikla za podpory projektu Centrum pokročilých leteckých technologií reg.č.: CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_019/0000826 financovaného z ESIF, OP VVV, Fakulty strojní, ČVUT v Praze.

Annotation

Title of the final thesis:	Verification of the efficiency of the CMT welding process
Author:	Ing. Štěpán Dlouhý
Supervisor:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
Consultant:	Ing. Tomáš Gurčík, IWE
Academic year:	2020-2021
University:	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	12133 – Department of Manufacturing Technology
Head of department:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D, IWE
Extent:	89 pages, 16 tables, 45 pictures
Keywords:	CMT, Cold Metal Transfer, welding, heat input efficiency

In recent years many innovative welding technologies have been developed to join hybrid materials such as steel with aluminum alloys. These new technologies also include CMT- Cold Metal Transfer welding process from company Fronius. CMT is a low heat input welding technology. Several studies were carried out to verify the heat input efficiency of the CMT welding method but these were carried out with various different conditions. The aim of the work is the design of an experiment and the implementation of test measurements using a robotic workplace and verification of the heat input efficiency of the CMT welding process.

Authors acknowledge support from the ESIF, EU Operational Programme Research, Development and Education, and from the Center of Advanced Aerospace Technology (CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_019/0000826), Faculty of Mechanical Engineering, Czech Technical University in Prague.

Obsah

1. ÚVOD A CÍL PRÁCE	11
2. TEORETICKÁ ČÁST.....	13
2.1 Vnesené teplo	13
2.2 Koeficient účinnosti svařovacího procesu	13
2.3 Koeficient účinnosti svařovacího procesu v publikacích	16
2.4 Metody stanovení vneseného tepla	21
2.4.1 Mokrý kalorimetry.....	22
2.4.2 Suchý kalorimetr.....	27
2.5 MAG technologie svařování.....	30
2.5.1 Přenos svarového kovu v elektrickém oblouku.....	30
2.5.2 Moderní modifikace metody MAG.....	35
2.5.3 CMT Technologie	44
3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	52
3.1 Měrná tepelná kapacita svařovaného základního materiálu	52
3.1.1 Příprava měření měrné tepelné kapacity základního materiálu.....	53
3.1.2 Měření měrné tepelné kapacity základního materiálu	55
3.1.3 Vyhodnocení měření měrné tepelné kapacity základního materiálu	56
3.2 Kalorimetrické měření svařování	57
3.2.1 Provedení kalorimetru.....	60
3.2.2 Svařovaný základní materiál.....	62
3.2.3 Příprava před svařováním.....	63
3.2.4 Výsledky kalorimetrického měření svařovacího procesu.....	66
4. ZÁVĚR	80
Seznam použitých literárních zdrojů	82

Seznam tabulek	86
Seznam obrázků.....	87
Přílohy.....	89

Seznam zkratek

Symbol	Jednotka	Popis
<i>CMT</i>		Cold Metal Transfer – modifikace metody MAG svařování - svařování se sníženým vneseným teplem do materiálu
<i>MAG</i>		Metal Activ Gas – obloukové svařování tavící se kovovou elektrodou v aktivním plynu
<i>MIG</i>		Metal Inert Gas – obloukové svařování tavící se kovovou elektrodou v inertním plynu
<i>TIG</i> <i>(GTAW)</i>		Tungsten Inert Gas (Gas Tungsten Arc Welding) - obloukové svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu
<i>SAW</i>		Submerged Arc Welding - svařování pod tavidlem
<i>SMA</i>		Shield Metal Arc - Ruční obloukové svařování obalenou elektrodou
<i>DCEP</i>		Direct Current Electrode Positive – stejnosměrný proud s nepřímou polaritou zapojení
<i>DCSP</i>		Direct Current Straight Polarity - stejnosměrný proud s přímou polaritou zapojení
<i>DCRP</i>		Direct Current Reverse Polarity - stejnosměrný proud s obrácenou polaritou zapojení
<i>AC</i>		Alternating Current – střídavý proud
<i>STT</i>		Surface tension transfer – modifikace metody MAG svařování (řízený zkratový proces)
<i>RT</i>		Radiographic test – Prozařovací zkouška
<i>YAG</i>		Yttrito hliníkový granát – typ aktivního prostředí pevnolátkového laseru
<i>IAC</i>		Intelligent Arc Control = Inteligentní regulace oblouku
<i>WiseRoot</i>		proces svařování krátkým obloukem od společnosti KEMPI
<i>TPS</i>		Trans Pulse Synergic
<i>ZM</i>		Základní materiál
<i>SK</i>		Svarový kov

Seznam použité symboliky

Symbol	Jednotka	Popis
U	[V]	Svařovací napětí
I	[A]	Svařovací proud
T	[°C]	Teplota
Q	[J]	Teplo
η, k	[-]	Koeficient účinnosti svařovacího procesu
v	[mm.s ⁻¹]	Svařovací rychlost
c	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	Měrná tepelná kapacita

Pozn.: další symboly jsou vysvětleny přímo v textu diplomové práce

1. ÚVOD A CÍL PRÁCE

V nejrůznějších oblastech průmyslu jako je automobilový, potravinářský nebo zdravotnický, je potřeba svařovat tepelně citlivé materiály, např. tenké plechy, povlakované plechy z korozivzdorné oceli, hliníkových slitin, případně z kombinace materiálů rozdílných vlastností. S potřebou rozšířit sortiment svařitelných materiálů přišli výrobci svařovacích zařízení s řadou inovací. V oblasti obloukového svařování byla umožněna integrace softwaru do svařovacího zdroje, podavače drátu a regulátoru plynu. Potřeba vyvinout nové modifikace obloukového svařování je spojena s technologickým vývojem zdroje svařování. Moderní svařovací zdroje energie těží z vývoje elektroniky a zavádění tyristorů, tranzistorů a jiných součástí.

Nové technologie díky digitalizaci umožnily zpětnou vazbu v krátkých časových intervalech (z milisekund na nanosekundy) a přinesly tak možnost inteligentního řízení svařovacího procesu. Výrobci svařovacího zařízení tak v posledních letech představili nové modely s nejrůznějšími pokročilými režimy svařování jako třeba: WiseRoot, Surface Tension Transfer, RMD, ColdArc, ColdMIG, Intelligent Arc Control nebo CMT. Technologie CMT – Cold Metal Transfer je svařovací proces, který byl patentován společností Fronius v roce 2004. Od tohoto roku proběhla však řada modifikací známé jako svařování CMT Pulse, CMT Advance nebo CMT Advanced Pulse. Řada těchto modifikací MIG/MAG svařování byly vyvinuta za účelem snížení vneseného tepla do materiálu.

Mnohdy však není prozkoumán maximální potenciál všech těchto nových technologií. Způsob přenosu svarového kovu a vliv teploty působením elektrického oblouku v různých režimech svařování je neustále vyvíjen a experimentálně ověřován. Dnes pro predikci vlastností svarových spojů a správný návrh procesu ve značné míře používají numerické simulace procesu svařování (založené na metodě konečných prvků) a u nich je kromě správné definice vlastností materiálu také velmi potřeba správně nastavit tepelný zdroj (resp. teplo vnesené do materiálu) – k čemuž je potřeba definovat tepelný příkon (a k tomu je potřeba odlišit jednotlivé metody na základě koeficientu jejich účinnosti). Koeficient tepelné účinnosti, tj. poměr tepla přivedeného elektrickým obloukem k množství tepla vneseného tepla při svařování, je významným faktorem při svařování. Tento koeficient je pro metodu MIG/MAG prozkoumán a uveřejněn v mnoha publikacích, avšak u modifikované metody CMT, která je odvozená od MIG/MAG, je tento koeficient stále předmětem zkoumání. Některé hodnoty

koeficientu tepelné účinnosti u CMT svařovacího procesu byly již publikovány, avšak podmínky experimentů stejně jako hodnoty koeficientů se liší.

Tato diplomová práce se zabývá zpřesněním hodnoty koeficientu účinnosti, tak aby mohlo být navázáno v dalších numerických simulacích svařovacího procesu.

2. TEORETICKÁ ČÁST

V této části budou představeny klíčové pojmy a veličiny, které souvisejí s tepelnými změnami v průběhu procesu svařování.

2.1 Vnesené teplo

Vnesené teplo je množství energie, které je použito při svařování k vytvoření specifické svarové housenky.

$$Vnesené\ teplo\ (J \cdot mm^{-1}) = \frac{Svařovací\ napětí\ (V) \times Svařovací\ proud\ (A) \times 60}{Rychlost\ svařování\ (mm \cdot min^{-1})} \quad (1)$$

Vnesené teplo (neboli tzv. tepelný příkon) ve svařovacích procesech je vždy důležité, protože ovlivňuje morfologii svarů, oblast přechodu mezi svarovým kovem a základním materiálem a také mikrostrukturu tepelně ovlivněné oblasti. Vnesené teplo ovlivňuje režim tuhnutí a sekundární metalurgické transformace. Obě skutečnosti mají vliv na mikrostruktury v různých zónách svarového spoje což je nejen tepelně ovlivněná oblast (TOO), ale také svarový kov (SK). Pokud je skutečné vnesené teplo vyšší, doba tuhnutí se zvětšuje a doby chlazení zkracuje. Obě vlastnosti vedou k zvětšení velikosti zrna. To pak zas ovlivňuje mechanické vlastnosti svarového kovu a materiálu v tepelně ovlivněné oblasti, jako je tvrdost a pevnost v tahu. Přesný odhad vneseného tepla má ve svařovací technologii velký význam.

2.2 Koeficient účinnosti svařovacího procesu

Tavné svařování je dnes nejpoužívanější způsob spojování kovových materiálů, nicméně významně ovlivňuje materiálové vlastnosti základního materiálu a to zejména mikrostrukturálními změnami v tepelně ovlivněné oblasti. Tyto změny jsou závislé na teplotním profilu a množstvím vneseného tepla při svařování. Proto je zásadní porozumět mechanismu přenosu tepla při svařování a zabývat se faktory, které mají podstatný vliv na vlastnosti svařeného materiálu. Přesnější popis a komplexnost numerického modelu potom přináší přesnější schopnost predikce výsledných vlastností materiálu. Klíčovými faktory je celkové množství dodané energie tepelným zdrojem, celkové množství absorbované energie svařeného vzorku. Poměr mezi množstvím absorbované energie a dodané energie je

definován jako účinnost svařovacího procesu a je označován řeckým symbolem eta (η). Takovouto účinnost lze obecně zapsat jako:

$$\eta = \frac{Q(\text{absorbované})}{Q(\text{dodané})} [-] \quad (2)$$

kde:

$Q(\text{absorbované})$ = je množství absorbovaného tepla daného svařeného vzorku [J]

$Q(\text{dodané})$ = je množství dodaného tepla danému svařenému vzorku [J]

Vztah (2) byl poté analyzován a zpřesňován. Dle [17] může být popsán jako

$$\eta = 1 - \frac{q(e) + (1 - n) * q(p) + m * q(w)}{q(a)} [-] \quad (3)$$

kde: η představuje teplotní účinnost oblouku, $q(e)$ rychlost přenosu tepla z oblouku na elektrodu v $J.s^{-1}$, $(1-n)*q(p)$ je část energie přenesená zářením a konvekcí z oblouku na vzorek za jednotku času [$J.s^{-1}$], m představuje část energie z anody vyzářená ze vzorku, $q(w)$ je část tepla z oblouku absorbovaná vzorkem v $J.s^{-1}$, $q(a)$ je průměrný okamžitý výkon vyplývající ze svařovaného procesu a je definován jako

$$q(a) = \frac{1}{t} * \int_0^t U * I * dt \quad (4)$$

kde t je celkový svařovací čas.

Celkové teplo dodané vzorku ze zdroje se potom vypočítá dle

$$Q(\text{dodané}) = \int_0^t U * I * dt \quad (5)$$

kde: $U [V]$ je napětí oblouku, $I [A]$ je proud, $t [s]$ je celkový čas na potřebný na svaření vzorku

Vnesené teplo pak počítáme dle [8]:

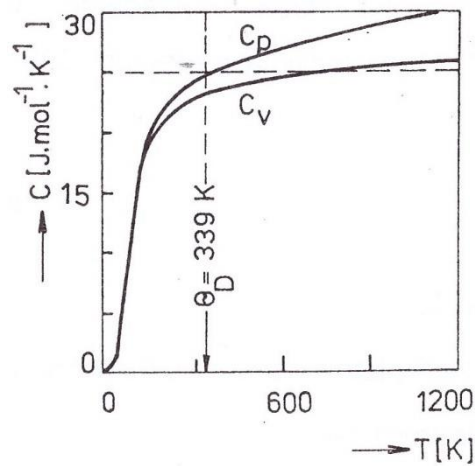
$$Q(\text{vnesené}) = m_{\text{zákl.mat.}} \int_{t_{\min}}^{t_{\max}} c_{\text{zákl.mat.}} * dt \quad (6)$$

kde: $m_{\text{zákl.mat.}}$ = hmotnost základního materiálu určeného k navařování [kg], $c_{\text{zákl.mat.}}$ = měrná tepelná kapacita základního materiálu určeného k navařování [$J.kg^{-1}.K^{-1}$], t_{\min} = minimální

teplota základního materiálu před zahájením svařování a t_{max} = maximální teplota během svařování [°C]. Tento vztah platí při užití kalorimetru jako izolovaného boxu, který bude popsán v kapitole 2.4.2. Měrná tepelná kapacita je veličina závislá na teplotě jak ukazuje obrázek 1 a teplotní závislost měrné tepelné kapacity se obvykle vyjadřuje trojčlenem

$$C_p = a + b \cdot T + c \cdot T^2 \text{ [J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (7)$$

Kde C_p je měrná tepelná kapacita při stálém tlaku, T je teplota [K] a členy a, b, c jsou empirické konstanty.



Obr. 1 Závislost měrné tepelné kapacity C_v a C_p na teplotě pro měď [6]

Vysvětlivky k obr.1: C_v [J.mol⁻¹.K⁻¹] je měrná tepelná kapacita při stálém objemu, C_p [J.mol⁻¹.K⁻¹] je měrná tepelná kapacita při stálém tlaku, T je teplota [K], Θ_D je Debyeova charakteristická teplota [K] – pro měď $\Theta_D = 339$ K

2.3 Koeficient účinnosti svařovacího procesu v publikacích

Výpočtem vneseného tepla a s tím související koeficienty tepelné účinnosti se zabývá mnoho prací od různých autorů a budou v této kapitole postupně představeny.

1. ČSN EN 1011-1:2009 [13]

Tato evropská norma uvádí výpočet vneseného tepla jako:

$$Q = k * \frac{U * I}{v} * 10^{-3} \text{ [kJ * mm}^{-1}\text{]} \quad (8)$$

kde:

Q je vnesené teplo [kJ.mm⁻¹]

k je koeficient tepelné účinnosti [-]

U je napětí na oblouku [V]

I je svařovací proud [A]

v je rychlost svařování [mm.s⁻¹]

Vztah (8) vlastně odpovídá vztahu (1), ale jde zde zohledněna metoda svařování – vynásobením koeficientem účinnosti. Koeficient tepelné účinnosti je oproti běžnému označení řeckým symbolem η v této evropské normě označen jako “ k ” (což bude dále používáno i v této diplomové práci). Tato evropská norma uvádí koeficienty tepelné účinnosti pro jednotlivé metody svařování, viz. tab. 1.

Tab. 1 Hodnoty koeficientu tepelné účinnosti dle evropské normy EN 1011-1: 2009 [13]

Číslo metody*	Metoda svařování	k
121	Svařování pod tavidlem	1,0
111	Ruční obloukové svařování obalenou elektrodou	0,8
131	MIG svařování - obloukové svařování tavící se elektrodou v inertním plynu	0,8
135	MAG svařování - obloukové svařování tavící se elektrodou v aktivním plynu	0,8
114	Obloukové svařování plněnou elektrodou bez ochranného plynu	0,8
136	Obloukové svařování tavidlem plněnou elektrodou v aktivním plynu	0,8
138	Obloukové svařování tavidlem plněnou elektrodou v inertním plynu	0,8
141	TIG svařování - obloukové svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu	0,6
15	Plazmové svařování	0,6

Pozn.: *) značení metod svařování podle ČSN EN ISO 4063

Metoda s největší účinností je u obloukových metod brána metoda 121, koeficient $k=1$, i když z technického hlediska účinnost nemůže být nikdy rovna 1 = je to zjednodušeno a zaokrouhleno. Naopak nejnižší poměr mezi vneseným a dodaným teplem vykazuje metoda TIG a plazmové svařování ($k = 0,6$), které využívají neodtavující se elektrodu, jejíž zahřívání vlivem působení elektrického oblouku představuje tepelné ztráty. Metody s odtavující se elektrodou mají proto účinnost vyšší ($k = 0,8$).

Jak je patrné z tabulky, koeficienty tepelné účinnosti nepokrývají nové typy oblouků a moderní metody přenosu kovu a pro získání spolehlivých výsledků numerické simulace je proto zapotřebí zpřesnit koeficient tepelné účinnosti pro danou metodu a režim svařování.

2. Ostatní literatura

Tab. 2 Koeficienty účinnosti pro různé metody svařování oceli a hliníku dle D. Radaje [19]

Označení metody svařování podle ČSN EN ISO 4063	Odvedené teplo q [kJ/s]	Svařovací rychlost v [mm/s]	Odvedené teplo/vzdálenost q_w [kJ/mm]	Koeficient účinnosti η_h [-]
111	1-20	< 5	< 3,5	0,65 – 0,90
131/135	5-100	< 15	< 2	0,65 – 0,90
141	1-15	< 15	< 1	0,20 – 0,50
121	5-250	< 25	< 10	0,85 – 0,95
51	5-250	< 150	< 0,1	0,95 – 0,97
52	0,5-10	< 150	< 0,05	0,80 – 0,95
15	1-5	< 10	< 1	0,25 – 0,85

Tab. 3 Koeficienty tepelné účinnosti pro různé metody svařování dle T. Graye a kol. [20]

Process	Variant	Efficiency	Shielding	Thickness (mm)	Configuration	Material	Power (kVA)	Reference	
Gas tungsten arc (GTA)	—	0.22–0.46	Argon	—	—	Al	—	Grong ¹¹	
	—	0.55–0.80	Helium	—	—	Al	—	Grong ¹¹	
	DCE +ve	0.57–0.58	Helium	—	Bead-on-plate	Al	2.4–2.8	Cantin and Francis ¹²	
	DCE +ve	0.60–0.63	He/Ar –75/25	—	Bead-on-plate	Al	2.2–2.8	Cantin and Francis ¹²	
	DCE +ve	0.52–0.58	Argon	—	Bead-on-plate	Al	1.6–3.8	Cantin and Francis ¹²	
	DCE –ve	0.85–0.89	Helium	—	Bead-on-plate	Al	1.9–3.6	Cantin and Francis ¹²	
	DCE –ve	0.85–0.89	He/Ar –75/25	—	Bead-on-plate	Al	1.5–2.9	Cantin and Francis ¹²	
	DCE –ve	0.76–0.80	Argon	—	Bead-on-plate	Al	1.1–2.4	Cantin and Francis ¹²	
	DCE –ve	0.44–0.53	Argon	—	Bead-on-plate	Steel	3.8–5.6	DuPont and Marder ¹³	
	—	0.25–0.75	Argon	—	—	Steel	—	Grong ¹¹	
Gas metal arc (GMA)	—	0.70–0.85	—	—	Bead-on-plate	Al	4.5–10.0	Christensen <i>et al.</i> ¹⁴	
	—	0.66–0.69	—	—	Bead-on-plate	Steel	10.0–12.0	—	
	—	0.79–0.91	Argon	—	Bead-on-plate	S/steel	6.2–14.0	DuPont and Marder ¹³	
	—	0.66–0.70	Argon	—	—	Steel	—	Grong ¹¹	
	—	0.75–0.93	CO ₂	—	—	Steel	—	Grong ¹¹	
	Dip transfer	0.68–0.72	Ar/CO ₂ : 90/10	12.7	Bead-on-plate	Steel	—	Joseph <i>et al.</i> ¹⁵	
	Spray transfer	0.70–0.82	Ar/CO ₂ : 90/10	12.7	Bead-on-plate	Steel	—	Joseph <i>et al.</i> ¹⁵	
	—	0.70*	Ar/CO ₂ : 80/20	4.0	Close-butt	Steel	7.1	Colegrove <i>et al.</i> ¹⁶	
	Pulsed arc	0.68–0.72	Ar/CO ₂ : 90/10	12.7	Bead-on-plate	Steel	—	Joseph <i>et al.</i> ¹⁵	
	Pulsed arc	0.58*	Ar/CO ₂ : 80/20	4.0	Close-butt	Steel	7.7	Colegrove <i>et al.</i> ¹⁶	
	Pulsed arc	0.77–0.79	Ar/CO ₂ : 82/18	5.0	Bead-on-plate	Steel	4.8–5.1	Pépe <i>et al.</i> ¹⁷	
	Pulsed arc	0.86	Ar/CO ₂ : 82/18	12.0	Groove	Steel	5.0	Pépe <i>et al.</i> ¹⁷	
	Cold metal transfer	0.90*	Ar/CO ₂ : 80/20	4.0	Groove	Steel	3.8	Colegrove <i>et al.</i> ¹⁶	
	Cold metal transfer	0.80	Ar/CO ₂ : 82/18	5.0	Bead-on-plate	Steel	3.0	Pépe <i>et al.</i> ¹⁷	
	Cold metal transfer	0.87	Ar/CO ₂ : 82/18	12.0	Groove	Steel	3.1	Pépe <i>et al.</i> ¹⁷	
	Flux-cored wire	0.83–0.85*	Ar/CO ₂ : 80/20	5.0–6.0	Groove	Steel	5.8	Camilleri ⁷	
	Flux-cored wire	0.84–0.85*	Ar/CO ₂ : 80/20	6.5	Fillet	Steel	6.1–6.8	Camilleri ⁷	
	Shielded metal arc (SMA)	AC	0.66–0.85	—	—	—	Steel	3.0–7.0	Christensen <i>et al.</i> ¹⁴
		Submerged arc	0.81–0.89	—	—	Bead-on-plate	Steel	6.8–11.8	DuPont and Marder ¹³
	—	0.91–0.99	—	—	—	Steel	10.0–43.0	Christensen <i>et al.</i> ¹⁴	

Vysvětlivky:

- GTA - TIG svařování (141), obloukové svařování neodtavující se wolframovou elektrodou v inertním plynu

- *GMA – MIG/MAG svařování (131/135), obloukové svařování odtavující se kovovou elektrodou v inertním/aktivním ochranném plynu*
- *SMA ruční obloukové svařování obalenou elektrodou (111)*
- *SAW (Submerged arc welding) – svařování pod tavidlem (121)*

Tab. 4 Koeficienty účinnosti dle různých zdrojů

Označení metody svařování podle ČSN EN ISO 4063	Název svařovací metody	Koeficient účinnosti η_h [-]	Zdroj
51	Elektronové svařování	0,90	[24]
131	MIG - obloukové svařování tavící se elektrodou v inertním plynu	0,85	[25, 26]
141	TIG - Obloukové svařování netavící se elektrodou v inertním plynu	0,67 – 0,80	[27-29]
52	Svařování CO ₂ laserem	0,20 – 0,90	[30]
52	Svařování Nd:YAG laserem	0,38 – 0,67	[31]
15	Plazmové svařování	0,47 – 0,75	[26, 28]
121	Svařování pod tavidlem drátovou elektrodou	0,90	[25,26, 32]
111	Ruční obloukové svařování obalenou elektrodou	0,75	[25]

Tab. 5 Typické hodnoty koeficientů tepelné účinnosti pro různé způsoby obloukového a plamenového svařování dle Jr. Messlera a W. Roberta [13], čísla uvedená v závorkách symbolizují metodu svařování dle ČSN EN ISO 4063 [35]

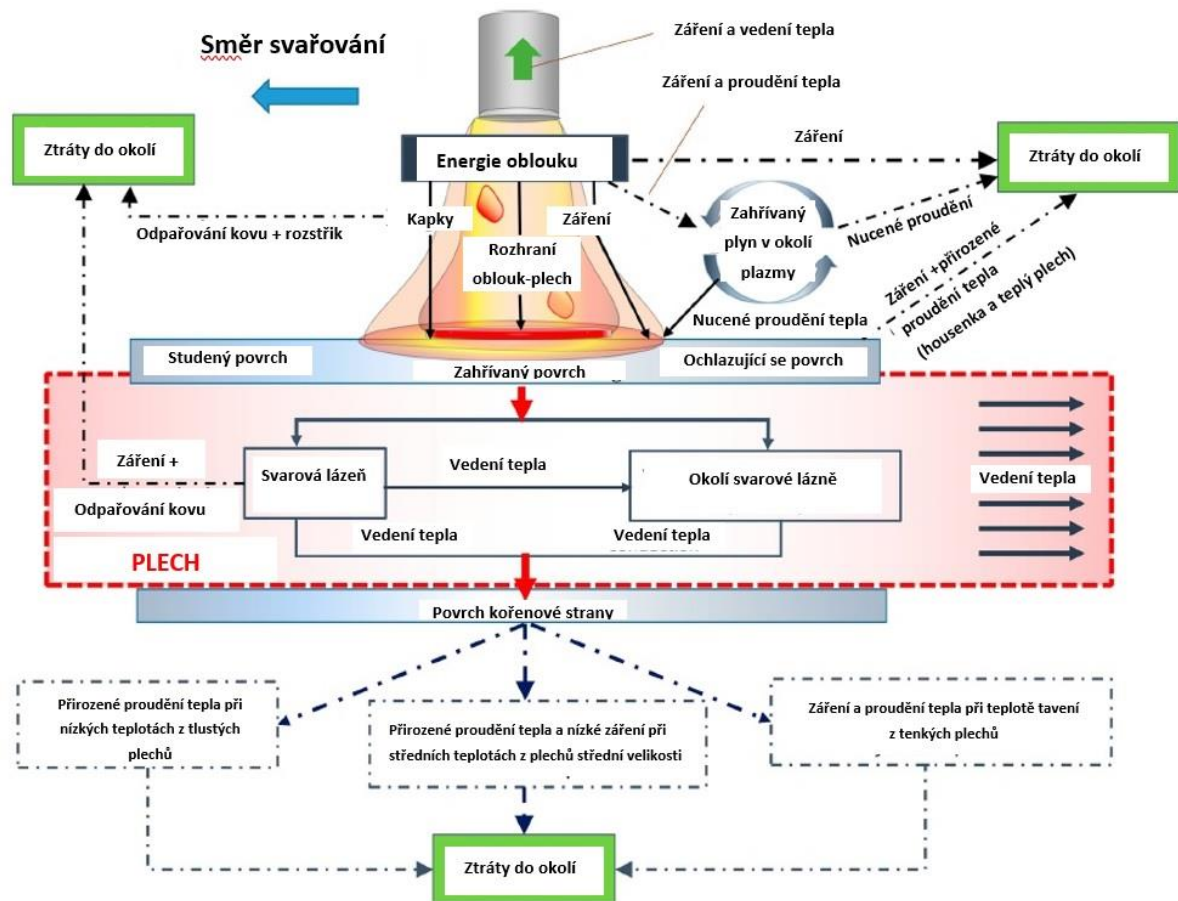
Označení metody svařování dle ČSN EN ISO 4063	Název svařovací metody	Koeficient účinnosti η_h [-]
311	Tavné svařování plamenem <ul style="list-style-type: none"> - Palivo s nízkou rychlostí spalování - Palivo s vysokou rychlostí spalování 	0,25 – 0,50 0,50 – 0,80
141	TIG svařování <ul style="list-style-type: none"> - DCSP režim s nízkým proudem - DCSP režim s vysokým proudem - DCRP režim - AC režim 	0,40 – 0,60 0,40 – 0,80 0,20 – 0,40 0,20 – 0,50
15	Plazmové obloukové svařování <ul style="list-style-type: none"> - Natavovací svařování (melt-in režim) - Svařování klíčovou dírkou (keyhole režim) 	0,70 – 0,85 0,85 – 0,95
135	MAG svařování <ul style="list-style-type: none"> - Zkratový přenos - Sprchový přenos 	0,60 – 0,75 0,65 – 0,85
111 136	Ruční obloukové svařování obalenou elektrodou Obloukové svařování plněnou elektrodou (trubičkovým drátem) v aktivním plynu	0,65 – 0,85
121	Svařování pod tavidlem	0,85 – 0,99
72	Elektrostruskové svařování	0,55 – 0,85
51	Elektronové svařování <ul style="list-style-type: none"> - Natavovací režim (melt-in režim) - Svařování klíčovou dírkou (keyhole režim) 	0,70 - 0,85
52	Laserové svařování <ul style="list-style-type: none"> - reflexní povrchy nebo napařování - svařování klíčovou dírkou (keyhole režim) 	0,005 - 0,50 0,50 – 0,75

Z uvedeného přehledu je patrné, že hodnoty koeficientu tepelné účinnosti se nejen pro různé metody svařování velmi liší, ale liší se i hodnoty pro stejné metody, ale stanovené různými autory. Účinnost procesu svařování MAG, která je předmětem tohoto šetření, se liší. DuPont a Marder (1995) a Bosworth (1991), kteří používali kalorimetry na vodní bázi, tvrdili, že účinnost by mohla být mezi 80-90% [8]. Joseph (2003), který použil kalorimetr s tekutým dusíkem a svary svařované až 60 vteřin tvrdil, že hodnota je blíže k 70 %. Také použitím kalorimetru s tekutým dusíkem (Pépe, 2010 [8]) bylo zjištěno, že účinnost pro svařovací metodu CMT se pohybovala mezi 78-88%. I když se nezdá, že by byl jakýkoli rozdíl mezi CV (konstatní napětí) a pulzním svařováním (Joseph et al. 2003 a Bosworth, 1991). Další články (Hsu a Soltis, 2002 a Bosworth, 1991) uvedly, že účinnost režimu zkratu nebo STT-surface tension transfer jsou výrazně vyšší (až 95%) [34].

Metodami stanovení množství absorbovaného tepla při svařování na daném vzorku se zabývalo mnoho experimentálních prací a budou podrobně probrány v následujících kapitolách.

2.4 Metody stanovení vneseného tepla

Popis teplotního chování materiálu při svařování je komplikovaná záležitost a mnoho studií ať už numerických nebo experimentálních vykazují mnoho nepřesností a chyb. Při analýze tepelné bilance svařovacího procesu, je nutné uvažovat všechny zdroje tepelných ztrát, které mohou později přispět k nepřesnostem experimentu. Například u kalorimetrické metody při měření vneseného tepla a následného určení účinnosti elektrického oblouku, vykazují prezentované výsledky systematické chyby díky nekontrolovatelným tepelným ztrátám vzorku v čase uplynulém mezi zahájením svařování a dokončením měření. Rovněž k tepelným ztrátám, které nejsou dále uvažovány, dochází při přesunu vzorku do kalorimetru po dokončení svařování. Většina prací se rovněž nezabývá opakovatelností výsledků měření a analýzou nahodilých chyb. Obr. 2 naznačuje přenos tepla (zářením, vedením a prouděním) v průběhu svařování při pohybu elektrického oblouku.



Obr. 2 Schématické znázornění vstupu a výstupu tepla ze svařovaného plechu během obloukového svařování [14]

Všeobecně lze říci, že vnesené teplo a tepelné účinnosti využívané pro predikci metalurgických vlastností plynoucí z obloukového svařování jsou velmi silně ovlivněny podmínkami, za kterých jsou stanoveny, jako je: základní materiál, rozměry vzorku, svařovací parametry nebo okolní podmínky.

K tepelné analýze svařovacího procesu i ověření numerických modelů se používají nejrůznější typy kalorimetrů, které budou představeny v následujících kapitolách.

2.4.1 Mokrý kalorimetry

Kryogenní kalorimetr, kde chladicí látku obvykle tvoří zkapalněný dusík, je založen na principu měření zbytkové tepelné energie, která byla vložena nanášením svarové housenky na kovovou desku definované velikosti. Tato metoda měření neuvažuje tepelné ztráty v průběhu svařování. Princip této kalorimetrické zkoušky je kvantifikace absorbovaného tepla deskou během navařování. Tato deska je v co nekratším čase po dokončení svařování ponořena do Devarovy nádoby s kapalným dusíkem. Celkové teplo absorbované deskou po svařování je

určeno znalostí latentního výparného tepla dusíku, hmotností desky a hmotností Dewarovy nádoby před a po dokončení svařování.

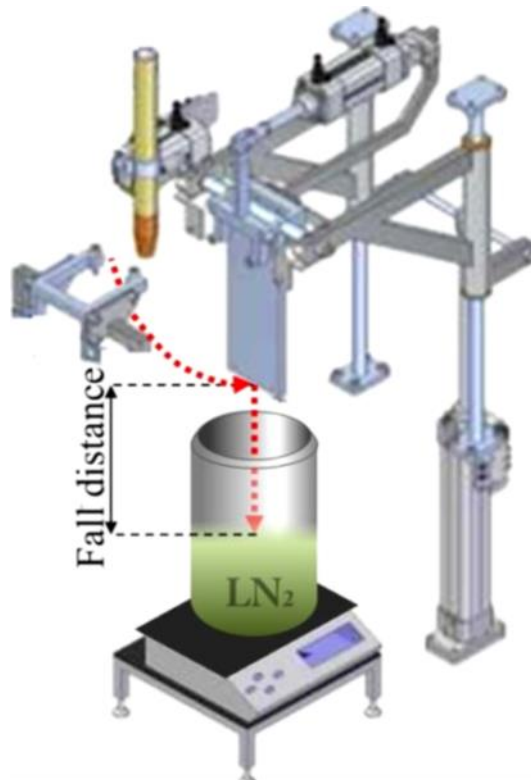
Významnými zdroji nepřesností, které ovlivňují celkové výsledky měření jsou:

1. *Vliv operátora:* Zkušební deka musí být po dokončení svařování přemístěna ze svařovacího přípravku do kalometrické nádoby. Pokud je deska přemísťována manuálně hraje významnou roli čas potřebný na přemístění desky a samozřejmě také trajektorie, která nemusí být pokaždé stejná. To znamená, že šíření tepla prouděním vzduchu bude pokaždé trochu jiné. Toto vnáší potom do měření nahodilé chyby, které se dají odstranit automatizací této operace. Nicméně zdroje pro tuto chybu vedou navíc k systematické chybě jelikož čas a trajektorie jsou nenulové a dochází tak vždy k tepelným ztrátám.
2. *Délka svarové housenky:* Pokud je svarová housenka příliš dlouhá potom dochází před ponořením desky ke značným tepelným ztrátám z povrchu svarové housenky, ale také z povrchu zkušební desky. Proto dlouhé svarové housenky povedou k nízkým hodnotám absorbovaného tepla na jednotku délku svarové housenky. Oproti tomu příliš krátké svarové housenky dostatečně neprezentují svařovací proces jelikož není dosažena tepelná rovnováha. Toto je typická systematická chyba měření.
3. *Velikost zkušební desky:* charakteristiky jako je délka, tloušťka a šířka zkušební desky, bez ohledu na délku svarové housenky, budou ovlivňovat ztrátové teplo z vrchu, zespodu i z bočních stran v mezičase po svaření desky a ještě před tím před zahájením kalorimetrického měření. I když velikost zkušební desky zůstane stejná, při změně svařovacích parametrů dojde ke změnám tepelných ztrát, které se projeví jako systematická chyba měření.

Uspořádání kryogenického kalorimetru dle O. Liskevycche a kol. [15]

Aby byly minimalizovány náhodné chyby z tepelného zdroje, byly svařovací podmínky při každém opakovaném svařování, udržovány co možná nejvíc stejné (elektronický zdroj napětí, plně automatizovaný přípravek posun svářecího aparatury). Během svařování byly monitorovány svařovací parametry. Rovněž aby byly minimalizovány náhodné chyby díky vlivu operátora, byl použit plně automatický kryogenní kalorimetr. Přípravek, vybavený mechanicko-pneumatickým systémem, udržuje svařovaný vzorek při svařování a poté jej

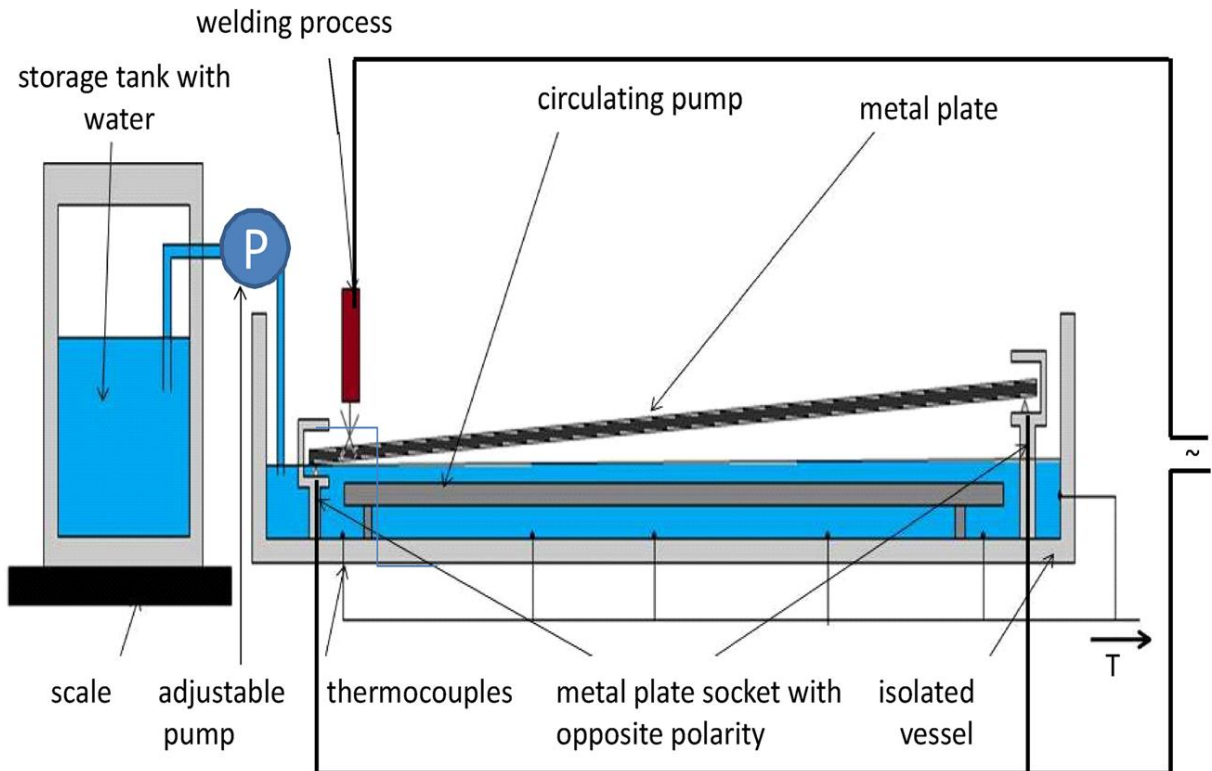
bezprostředně po dokončení svařování automaticky upustí do Dewarovy nádoby. Toto uspořádání jako celek zajišťuje vysokou opakovatelnost měření.



Obr. 3 Schématické uspořádání kryogenního kalorimetru s důrazem na stálou trajektorii a pádovou výšku zkušební desky [15], vysvětlivky: Fall distance ... pádová výška

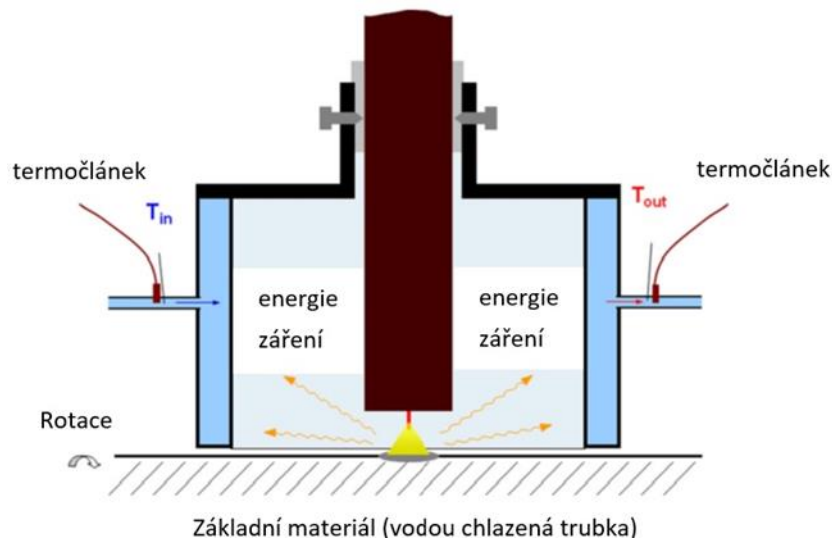
Uspořádání diferenciálního vodního kalorimetru dle A. Haelsiga a kol. [16]

Systém je založen na měřeního teplotního rozdílu kalorimetrické kapaliny před a po svařování. Svařovací hlava se při svařování automaticky pohybuje podél nakloněné zkušební desky a souběžně stoupá vodní hladina v kalorimetrické nádobě s definovaným odstupem od bodu svařování. Po dokončení svařovacího procesu je celá zkušební deska ponořena do vody dokud není dosažena teplotní rovnováha mezi zkušební deskou a vodou. Teplota vody, měřená termočlánkem umístěným uvnitř kalorimetrické nádoby, je zaznamenávána od zahájení svařování až po jeho dokončení. Účinnost svařovacího procesu je vyhodnocena na základě poměru mezi teplem vneseným do zkušební desky a elektrickou prací svařovacího procesu. Analýzou byla zjištěna standardní odchylka účinnosti okolo +/-3%.



Obr. 4 Schématické uspořádání ponorného vodního kalorimetru [16]

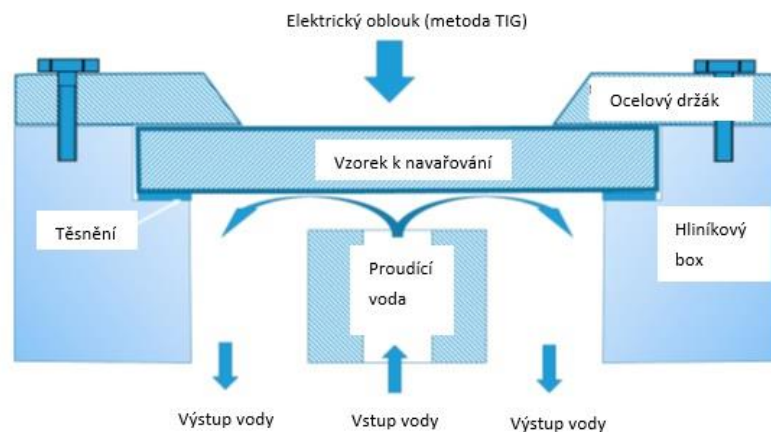
Díky zvonovitému dvojitému plášti svařovací hlavy, který je navíc vodou chlazený, je možné vedle měření vneseného tepla také měřit tepelné ztráty sáláním a prouděním. Tento zvon je připevněn na svařovací hlavu a zakrývá svařovací oblouk. Tepelné ztráty sáláním, prouděním a vedením při svařování jsou vypočítány na základě měření teplotního rozdílu chladicí vody na vstupu a na výstupu ze zvonu. Analýzou byla zjištěna standardní odchylka měření +/-4%. Navíc je připevněn chladicí aparát přímo na zdroj proudu. To umožňuje také výpočet množství disipace energie do chladicí vody ze svařovací hlavy a z její součásti vodící proud. Standardní odchylka systému je +/-2%.



Obr. 5 Vodou chlazená svařovací hlava [16]

Kalorimetr s vodou chlazenou stacionární anodou dle Hurtiga a kol. [14]

Studie byla provedena za použití kalorimetru s vodou chlazenou anodou se stacionární TIG svařovací hlavou upevněnou ve středu zkušebního tělesa.

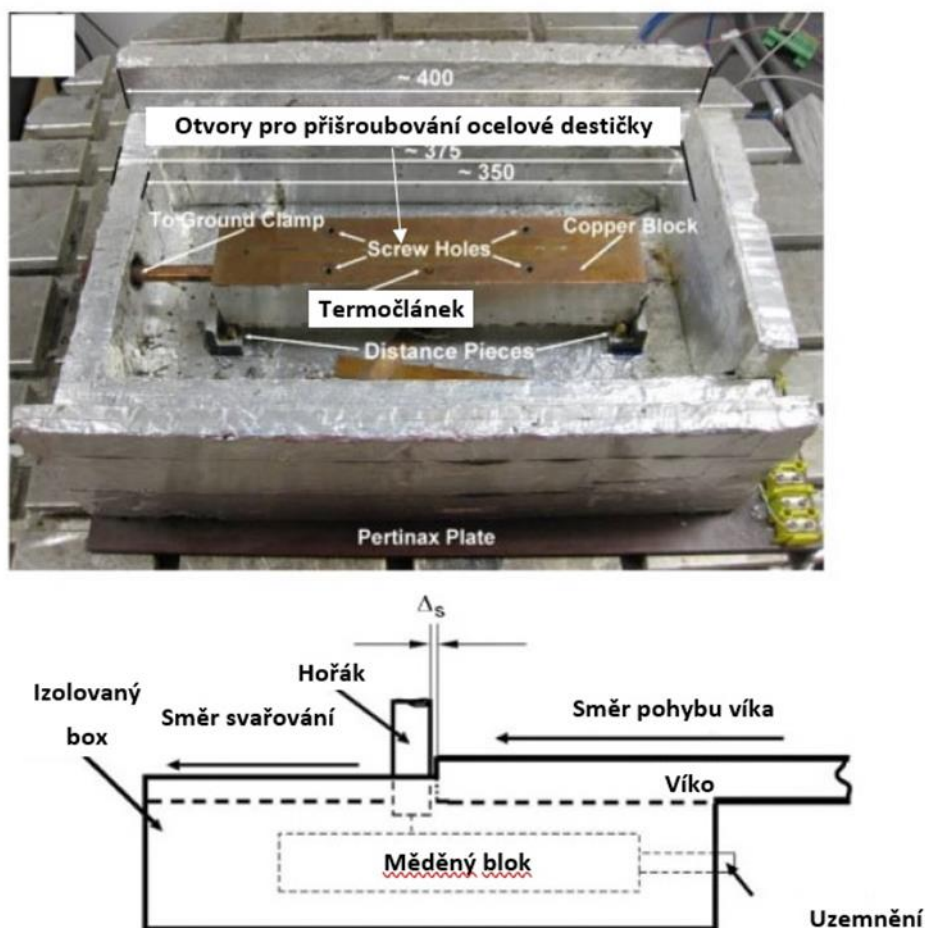


Obr. 6 Konstrukční uspořádání kalorimetru s vodou chlazenou stacionární anodou [14]

Zkušební těleso je uchyceno ve svorkách přičemž těsnění v místech dotyku zajišťuje tepelnou bariéru. TIG svařování je vedeno středem z vrchní strany vzorku. Ze spodní části kalorimetru je vzorek průběžně oplachován řízeným průtokem vody. Teplota vody na vstupu a výstupu je měřena termočlánekem typu K. Průtok vody byl měřen průtokoměrem umístěným na výstupu vody. Experiment byl prováděn na zkušebním tělese, které mělo tvar disku o průměru 80 mm a tloušťce 6 mm, vyrobeného ze slitiny mědi, tj. materiálu s vysokou teplotní difuzivitou. Tvar disku usnadňuje přenos vneseného tepla na povrch plechu, kde cirkuluje voda [14].

2.4.2 Suchý kalorimetr

N. Pépe a kolektiv spoluautorů přišel s prací [8], která porovnává měření koeficientu tepelné účinnosti CMT svařování v kalorimetru s kapalným dusíkem a suchého kalorimetru konstruovaný jako izolovaný box, viz. obr. 7.

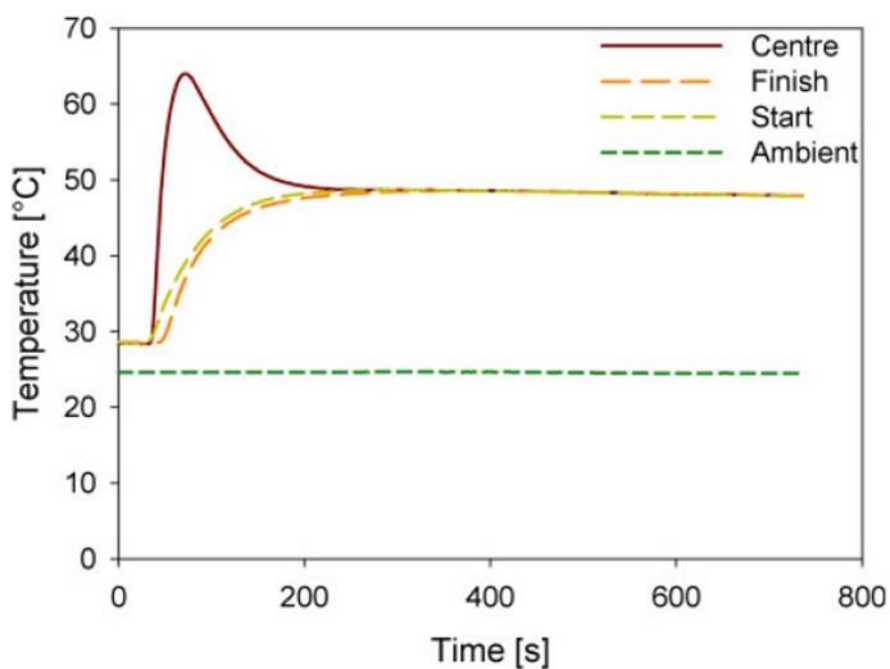


Obr. 7 Schéma suchého kalorimetru jako izolovaného boxu [8]

Jako základní materiál určený pro experiment byla použita ocel S235J2, o velikosti 250x50x5 mm a dále potom vzorek o velikosti 250x50x12 mm ze stejné oceli, avšak s drážkou a obdélníkovým průřezem o velikosti 7,5x10 mm. Tento ocelový pás byl připevněn k měděnému bloku pomocí šroubů. Uvnitř měděného bloku byly umístěny tři termočláanky a to na začátku, uprostřed a na konci. Izolovaný box je konstruován z polyuretanové pěny s nanesenou hliníkovou fólií. Tato fólie odráží radiční teplo zpět do kalorimetru a brání tak tepelným

ztrátám. Díky nízkému specifickému teple a nízké tepelné vodivosti polyuretanové pěny vznikají jen nepatrné tepelné ztráty.

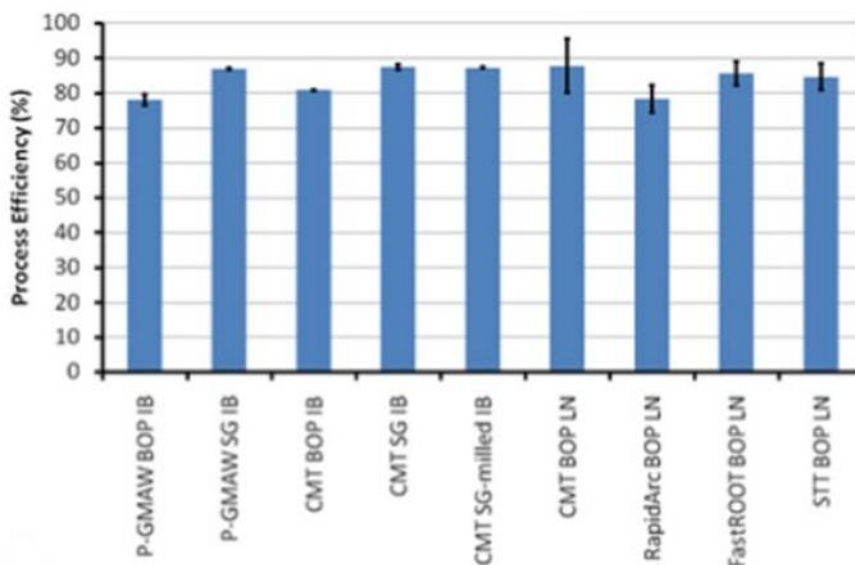
V průběhu svařování je sledována teplota pomocí termočlánků instalovaných v měděném bloku kalorimetru. Typický průběh teplot zaznamenaných termočlánky je uveden na obrázku 8.



Obr. 8 Závislost teploty vzorku na čase v průběhu svařování [8]

Z grafu teplotní závislosti (viz. obr. 8) jsou odečítány hodnoty teplot před zahájením svařování a po dokončení svařování, resp. stabilizaci teplot. Z výsledného rozdílu teplot je vypočítáno vnesené teplo do svařovaného vzorku.

Provedením několika experimentů s různými svařovacími parametry byly získány hodnoty koeficientu tepelné účinnosti pro metodu pulzní GMAW (MIG/MAG) a CMT. Experimenty proběhly pro porovnání v mokřím kryogenním kalorimetru a v suchém kalorimetru – izolovaném boxu. Byl pozorován vliv navařování bez drážky, s drážkou a bez drážky s opískovaným povrchem, viz. obrázek 9.



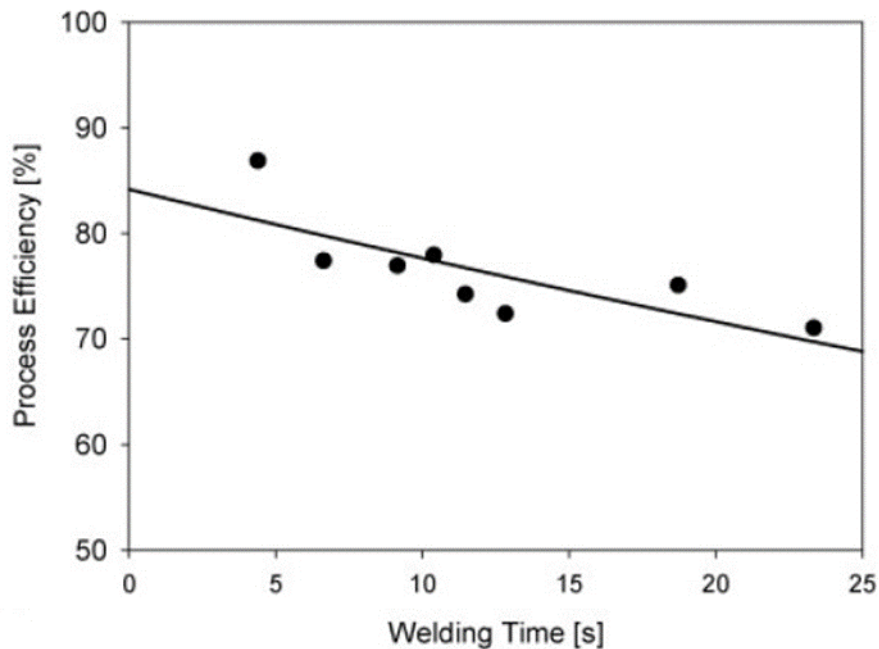
Obr. 9 Koeficient tepelné účinnosti pro jednotlivé metody svařování a různé kalorimetry [8]

Vysvětlivky: index IB = izolovaný box, LN = kalorimetr s kapalným dusíkem, SG = svar s drážkou, BOP = návar na destičku, milled = válcovaný povrch destičky

Z uvedeného obrázku č. 9 je patrné, že pro dané svařovací parametry a podmínky kalorimetrie byly dosaženy hodnoty koeficientu tepelné účinnosti k pro svařovací proces CMT v rozmezí 0,80 až 0,88. Hodnoty byly vyšší u vzorků s drážkou, protože radiční ztráty byly zachyceny stěnami drážky.

Bez ohledu na použitou metodu kalorimetrie jsou přesná měření účinnosti procesu svaru velmi obtížná a plná systematických i náhodných chyb. U obou metod kalorimetrie v případě CMT procesu svařování se potvrdila blízká shoda hodnoty koeficientu tepelné účinnosti (81%/88%), přičemž obě metody kalorimetrie jsou velice rychlé. U kryogenní kalorimetrie trvá měření přibližně 1 minutu, u izolovaného boxu obvykle 5-6 min. U izolovaného boxu se tolik neprojevují náhodné chyby (+/- 1,5%) na rozdíl u kapalného kryogenního kalorimetru (+/- 8%).

Největší nevýhodou při použití metody izolovaného boxu je nutnost znát měrnou tepelnou kapacitu svařovaného materiálu, což může být obtížné, pro některé méně známé materiály. Tato diplomová práce se rovněž zabývá závislostí koeficientu tepelné účinnosti na čase svařování, resp. délce zkušební vzorku a délce návaru zkušební svarové housenky Z obrázku 10 vyplývá lineární pokles účinnosti s prodlužujícím se časem svařování.



Obr. 10 Závislost koeficientu tepelné účinnosti (process efficiency) na čase svařování (welding time) [8]

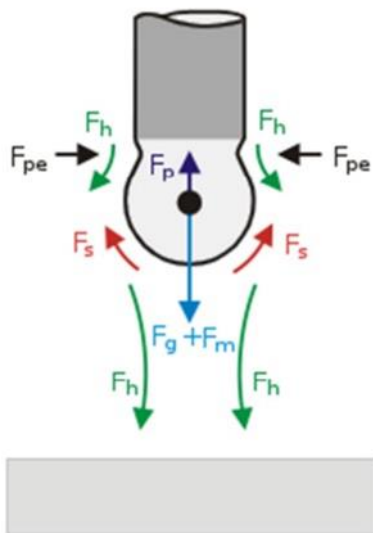
2.5 MAG technologie svařování

MAG (Metal Active Gas) je svařovací proces, při kterém svařovací drát (svařovací elektroda) a ochranný plyn prochází skrz svařovací hořák. Je mnoho variant MAG metody, které se používají v různých situacích. Obvykle je svařovací drát „podáván“ (pomocí automatického kladkového podavače) kontaktní špičkou ze slitiny mědi ve svařovacím hořáku. Kontaktní špička vede svařovací drát a také zajišťuje trvalé elektrické připojení ze zdroje napájení ke svařovacímu drátu při jeho podávání. Svařovací drát je držen v blízkosti nebo v kontaktu s kovovou svařovací plochou tak, aby vznikl elektrický oblouk mezi drátem a povrchem základního materiálu. Oblouk způsobí tvorbu kapky tekutého kovu na konci špičky svařovacího drátu a následně dojde k přenosu tekutého kovu na svařovací povrch (do svarové lázně). Inertní plyn nebo směs plynů se obvykle přivádí hubicí přes svařovací drát, aby se dosáhlo patřičné ochrany před okolní vzdušnou atmosférou a zamezilo se kontaminaci vzdušnými plyny v blízkosti svaru.

2.5.1 Přenos svarového kovu v elektrickém oblouku

Přenosem kovu se rozumí proces roztavování přídavného materiálu, svařovacího drátu jako elektrody, a ukládání do svarové lázně při hoření elektrického oblouku. Charakter přenosu

kovu ovlivňují parametry svařování, tj. svařovací proud resp. proudová hustota, svařovací napětí, složení ochranné atmosféry a přídavný materiál.

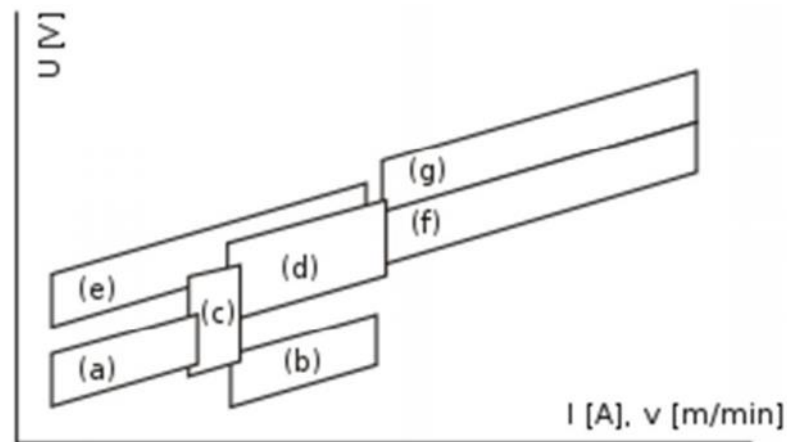


Obr. 11 Síly působící na odtavující se konec elektrody (kapku) [24]

Vysvětlivky k obr. 11: F_g ...gravitační síla, F_p ...síla vyvolaná tlakem odpařovaných kovů z anody, resp. katody, F_h ...hydrodynamická síla, F_m ...elektromagnetická síla, F_s ...síla povrchového napětí, F_{pe} ...pinch efekt

Na odtavovaný kov působí síly, jejichž směr a velikost jsou dány základními svařovacími parametry. Síly povrchového napětí F_s se snaží udržet kapku ve tvaru s co nejnižší povrchovou energií, tj. koule. Se zvyšující se teplotou ale povrchové napětí klesá. Síla vyvolaná tlakem odpařovaných kovů F_p z anody resp. katody (podle způsobu zapojení přímého resp. nepřímého) působí brzdícím účinkem na ionty resp. elektrony. Relativně malá gravitační síla F_g sice působí na kapku, ale zásadně neovlivňuje směr jejího pohybu. Elektrický proud procházející elektrodou vytváří elektromagnetické pole s osovou složkou tzv. elektromagnetickou silou F_m , která vzrůstá se zmenšováním krčku ohřátého konce elektrody a má hlavní podíl na přenosu kovu z elektrody do svarové lázně. Proto lze svařovat i ve vynucených polohách, např. nad hlavou. Na seškrcování krčku a oddělování kapky se podílí elektromagnetické pole svoji radiální složkou, tzv. Pinch efektem F_{pe} . Hydrodynamická síla F_h je způsobena vysokou rychlostí proudícího plazmatu a největší vliv dosahuje při sprchovém přenosu (bude vysvětleno v další části této kapitoly). Výslednice působících sil přemístí kapku roztaveného kovu z elektrody do svarové lázně i při svařování např. v poloze nad hlavou.

Dynamický účinek dopadu kapky v kombinaci s tekutostí svarové lázně má výrazný vliv na množství rozstřiku svarového kovu do nejbližšího okolí svaru.



Obr. 12 Schéma typů přenosu kovu vyjádřené v závislosti na svařovacích parametrech U a I resp. v
Vysvětlivky k obr. 12: (a) zkratový přenos, (b) zrychlený zkratový přenos, (c) kapkový přenos, (d)
sprchový přenos, (e) impulsní sprchový přenos, (f) moderovaný sprchový přenos, (g) rotující oblouk

Zkratový přenos

Při zkratovém přenosu (viz obr. 12 - a) se z elektrody odtaví kapka kovu, která vyplní mezeru mezi elektrodou a svarovou lázní, oblouk zhasne a dojde k elektrickému zkratu. Tím se zvýší teplota, kapka se utrhne a dopadne do svarové lázně, načež se elektrický oblouk opět zapálí. Frekvence zkratů se pohybuje od 20 do 200 Hz. Tento jev může vzniknout při nastavení svařovacího proudu v intervalu od 60 do 180 A, svařovacího napětí od 14 do 22 V, průměru elektrody od 0,6 do 1,2 mm a v libovolné ochranné atmosféře, např. 100% čistého CO_2 nebo směsi 75 až 80 % argonu + 25 až 20% CO_2 . S vyšším svařovacím napětím klesá frekvence kapek odtavených z elektrody, roste jejich velikost a zvětšuje se rozstřík. Protože se používají nízké hodnoty svařovacího proudu, vnáší se do svaru relativně málo tepla, svarový kov není tak tekutý a rychle tuhne. Toho se s výhodou používá pro svařování ve vynucených polohách (např. nad hlavou), pro zavařování kořenových vrstev a tenkých plechů.

Zrychlený zkratový přenos

Modifikací zkratového přenosu je zvýšení svařovacího proudu nad 200 A a tomu odpovídající vyšší rychlosti podávání svařovacího drátu při stejném svařovacím napětí. Vyšší frekvence

nedovoluje vytvořit větší kapku, ale konec elektrody je odporovým teplem při vysokém svařovacím proudu přehřátý a elektromagnetickými silami dochází k uvolnění kapek roztaveného kovu a jejich přenosu do svarové lázně. Průtok směsného ochranného plynu Ar + 8 % CO₂ musí být vyšší, 20 až 30 l/min. Tato technika zrychleného zkratového přenosu (viz obr. 12 - b) se hodí pro svařování tenkých plechů vysokou rychlostí s velkým výkonem svařování.

Přechodový oblouk s kapkovým přenosem

Pro vznik kapkového přenosu (viz obr. 12 - c) jsou nutné vysoké hodnoty svařovacího proudu od 190 do 300 A při napětí od 22 do 28 V, které nataví konec elektrody do velké kapky, která může být i větší než průměr elektrody. Kapkový přenos je dobře použitelný v ochranné atmosféře CO₂, ve směsných plynech s argonem výrazně hůře. Hojně se využíval během 60. až 70. let minulého století pro vysoký výkon odtavení. V současné době se od něj již ustoupilo, především pro velký rozstřík a tvorbu hrubých svarových housenek.

Sprchový přenos

Sprchový přenos (viz obr. 12 - d) nastává při hodnotách svařovacího proudu od 200 do 500 A a svařovacím napětí od 28 do 40 V, v ochranných plynech argonu s maximálně 18 % CO₂ (20 % CO₂; 15 % CO₂) nebo argonu s 1 až 5 % O₂. Směs argonu a CO₂ tvoří širší závar oproti směsi argonu s O₂, který má schopnost hlubšího závaru. Argon podporuje ionizaci plynu a tvorbu plazmy. Protože plazma rychle proudí okolo tavicího se konce elektrody, konec elektrody se tak rychleji ohřívá. K tomu přispívá i odporové teplo způsobené dlouhým výletem elektrody, cca 15 průměrů elektrody. Při vysokém proudu se nestačí vytvořit větší kapky, ale působením elektromagnetických sil (viz výše) se tvoří drobné kapky s vysokou frekvencí 150 až 350 Hz, která tvarem připomíná vodní sprchu. Velkou výhodou je nízký rozstřík. Přenos je velmi výkonný a používá se především při svařování v poloze vodorovné shora (ve vynucených polohách, např. nad hlavou, jen omezeně), např. u hliníku nebo mědi nebo i u ocelí větších tloušťek.

Impulsní sprchový přenos

Pro omezení rozstříku a vad ve svarech u zkratového a kapkového přenosu byl vyvinut impulsní sprchový přenos (viz obr. 12 - e). Průběh svařovacího proudu a napětí v závislosti na čase je

řízen mikroprocesorem svařovacího zdroje. Základní, tzn. cyklicky se mění průběh proudu mezi dvěma hladinami – tzv. základní a pulzní svařovací proud je udržován na takové velikosti, aby probíhala ionizace plynu a tím i vedení elektrického proudu. V řízených intervalech se zvyšuje svařovací proud a napětí, tzv. pulsy. Těmito pulsy se kontrolovaně přenášejí kapky roztaveného kovu elektrody. Kromě vysoké frekvence 25 - 500 Hz (výjimečně 1 kHz) řídí mikroprocesor i tvar průběhu svařovacího proudu a napětí v závislosti na čase. Ochranné plyny resp. jejich složení se používá za obdobných podmínek jako u sprchového přenosu. Tento typ přenosu kovu je velmi výhodný, protože umožňuje vysoký výkon odtavení jako např. při sprchovém přenosu, ale zároveň při nižším vneseném teple. Z obrázku 12 je vidět, že výkonově překrývá oblast zkratového až sprchového přenosu. Potřebné svařovací zdroje jsou ovšem nákladnější o elektroniku. Jednou z největších nevýhod je vyšší emitované elektromagnetické záření oblouku, které vyžaduje vyšší stupeň ochrany pro svářeče a osob v jeho blízkosti. Na druhou stranu lze ale lépe regulovat množství odtaveného kovu a tím i množství vneseného tepla (pulzy se obvykle nastavují tak, aby při každém jednotlivém pulsu se odtavila právě jedna kapka tekutého kovu.

Moderovaný sprchový přenos

Moderovaný sprchový přenos (viz obr. 12 - f) lze dosáhnout vysokými svařovacími proudy 450 až 750 A a svařovacím napětím 40 až 50 V za použití ochranného plynu Ar + 8 % CO₂ s průtokem až 25 l/min. Velké kapky, až o velikosti dosahující průměru drátu, jsou za vysoké frekvence přenášeny rychle proudícím plazmatem do svarové lázně. Touto technikou lze dosáhnout hlubokého průvaru a svařování větších tloušťek jednovrstvým svarem při vysoké rychlosti postupu svařování.

Dlouhý oblouk s rotujícím přenosem kovu

Hodnoty svařovacího proudu u rotujícího oblouku (viz obr. 12 - g) jsou stejné jako u moderovaného sprchového přenosu, ale hodnoty napětí jsou vyšší. Drát je průchodem vysokého proudu odporově zahříván téměř až na teplotu tavení. Intenzivní magnetické pole roztáčí tavící se konec elektrody, který je ve vysoce plastickém stavu. Kapky odtavujícího se kovu při rotačním přenosu tvoří jakoby kuželovou plochu, v podstatě se již jedná o souvislý proud taveniny, který je elektromagnetickými silami roztočen. Rotujícím obloukem lze

dosáhnout hlubokého a širokého závaru. Při velkých rychlostech svařování, velkém tepelném ovlivnění základního materiálu už v podstatě nelze svařovat ručně, ale bývá automatizováno.

2.5.2 Moderní modifikace metody MAG

V současné je jedním z trendů snižování vneseného tepla při svařování u malých tlouštěk materiálů zejména pak v automobilovém průmyslu. Mnoho výrobců svařovací techniky proto vyvíjeli nové technologie svařování, ale i modifikace těch stávajících, především MAG, upravující průběh proudu a napětí příp. ovlivňující přenos kov. V následující části budou od jednotlivých výrobců představeny pouze ukázky těch nejužívanější moderních svařovacích technologií založených na principu metody MAG.

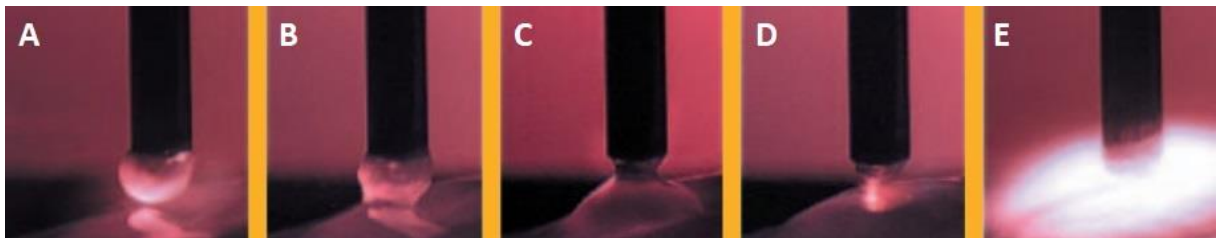
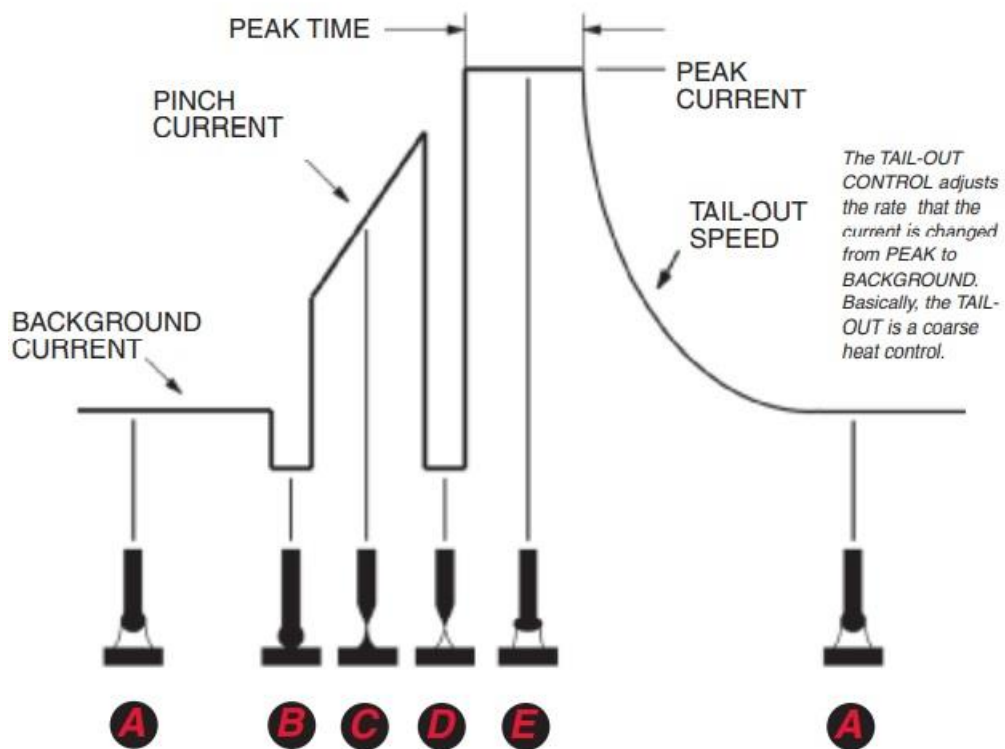
STT – SURFACE TENSION TRANSFER [9]

Výrobce: Lincoln Electric

Surface Tension Transfer® (STT®) svařování je MAG řízený zkratový přenos. Tento proces byl vyvinut a patentován společností Lincoln Electric. Na rozdíl od standardního MAG stroje, stroj STT® nemá „knoflík“ pro ovládání napětí. STT® používá řízení svařovacího proudu, aby přizpůsobil teplo nezávisle na rychlosti posuvu svařovacího drátu. Jedná se o plně řízený proces se zpětnou vazbou, kde řídicí systém zdroje proudu výrazně mění parametry svařování řádově v mikrosekundách. Unikátní kontrola svařovacího procesu vychází ze snímání změny napětí v čase zvláštní externí sondou tzv. detektorem dV/dt . Tento detektor snímá změny napětí v závislosti na změně odporu při zaškrcování krčku odtavující se kapky. STT® svařovací proces vytváří svary vyžadující nízké vnesení tepla mnohem jednoduššeji bez přehřátí nebo propálení přičemž zkroucení svařence je minimalizováno. Rozstřík a výpary jsou omezeny, protože elektroda není přehřátá - ani přes svařovací dráty většího průměru a použití ochranného plynu 100% CO₂. Tato kombinace plynu a drátu přitom značně snižuje náklady na spotřební materiál.

Nízký prahový proud (background current) mezi 50 a 100 A udržuje oblouk a přispívá k natavení základního materiálu. Jakmile se elektroda přiblíží ke svarové lázni, svařovací proud je rychle snížen, aby bylo zajištěno ztuhnutí. Potom je aplikován náběhový proud (pinch current), aby došlo k ukápnutí kapky do svarové lázně. Vytváření krčku mezi elektrodou a kapkou je monitorováno skrz elektrické signály. Když je kapička těsně před utržením, reaguje

svařovací stroj snížením proudu na 45-50 A. Bezprostředně potom je znovu vytvořen elektrický oblouk a špičkový proud (peak current) vytvoří plazmu, která zabrání náhodným zkratům a nahřeje svarovou lázeň i spoj. Nakonec exponenciální klesající proud (tail-out current) je upraven tak, aby celkově reguloval tepelný příkon – viz průběh proudu zobrazený na obr. 13.



Obr. 13 Průběh svařovacího proudu u STT svařovacího procesu [9]

- A...STT vytváří roztavenou kapičku a udržuje jí dokud se nepřiblíží k svařové lázni
- B...Jakmile se kapička dotkne svarové lázně, svařovací proud je snížen na nízkou úroveň, aby umožnil kapičce přejít plynule do lázně
- C...Poté je krátce aplikován náběhový proud (pinch current)
- D... STT obvody znovu nastolují svařovací oblouk na nízké úrovni proudu.
- E... STT zjistí, že oblouk je znovu vytvořen a automaticky použije špičkový proud (peak current), který nastavuje správnou délku oblouku. Následuje přepnutí do background proudu, který slouží pro jemnou kontrolu tepla.

Výhody procesu STT:

- Procesorem plně řízený svařovací proces
- Možnost použití oxidu uhličitého i směsných plynů
- Nízká hodnota vneseného tepla
- Minimální rozstřík
- Velmi dobrý vzhled svaru
- Vysoká přemostitelnost mezery (až 10 mm při tloušťce 2 mm)
- Jednoduché nastavování svařovacích parametrů
- Malé množství škodlivých zplodin v průběhu svařování

Využití technologie svařování STT:

- Svařování nelegovaných, nízkolegovaných, vysokolegovaných i galvanicky pokovených ocelí s minimálním vneseným teplem a bez rozstříku
- Svařování kořenové housenky a velkých mezer technikou shora dolů
- Navařování tvrdonávarů na plochy i hrany s minimálním promísením v první vrstvě

Výhody STT oproti GMAW

- Eliminuje neprůvary
- Dobrá kontrola svarové lázně
- Konzistentní kvalita svarů kontrolovaných RT (radiographic test)
- Kratší čas tréninku svařování
- Menší rozstřík a vznik dýmů během svařování
- Je možné použít různá složení ochranných plynů (v některých případech i 100% CO₂)

Výhody STT oproti GTAW

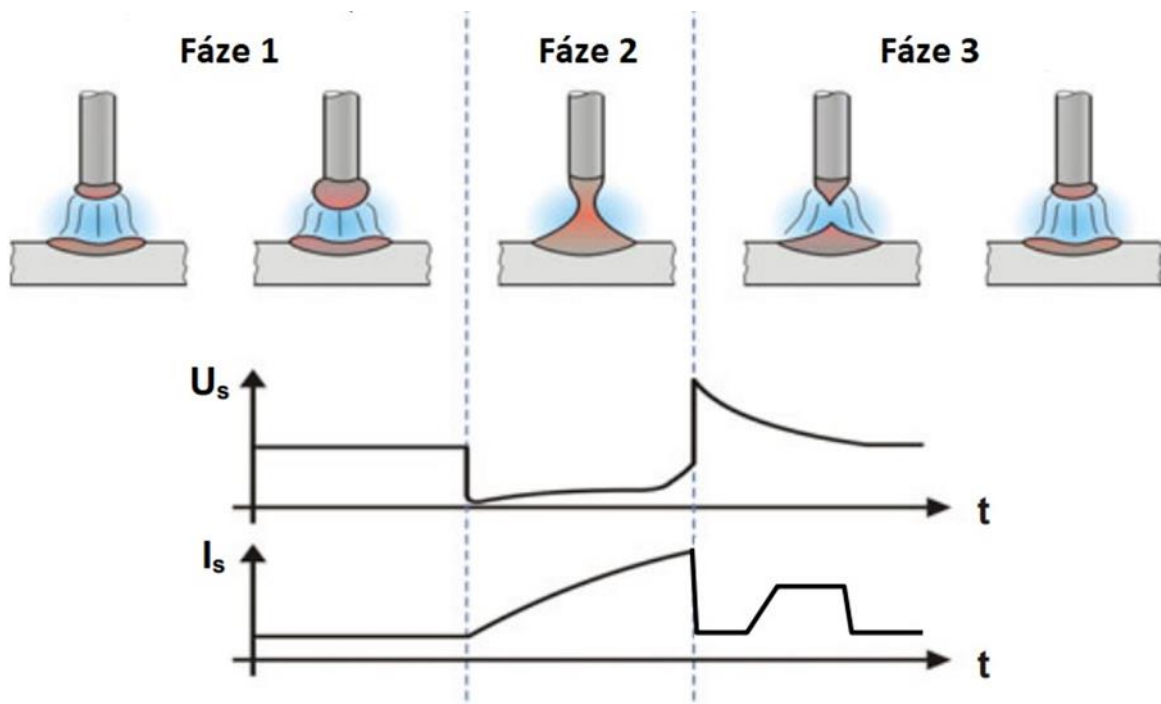
- 4x rychlejší svařování
- Svařování shora dolů
- Kratší čas tréninku svařování
- Konzistentní kvalita svarů kontrolovaných RT

- Vylepšená kvalita svarů na korozivzdorných a nízkouhlíkatých ocelích a niklových slitinách

TECHNOLOGIE COLD ARC [21]

Výrobce: EWM

ColdArc je modifikovaná varianta MIG/MAG svařovacího procesu, která se vyznačuje cyklickou změnou mezi obloukem a zkratovou fází. Krátký (zkratový) oblouk je regulovaný pouze svařovacím zdrojem (bez mechanické podpory). Je to v podstatě obdobný princip jako u CMT (viz. kapitola 2.5.3), ale řízený pouze softwarem. Průběh napětí zůstává jako v normálním procesu krátkého oblouku. Slouží jako hlavní parametr v regulaci svařovacího proudu. To však vyžaduje nepřetržité měření napětí s odpovídající reakcí na všechny potřebné změny napětí (vysoce dynamická okamžitá kontrola hodnoty). Díky digitálnímu signálovému procesoru je možné v časovém okamžiku kratším jak 1 μ s energii bezprostředně před zapálením oblouku opět použít, viz. obr. 14. Proto je zapalování oblouku velmi plynulé.

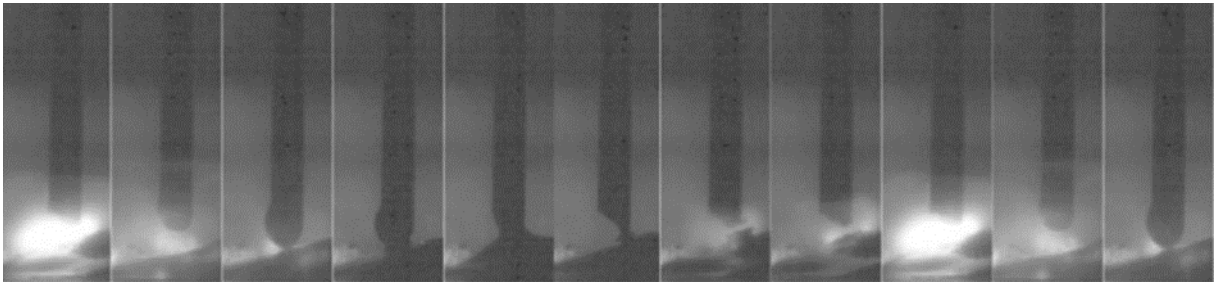


Obr. 14 Přenos materiálu a průběh napětí a proudu při svařovacím procesu ColdArc [21]

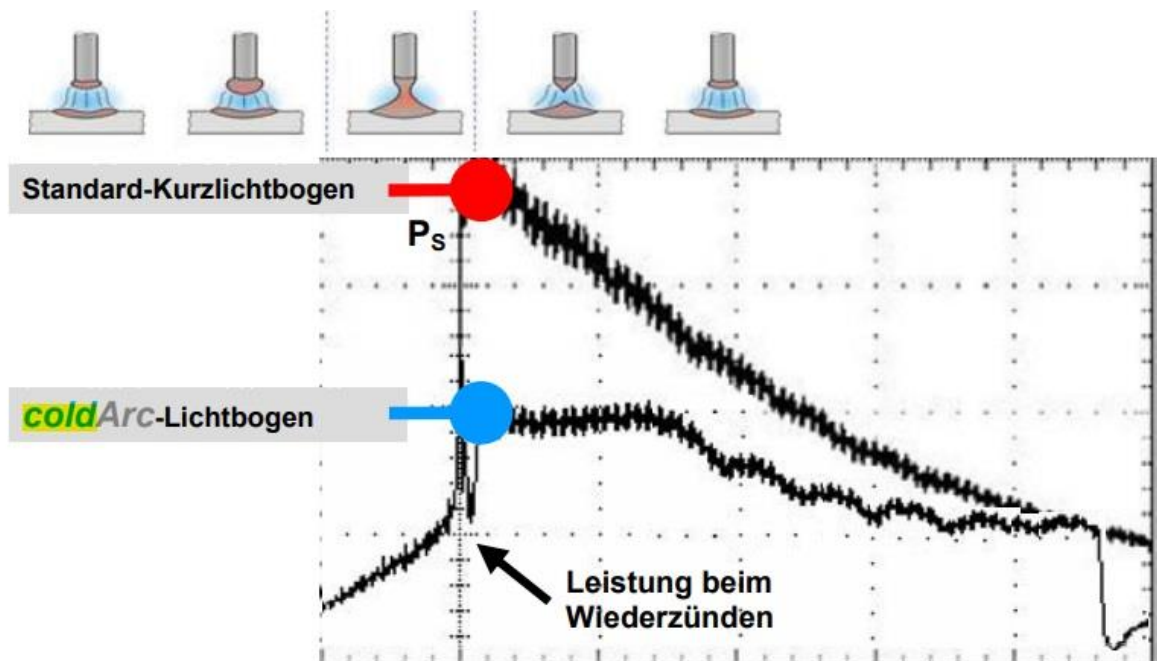
Fáze 1....zapálení a hoření oblouku, Fáze 2....zkratový přenos, Fáze 3...dokončení zkratu, znovuzapálení oblouku

Aby bylo okamžitě vytvořeno dostatečné množství roztaveného materiálu na špičce elektrody je zapotřebí zvýšené množství energie. Ihned po opětovném zapálení oblouku je

proud zvýšen na krátkou dobu, na tzv. tavicí impuls. Teprve poté je proud opět přiveden na extrémně nízkou základní úroveň, aby se minimalizovalo další natavení. Potom začne opět nový cyklus. Tímto tavicím impulsem po každém zkratu se vytváří roztavená kapička o stejné velikosti což vede k rovnoměrnému průběhu procesu. To v první řadě umožňuje pracovat ve fázích mezi zkraty s extrémně nízkými proudy bez toho, aniž by docházelo k dalšímu natavení drátu nebo hašení oblouku. Díky tomu je svařovací proces coldArc velmi nízkenergetický.



Obr. 15 Sekvence přechodu materiálu při svařovacím procesu ColdArc [21]



Obr. 16 Průběh výkonu oblouku při zapalování oblouku u standardního zkratového oblouku a ColdArc oblouku

Vysvětlivky k obr. 16: Standard-Kurzlichtbogen...standardní zkratový oblouk,

ColdArc-Lichtbogen...ColdArc oblouk, Leistung beim Wiederzünden...výkon při zapálení oblouku

Výhody metody svařování ColdArc:

- Možnost svařování malých tlouštěk
- Velmi malý rozstřík

- Dobré překlenutí spár
- Minimální deformace materiálu
- Konstantní rychlost podávání drátu

Využití metody svařování ColdArc:

- Svařování tenkých plechů (od 0,3 mm)
- MIG pájení pozinkovaných plechů
- Kombinované spoje (Al , Mg – Ocel, Mg – Al)
- Svařování hliníku a hořčíku

INTELLIGENT ARC CONTROL (IAC)

Výrobce: Migatronic

IAC - Intelligent Arc Control (= Inteligentní regulace oblouku IAC™, Adaptivní zkratový proces [3]) je svařovací funkce, kterou přináší společnost Migatronic pro MIG/MAG svařování. Tato funkce je založena na měření parametrů hořícího elektrického oblouku, jejich rychlém vyhodnocení výkonným procesorem a rychlých zásazích do řízení svařovacího stroje.

Dynamicky modeluje a optimalizuje jednotlivé fáze zkratového oblouku. Inteligentní regulace oblouku Arc Control zaznamenává každý svařovací cyklus a automaticky upravuje oblouk 50000krát za sekundu. Předvídá podobu dalšího úseku svaru a neustále dodává potřebný výkon. Inteligentní regulaci oblouku Arc Control lze využít k vytvoření dokonalého kořenového svaru. Rovněž zajišťuje svar plochého vzhledu, který vytváří dobrý základ pro další svarové vrstvy.

Výhody metody IAC:

Díky inteligentní regulaci oblouku Arc Control může být jindy obtížné svařování kořenů shora snadné i pro méně zkušené svářeče. Se 100% stabilním a koncentrovaným obloukem lze dosáhnout úplného průvaru kořene. To umožňuje zvýšit kvalitu každého svaru.

- Nereaguje na proměnlivý výlet drátu = jednodušší svařování kořenů
- Jednoduchost procesu: dobří svářeči budou moci dosáhnout ještě lepších výsledků. Provádění složitějších svarů je nyní navíc snazší i pro méně zkušené svářeče
- Svařování kořenů shora dolů ve srovnání s tradičním svařováním zdola nahoru výrazně zvyšuje rychlost

- Rychlejší svařování = vyšší produktivita
- Nižší množství vneseného tepla = menší deformace svařovaného materiálu se zajištěním dostatečného průvaru
- Bez rozstříku = méně času stráveného následnou úpravou

Oblast použití:

- Kořenové svary
- Potrubí, trubky a nádrže
- Tupé svary
- Uhlíkovou a nerezovou ocel
- Všechny tloušťky plechu
- Ruční a automatizované svařování
- Standardní svařovací postupy podle normy EN 1090/15612

WISEROOT [4]

Výrobce: KEMPPPI

WiseRoot, je optimalizovaný proces krátkého oblouku pro svařování kořenových oblastí svarů bez podložení. Tento proces je vysoce efektivní, je výrazně rychlejší než MMA, TIG a standardní svařování MIG/MAG krátkým obloukem. Produkuje vysoce kvalitní svary.

Svařování pevných trubek v jakékoli poloze je možné a úhel drážky lze v závislosti na aplikaci snížit dokonce o 40%. Stabilní a efektivní oblouk, který vede k vynikající kvalitě svaru, je umožněn přesným měřením napětí v reálném čase, řízením proudu a uvolněním kovové kapičky z drátu přídatného materiálu. Přenos kovu je hladký a bez rozstříku. WiseRoot je svařovací proces MIG/MAG 131, 133, 135 nebo 138 podle normy EN ISO 4063.



Obr. 17 Upravený proces WiseRoot svařování krátkým (zkratovým) obloukem [4]

V první fázi nárůstu proudu, je kapka kovu přenesena do svarové lázně, zatímco výkon oblouku náhle vzroste během druhé fáze a zůstává na potřebné hladině. Rychlý nárůst proudu na potřebnou úroveň během první fáze vykoná takzvaný pinch efekt, což umožní kapce kovu se oddělit od špičky drátu (doprovázeno mírným poklesem proudu). Když dojde k oddělení kapky kovu, fáze nárůstu proudu začíná a iniciuje fázi oblouku.

Výhody a oblast použití procesu WiseRoot:

- Zvyšuje rychlost svařování ve srovnání s MMA, TIG a standardním svařováním MAG krátkým obloukem
- Dává možnost snížit objem svarového úkosu
- Umožňuje širokou škálu kořenových mezer a stěn drážek bez neúplného nebo nadměrného pronikání
- Snadnější trénování svařovací techniky
- Méně rozstříku
- Umožňuje svařování trubek ve všech polohách
- Umožňuje svařování otočných trubek
- Umožňuje svařování s dlouhými kabely
- Procesy lze použít s různými materiály; nelegované a nízkolegované ocel, korozivzdorné a vysocelegované oceli
- Vynikající charakteristika oblouku WiseRoot+ i s ochranným plynem CO₂
- Široký výběr průměru drátu (0,8 – 1,2 mm)

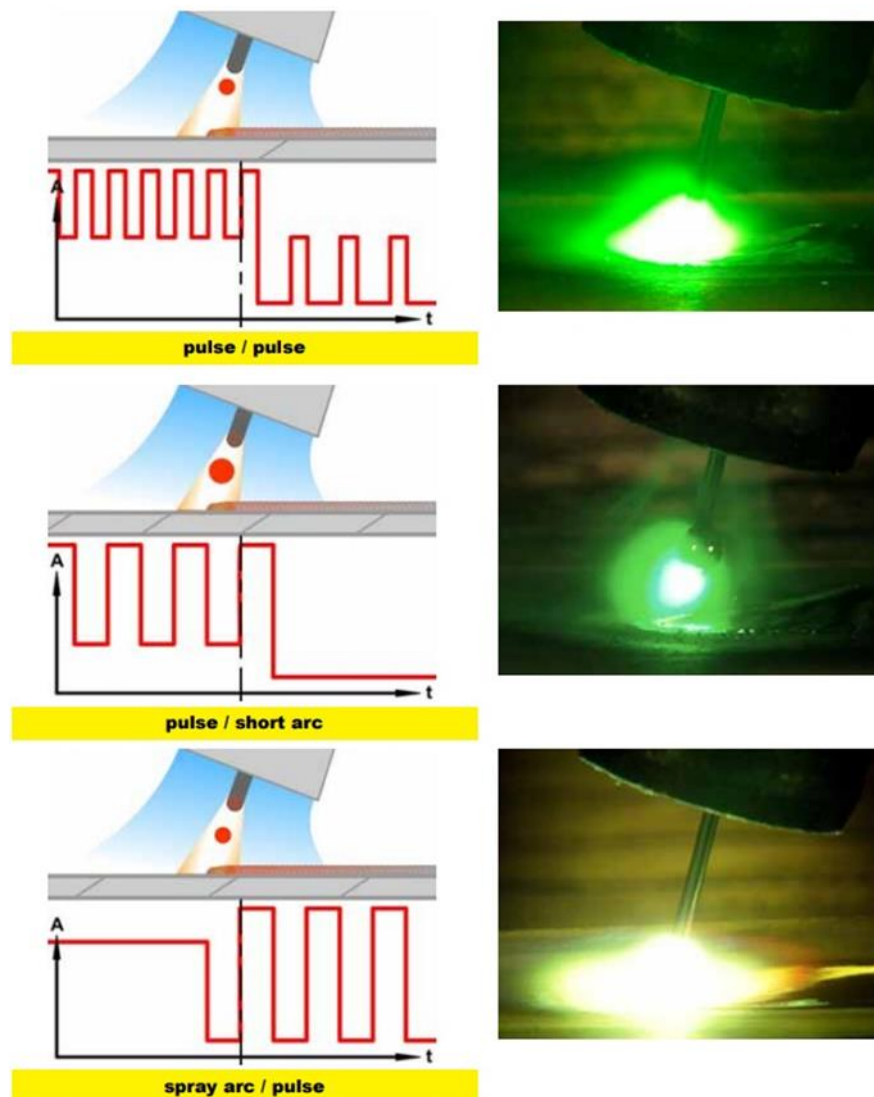
ARISTO SUPERPULSE [5]

Výrobce: ESAB

Tato technologie svařování byla vyvinuta z konceptu puls/puls svařování a umožňuje navíc kombinovat tyto režimy:

Puls (Pulse) / Zkrat (Short arc) – nahrazuje TIG proces svařování kořenů, umožňuje kontrolu nad vneseným teplem u jakkoliv tenkých plechů

Sprcha (Spray arc) / Puls (Pulse) – velice efektivní proces při svařování plechů větších tloušťek. Hliník může být svařován zdola nahoru.



Obr. 18 Režimy svařování technologie Aristo SuperPulse [5]

Výhody:

- Snadnější polohové svařování
- Rovnoměrný průvar
- Méně citlivé na odchylky kořenových mezer
- Méně citlivé na nerovný přenos tepla
- Vzhled svaru jako u metody TIG
- Vhodné pro automatizované svařování, např. s Railtrac a Miggytrac automatizovanými svařovacími traktory
- Rozšiřuje pracovní oblast s většími velikosti drátů
- Přesně nastavitelný tepelný příkon a hloubka průvaru

2.5.3 CMT Technologie

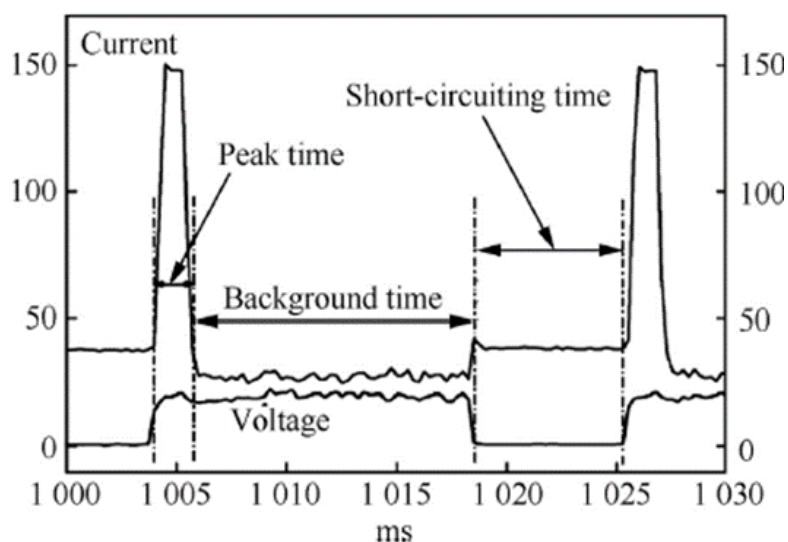
CMT neboli Cold Metal Transfer v českém překladu studený přenos kovu. Studený svařovací proces CMT zajišťuje velice dobré výsledky u všech materiálů, vysoce stabilní oblouk a přesnou regulaci procesu, a to díky integrovanému dopřednému a zpětnému pohybu drátu. To vede k dobrým výsledkům a širokým možnostem, jako jsou bezroztříkové svarové a pájené švy, svarová spojení oceli a hliníku, svařování nejtenčích plechů od 0,3 mm atd.

CMT svařování, vynalezené rakouskou společností Fronius (2004), je modifikovaný MIG svařovací proces založený na zkratovém přenosu. Tento proces se liší od MIG/MAG svařování pouze způsobem mechanického odtržení kapičky svarového kovu při svařování, ale i průběhem svařovacího proudu a napětí, kdy k přenosu kovu dochází skoro v bezproudovém stavu. Změny teplot ve svarovém kovu a v základním materiál během svařování mají významný vliv na materiálové vlastnosti, na zbytková napětí ve svařovaném materiálu, ale i na rozměry i tvarovou přesnost svařenců. CMT svařovací proces poskytuje řízený způsob depozice materiálu díky vestavěnému speciálnímu push-pull systému podávání drátu spárovaným s vysokorychlostním digitálním řídicím systémem. Rychlost podávání drátu a fáze zapalování oblouku je řízen tak, aby bylo dosaženo dostatečné energie jak k natavení základního materiálu tak kuličky svařovacího drátu. Když se dotkne konec svařovacího drátu/elektrody roztavené kázně, digitálně řízen servomotor zatáhne svařovací drát zpět. Zpětný pohyb svařovacího drátu (řízený podavačem v hořáku) napomáhá odtržení kapky tekutého kovu z

elektrody. Tím vzniká situace, kdy v jednu chvíli působí podavače proti sobě. Proto musí být system vybaven vyrovnávacím členem, kde se v tento okamžik svařovací “drát” hromadí, viz. obr.23. Během přenosu kovu svařovací proud klesne téměř k nule a proto nevzniká téměř žádný rozstřík svarového kovu. Jakmile je přenos kovu dokončen, je oblouk opět zapálen a svařovací drát je posunut směrem dopředu s původními svařovacím proudem [1].

Cyklus CMT je typicky ohraničen dobou potřebnou k depozici kapičky svarového kovu do roztavené lázně. Analýza svařovacího proudu a napětí je nutná ke studiu distribuce energie v různých fázích přenosu kapky do svarové lázně. Cyklus, který se opakuje až 130x za vteřinu, je obvykle rozdělen do těchto tří fází (viz. obr. 19):

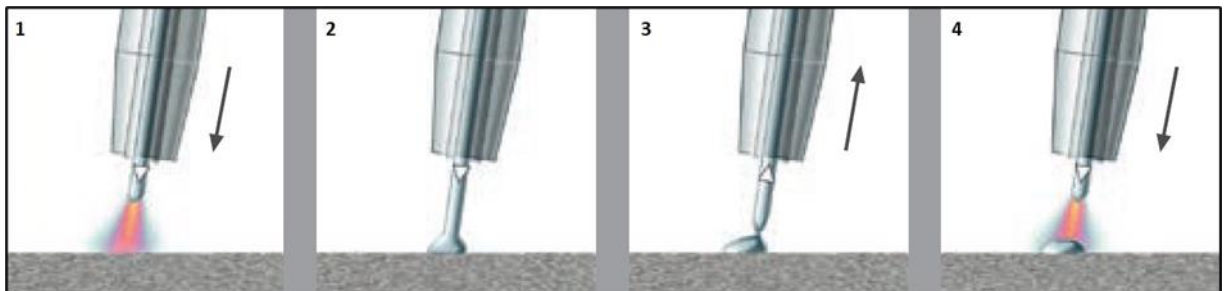
1. *Fáze špičky proudu (the peak current phase):* konstatní napětí na oblouku odpovídá vysokému pulsu proudu, které způsobí snadné zapálení oblouku a následné natavení svařovacího drátu a vytvoření kuličky kovu.
2. *Fáze utlumeného proudu (the background current phase):* Tato fáze odpovídá nízkému proudu. Proud je snížen, aby bylo zabráněno přenosu příliš malé kapky z konce svařovacího drátu. Tato fáze trvá do začátku zkratu.
3. *Fáze zkratu:* V této fázi je svařovací napětí téměř na nule. Ve stejný čas je veden zpětný signál do podavače drátu, který rychle zatáhne drát zpět. Tato fáze napomůže k ukápnutí kapičky do svarové lázně.



Obr. 19 Průběh svařovacího proudu a napětí při CMT svařování [1]

Komplexní průběh svařovacího proudu v CMT svařování a zpětný pohyb svařovacího drátu, který mechanicky způsobí odkápnutí kovu přináší další oblast pro zkoumání vztahu mezi svařovacími parametry, přenosu kovu a tepla.

Obrázek 20 názorně naznačuje jednotlivé fáze pohybu svařovacího drátu (naznačen šipkou) a zapalování oblouku.



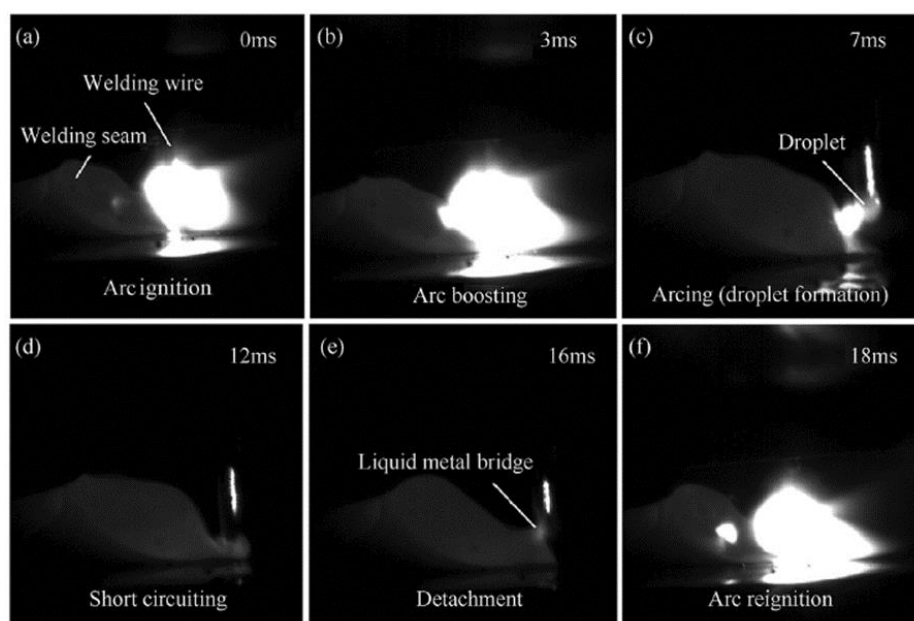
Obr. 20 Schématické znázornění fází při CMT svařování [12]

Fáze 1: Během fáze hoření oblouku je přídavný materiál veden do tavné lázně

Fáze 2: Po ponoření přídavného materiálu do tavné lázně oblouk zhasne a svařovací proud poklesne

Fáze 3: Zpětný pohyb drátu podporuje uvolnění kapky během zkratu. Při přerušení zkratového obvodu je proud udržován na nízké hodnotě

Fáze 4: Směr pohybu drátu se změní a proces se opět spustí



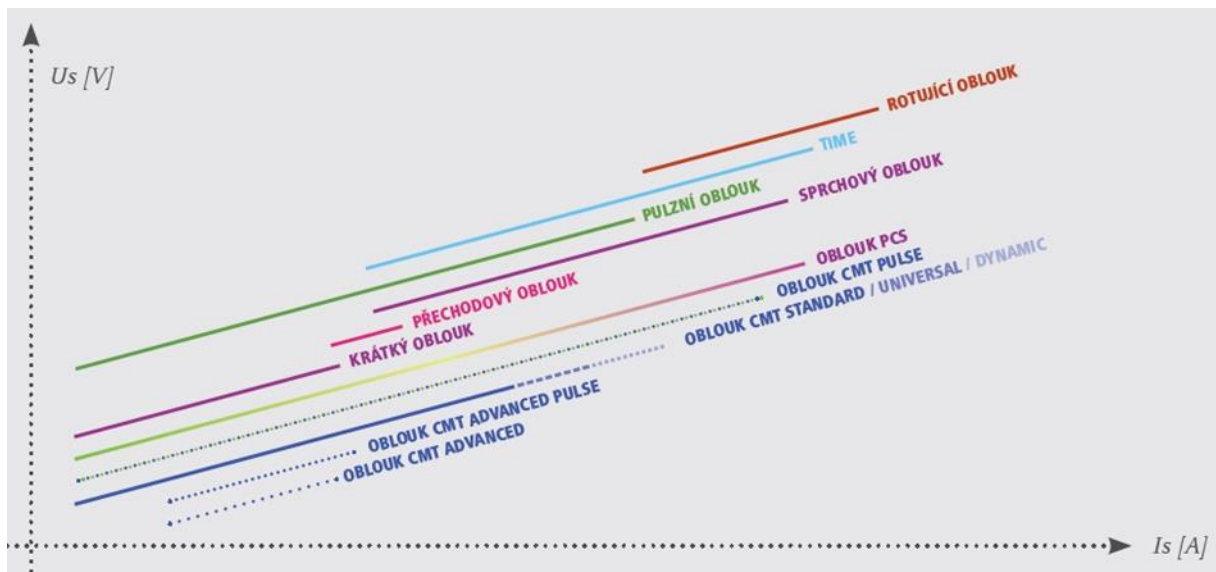
Obr. 21 Přenos kapičky svarového kovu při CMT svařování zaznamené vysokorychlostní kamerou [1]

RŮZNÉ TYPY CMT SVAŘOVÁNÍ

Společnost Fronius vyvinula čtyři modifikace základní CMT svařovacího procesu [12]

1. *CMT Pulse*: používá po celou dobu stejnosměrnou elektrodovou polaritu (DCEP). To znamená, že přibližně 70% tepla v oblouku bude převzato stranou elektrody a 30% bude převzato svařencem.
2. *CMT Advanced*: používá střídavý proud. To znamená, že rozložení tepla svařovacího oblouku mění směr, protože polarita proudu se neustále střídá. To umožňuje ještě chladnější svařování než pulzní CMT. Vzhledem k tomu, že střídavý proud udržuje svar a svařenec chladnější, svářeč si může dovolit zrychlit posuv drátu, což umožňuje vyšší rychlost depozice svarového kovu a tím také rychlejší svařování.
3. *CMT Pulse Advanced*: používá střídavý proud stejně jako CMT Advanced. Primární rozdíl spočívá v tom, že pouze pulsní sekvence mají kladnou polaritu. Vzhledem k tomu, že většina tepla je pak soustředěna směrem k elektrodě, svarový kov snadněji vyplňuje svarovou mezeru a zároveň se udržuje svařenec chladnější. Tento proces je vhodný pro vyplňování mezer.
4. *CMT Dynamic*: Tento proces je navržen ke svařování větších tloušťek. Zvyšuje rychlost cyklu vytažení a zatažení drátu, což umožňuje vyšší rychlost posuvu drátu a následně vyšší rychlost depozice. To umožňuje větší provaření svarového spoje, který je ideální pro silnější desky.

Na níže uvedeném obrázku č. 22 je možné porovnat obloukové technologie z hlediska aplikovaného výkonu při svařování. Z grafu vyplývá, že metoda CMT v různých variantách vnáší do svařovaného vzorku nejmenší energii.



Obr. 22 Srovnání obloukových technologií [12]

Na obrázku 23 je uspořádání svařecího zařízení pro CMT svařování. Robotické pracoviště se skládá z těchto základních součástí:

1. Digitálně řízený zdroj svařovacího proudu MIG/MAG: Plně digitalizovaný, mikroprocesorem řízený invertorový svařovací zdroj zajišťuje dokonalou přesnost svařovacího procesu, exaktní reprodukovatelnost a vynikající svařovací vlastnosti.
2. Chladicí modul: Robustní a spolehlivý chladicí modul je přizpůsoben modulární konstrukci celého svařovacího systému. Zajišťuje optimální chlazení svařovacího hořáku vodou
3. Pufrovací resp. vyrovnávací člen: Umožňuje “hromadění” drátu během protichodného pohybu podavače v hořáku a zajišťuje tak hladký transport drátu.
4. Podavač drátu: Cívka s podavačem drátu se 4-kladkovým pohonem pro precizní a hladký transport přídatného materiálu od cívky s drátem až ke svařenci
5. Svařovací hořák ROBACTA DRIVE CMT: Integrovaný robotizovaný svařovací hořák vybavený bezpřevodovým a vysoce dynamickým servomotorem AC, pohybuje svařovacím drátem dopředu a dozadu až 130x za sekundu. Zajišťuje přesné podávání drátu a konstantní přítlak
6. Kontaktní systém CONTEC: Dvě pohyblivé poloskořepiny drží kontaktní plochy a síly mezi kontaktním systémem a svařovacím drátem přesně v definované oblasti. Kontaktní trubice se opotřebovává rovnoměrně, nežádoucí a těžko předvídatelné účinky se minimalizují. Contec se hodí pro všechny průměry a materiály drátu. U

druhé generace CMT je navíc podmínka použít speciální kontaktní špičky (Contec), tím se zpřesní místo přenosu proudu.



Obr. 23 Robotické CMT svařování [12]

VÝHODY A OBLAST POUŽITÍ CMT SVAŘOVÁNÍ

Hlavní výhody CMT:

- Nejlepší přemostitelnost spár: CMT Advanced dokáže u hliníku o tloušťce 2 mm přemostit spáru z 1 mm na 2 mm ve srovnání s pulzním svařováním
- O 50% nižší promísení základního a přídavného materiálu, což ušetří náklady při navařování
- Nejpreciznější svařovací proces – 100% reprodukovatelnost a nejlepší regulace procesu přináší nové způsoby použití, např. CMT Pin a CMT Print
- Nejmenší tvorba rozstříků – až o 99% méně rozstříků, např. u oceli ve srovnání s provozem pulzního a krátkého oblouku
- Nejmenší deformace, např. až o 90% nižší vnesení tepla při použití metody CMT na hliník ve srovnání s metodou TIG

Oblast použití:

1. Svařování hybridních materiálů – spojování dvou odlišných kovů, např. kombinace ocel/hliníková slitina (letování/svar). To není snadné u ostatních svařovacích procesů, kde se vytváří více tepla. Vzhledem k extrémní přesnosti, kterou CMT poskytuje, se svarové spoje zbytečně nepřehřívají.
2. Elektronika - CMT je díky své extrémní přesnosti ve srovnání s běžným svařováním MIG jednou z nejlepších možností pro elektronické skříně, zejména pokud jsou komponenty obzvláště citlivé. U nízkého tepelného příkonu je méně pravděpodobné, že během stavby se skříň zdeformuje na rozdíl u běžného svařování MIG. Na druhou stranu svařování TIG, i když je vhodné pro takto citlivou práci, je tato metoda málo produktivní. Díky tomu je CMT ideálním svařovacím procesem pro tuto aplikaci.
3. Automobilový průmysl - CMT se stala oblíbenou aplikací pro mnoho výrobců automobilů, včetně Tesly. To platí zejména v případě, kdy se hliník primárně používá ke konstrukci vozidla. Tesla Model S je vyrobena z hliníku. Po vytvoření hlavních panelů karoserie vozidla z hliníkových plechů, se panely spojí pomocí spon, epoxidového lepidla a také CMT svařováním. Ale i u ocelových plechů je to vhodné použít CMT metodu. Karosérie je většinou sestavena z pozinkovaných plechů. Zinek se při poměrně malých teplotách odpařuje, čímž plech přijde o

protikorozi ochranu. Dnes se používají standardně plechy o tloušťce menší než 1 mm (např. 0,7) a CMT svařování těchto tenkých pokovovaných plechů umožňuje.

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Cílem praktické části diplomové práce bylo ověření koeficientu tepelné účinnosti pro CMT (Cold Metal Transfer) metodu svařování. Výsledky této studie by měly posloužit k dalšímu výzkumu v oblasti svařování metodou CMT a numerických simulací procesu svařování.

Experiment byl proveden ve spolupráci s Ústavem fyziky Fakulty strojní ČVUT a byl rozdělen do několika fází. Na začátku bylo provedeno měření měrné tepelné kapacity materiálů, které byly dále použity pro navařování v experimentální části. Potom proběhla vlastní příprava kalorimetrického měření, tj. sestavení kalorimetru s termočlánky spojenými se záznamovým zařízením, odladění svařovací techniky s robotickým ramenem vybaveným metodou CMT.

3.1 Měrná tepelná kapacita svařovaného základního materiálu

Množství vneseného tepla při svařování je přímo závislé na hodnotě měrné tepelné kapacity navařovaného materiálu. K experimentu byla použita čistá měď a ocel S235JR. U měděného vzorku nebylo známo přesné chemické složení, u ocelového vzorku byl k dispozici inspekční certifikát výrobce. Tabelované hodnoty měrné tepelné kapacity se mnohdy i výrazně liší i díky tomu, že chemické složení, resp. čistota materiálů není u tabelovaných hodnot uvedena. Přesnost hodnoty měrné tepelné kapacity navařovaného materiálu proto významně ovlivní celkovou přesnost výsledků experimentu.

Měrná tepelná kapacita je měrná veličina tepelné jímavosti látky, definována diferenciálním podílem přivedeného tepla Q a přírůstkem teploty T , přepočtená na jednotkové množství látky m .

$$c = \frac{1}{m} \frac{dQ}{dT} \quad (9)$$

K měření tepelného množství slouží kalorimetr. Je to nádoba zkonstruována tak, aby bylo co nejvíce zabráněno výměně tepla mezi okolím a vnitřním prostorem kalorimetru. Proto bývá nádoba kalorimetru dvouplášťová. Jestliže stoupne teplota látky v kalorimetru o Δt stupňů, pak bylo kalorimetru odevzdáno množství tepla Q , které lze počítat podle vztahu

$$Q = m * c * \Delta t \quad (10)$$

kde m je hmotnost [kg], c měrná tepelná kapacita [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$], Q teplo [J] a Δt rozdíl teplot [$^{\circ}\text{C}$]

3.1.1 Příprava měření měrné tepelné kapacity základního materiálu

K měření byl použit kalorimetr o objemu 750 ml, vybavený ručním míchadlem a digitálním ponorným teploměrem, který byl připojen k počítači ke sběru dat. Vzorky mědi a oceli, určené k měření měrné tepelné kapacity, byly předloženy ve tvaru válečků o průměru 18 mm a délce 108 mm. Válečky mají vývrt s pomocným drátkem pro snazší manipulaci během měření. Voda byla použita jako kapalina se známou měrnou tepelnou kapacitou. Zdrojem studené vody byl běžný vodovodní řád. Zdrojem tepla je pak imerzní termostat LAUDA A100 s vodní lázní, do které byl pro kontrolu přesné teploty lázně ponořen NiCr-Ni termočlánek připojený k digitálnímu teploměru. Digitální váhy byly použity pro vážení vzorků, kalorimetru a množství vody v kalorimetru. Laboratoř byla vybavena teploměrem a barometrem.

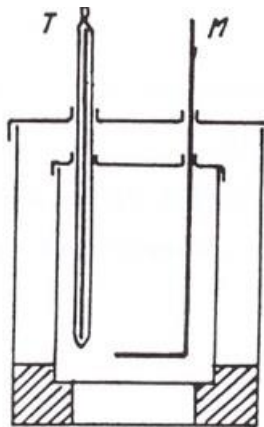
Seznam pomůcek

- Kalorimetr (Dewarova nádoba) s míchadlem ($V=0,75$ l)
- Programovatelný digitální teploměr DALLAS DS18B20 (rozsah měření $-55^{\circ}\text{C}/+125^{\circ}\text{C}$, přesnost $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$)
- Imerzní termostat LAUDA A100 s vodní lázní (pracovní rozsah $0,3-100^{\circ}\text{C}$)
- NiCr-Ni termočlánek + digitální teploměr LH 6661903
- 1x měděný váleček, 1 x ocelový váleček (\varnothing 18 mm, L = 108 mm)
- PC s programem pro komunikaci s DS18B20
- Digitální váhy KERN 440—47N (max. 2000 g, $d=0,1\text{g}$)



Obr. 24 Uspořádání experimentu při měření měrné tepelné kapacity

(1) Kalorimetr s termočlánkem a míchadlem, (2) termostat s vodní lázní, (3) digitální váhy, (4) digitální teploměr



Obr. 25 Uspořádání kalorimetru a použité vzorky k měření měrné tepelné kapacity

(T) teploměr, (M) míchadlo

3.1.2 Měření měrné tepelné kapacity základního materiálu

Experiment byl zahájen měřením a výpočtem hodnoty tepelné kapacity kalorimetru. Vzhledem k tomu, že kalorimetr bývá sestaven z celé řady součástí o různých hmotnostech a různých tepelných kapacitách potom součet součinů hmotností a měrné tepelné kapacity jednotlivých částí kalorimetru nazýváme tepelnou kapacitou kalorimetru K . Tepelnou kapacitu kalorimetru lze zjistit dvojím měřením s různým množstvím zkoumané látky.

Pro výpočet tepelné kapacity kalorimetru K byl použit vztah

$$K = \frac{m_2 c (t_2 - t) - m_1 c (t - t_1)}{t - t_1} \quad (11)$$

kde c je měrná tepelná kapacita kapaliny [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$], m_1 hmotnost chladné kapaliny [kg], t_1 teplota chladné kapaliny [$^{\circ}\text{C}$], m_2 hmotnost teplé kapaliny [kg], t_2 teplota teplé kapaliny [$^{\circ}\text{C}$], t je teplota po smíchání teplé a studené kapaliny [$^{\circ}\text{C}$].

Tab. 6 Určení měrné tepelné kapacity kalorimetru

Měření	1.	2.	3.	4.	5.
m_1 [kg]	0,2544	0,2315	0,2412	0,2129	0,2142
m_2 [kg]	0,1326	0,1521	0,1629	0,1701	0,1743
t_1 [$^{\circ}\text{C}$]	27,00	31,56	29,75	29,65	29,25
t_2 [$^{\circ}\text{C}$]	78,6	78,5	78,5	78,5	78,6
K [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]	77,17	76,92	81,26	79,43	77,69

$$K = 78,5 \pm 1,5 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Směšovací kalorimetr o tepelné kapacitě K byl naplněn kapalinou známé měrné tepelné kapacity c_1 , hmotnosti m_1 a teplotou t_1 , v tomto případě to byla voda ($c_1=4180 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$). Do této soustavy byl vložen měřený vzorek o známé hmotnosti m_2 a teplotě t_2 . Po určité době došlo k ustálení teploty soustavy na hodnotě t , pro kterou platí kalorimetrická rovnice (12):

$$(K + m_1 c_1) t_1 + m_2 c_2 t_2 = (K + m_1 c_1 + m_2 c_2) t \quad (12)$$

Z toho lze vypočítat neznámou měrnou tepelnou kapacitu c_2 ($c_{1(\text{voda})}=4180 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

$$c_2 = \frac{(K + m_1 c_1)(t - t_1)}{m_2(t_2 - t)} \quad (13)$$

Tab. 7 Naměřené hodnoty měrné tepelné kapacity u měděného vzorku

Měření	1.	2.	3.	4.	5.
m1 [kg]	0,3974	0,4093	0,3985	0,4043	0,389
m2 [kg]	0,251	0,251	0,251	0,251	0,251
t1 [°C]	27,6875	27,1875	27,125	27,1875	27,1875
t2 [°C]	81,9	82	82,2	82,1	82,1
C ₂ [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	387,8	385,6	391,5	389,3	392,4

$$c = 389,3 \pm 2,1 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

Tab. 8 Naměřené hodnoty měrné tepelné kapacity u ocelového vzorku S235JR

Měření	1.	2.	3.	4.	5.
m1 [g]	0,3814	0,3937	0,391	0,4078	0,3899
m2 [g]	0,2175	0,2175	0,2175	0,2175	0,2175
t1 [°C]	27,125	27,125	27,0625	26,9375	26,875
t2 [°C]	82,1	82,1	82,1	82,1	82,2
C ₂ [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	473,4	467,7	464,0	471,5	470,2

$$c = 469,3 \pm 2,8 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

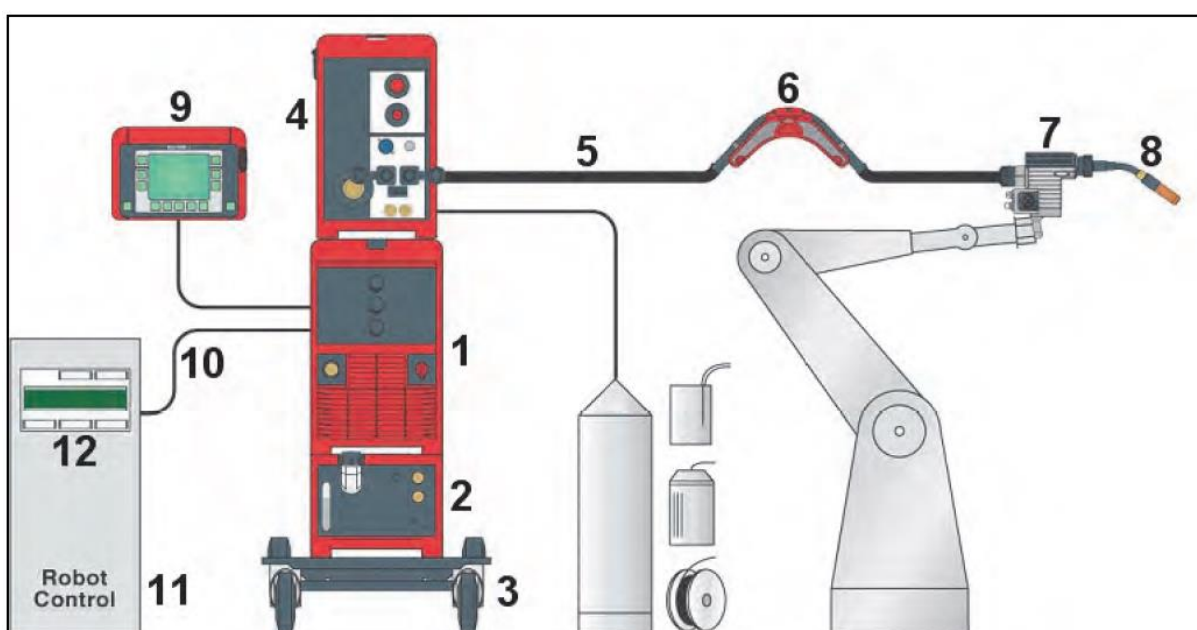
Měření proběhlo při pokojové teplotě 26,5 °C a relativní vlhkosti 63 %.

3.1.3 Vyhodnocení měření měrné tepelné kapacity základního materiálu

Z naměřených hodnot byly vzhodnoceny měrné tepelné kapacity obou vzorků. U měděného vzorku byla zjištěna hodnota 389,3 ± 2,1 J.kg⁻¹.K⁻¹. Tabelovaná hodnota čisté mědi při teplotě 20°C je 383 J.kg⁻¹.K⁻¹. Rozdíl hodnot může způsoben stupněm čistoty měděného vzorku. U vzorku z oceli S235JR byla zjištěna hodnota 469,3 ± 2,8 J.kg⁻¹.K⁻¹. Tabelovaná hodnota čistého železa při teplotě 20°C je 450 J.kg⁻¹.K⁻¹. Je patrné, že hodnota měrné tepelné kapacity u ocelového vzorku je ovlivněna chemickým složením. Zjištěné hodnoty měrných tepelných kapacit obou vzorků budou dále použity v dalších výpočtech koeficientů.

3.2 Kalorimetrické měření svařování

Jak bylo uvedeno v teoretické části, existuje mnoho způsobů kalorimetrického měření pro analýzu tepelné bilance při svařování. Jako jednoduché, ale velice efektivní řešení, se nabízí použití izolovaného boxu, v kterém probíhá navařování samotného vzorku. Izolovaný box je z pohledu konstrukce a stavby jednoduchý a zároveň jeho použití je bezpečné pro obsluhu. Jednotlivé součásti experimentu budou popsány v následujících částech. Uspořádání experimentu naznačuje níže uvedené schéma na obrázku 26.



Obr. 26 Schématické uspořádání CMT svařování připravené pro kalorimetrické měření

Vysvětlivky:

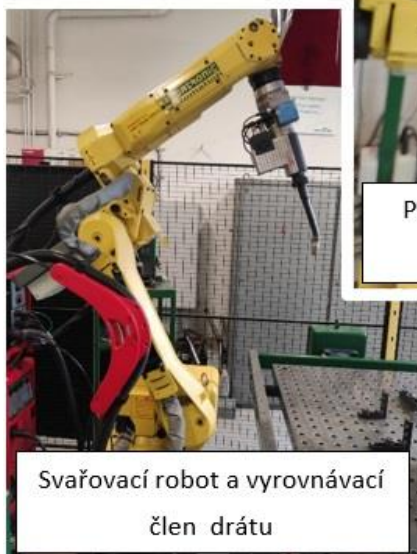
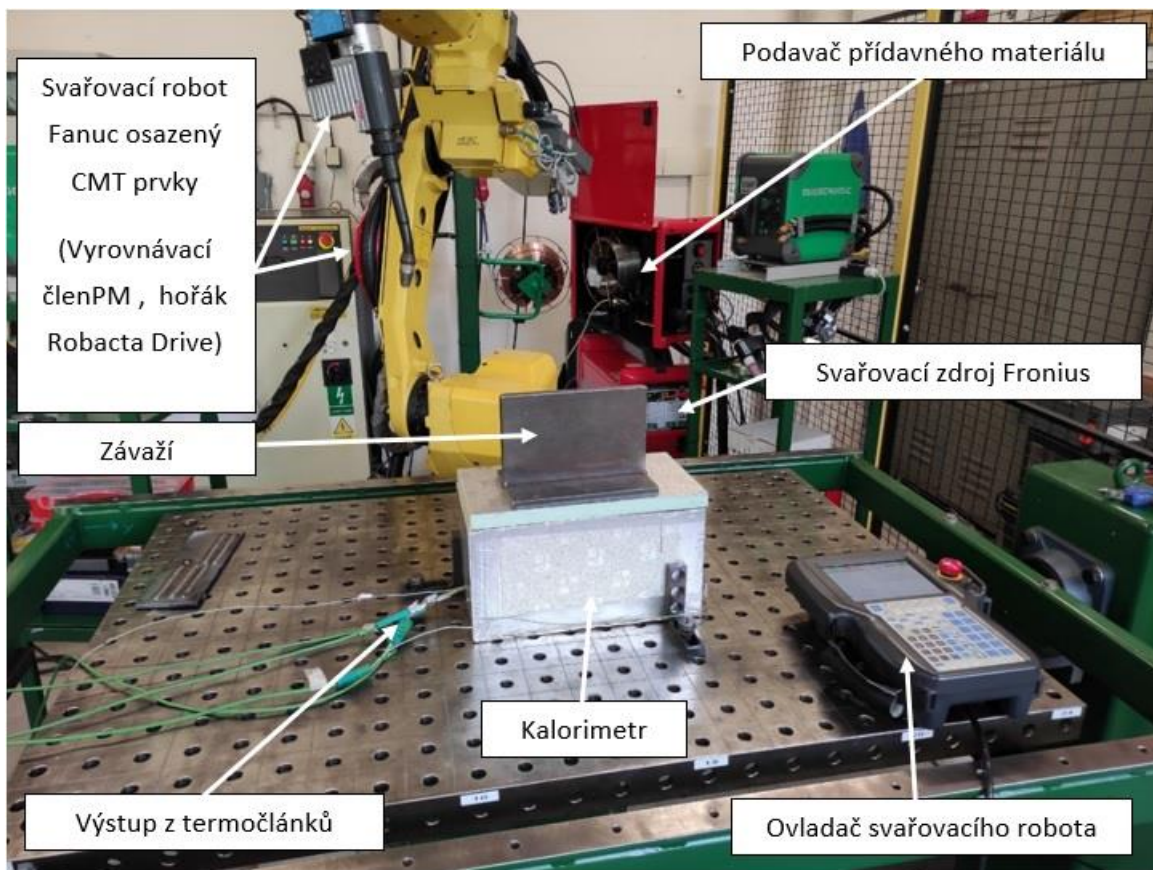
1. Svařovací zdroj Fronius TransPuls Synergic 3200
2. Chladicí jednotka Fronius Kühlgerät FK 4000
3. Vozík
4. Podavač a zásobník pro přídavný materiál
5. Hadicové vedení
6. Vyrovnávací (pufrovací) člen pro přídavný materiál
7. Speciální CMT řídicí jednotka svařovacího hořáku Fronius Robacta Drive CMT-PAP W (zabudovaný podavač, který vždy při jedné otáčce se vrátí o čtvrt otáčky zpět)
8. Svařovací hořák
9. Dálkový řídicí ovladač Fronius RCU 5000 i

10. Kabel k robotické jednotce
11. Robotická jednotka FANUC ARC Mate 100iC
12. Interface robotické jednotky
13. Kalorimetr

Další pomocná zařízení schématicky nezobrazená:

14. Polohovací stůl
15. Snímač posunu přídavného materiálu
16. Průtokoměr ochranného plynu
17. 4x termočlánek typu K
18. Dataloger ALMENO 5690-2M Ahlborn
19. Laboratorní váha KERN EMB 1200-1

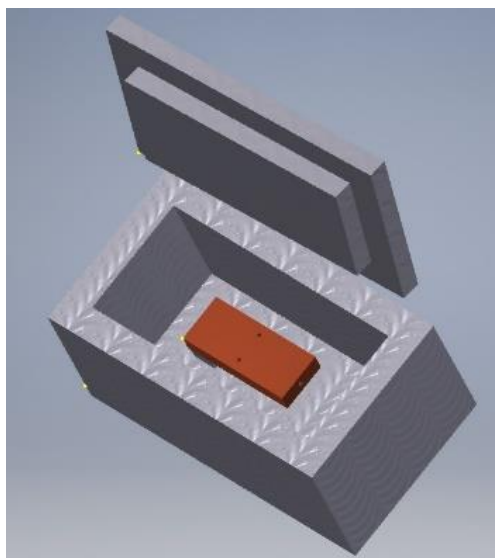
Zkušební a experimentální návary pro nastavení a zachování konstantních parametrů svařování, jako je rychlost svařování, proud a napětí (resp. vzdálenost hořáku od základního materiálu) bylo využito robotizované svařovací pracoviště Laboratoře výuky svářečských technologií na Ústavu strojírenské technologie FS, ČVUT v Praze. Toto pracoviště je vybaveno robotem Fanuc ArcMate 100iC s řídicí jednotkou a jednoosým polohovadlem.



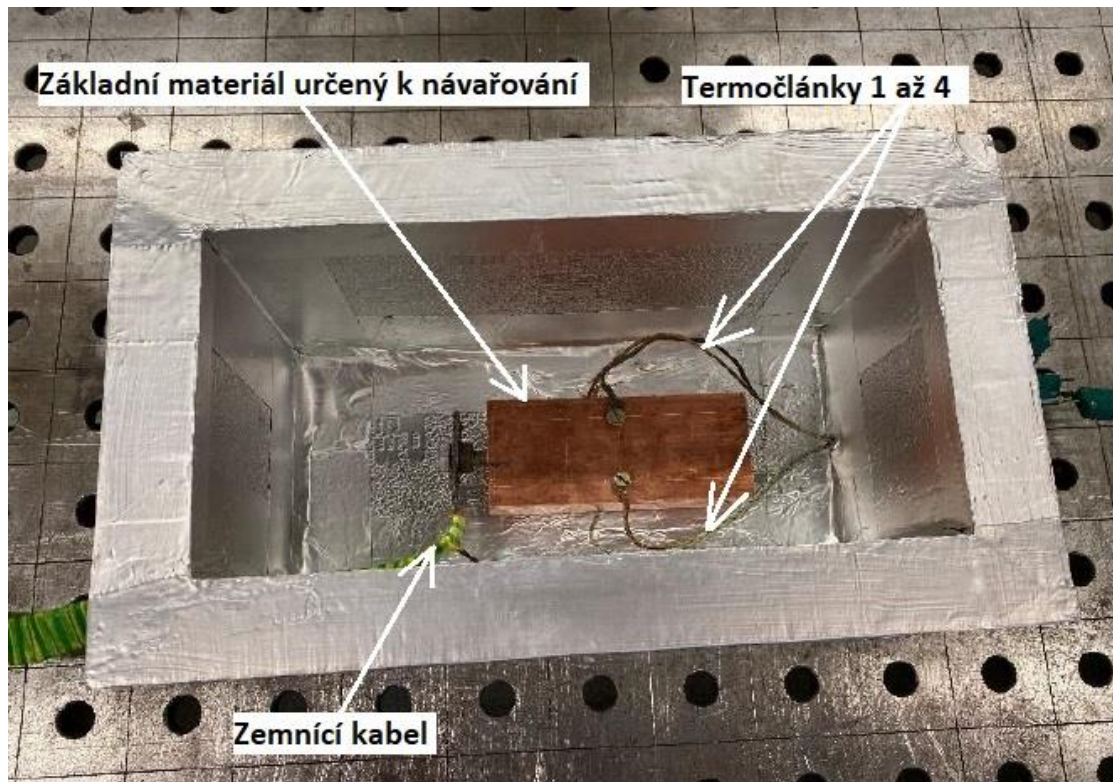
Obr. 27 Reálné uspořádání kalorimetrického měření svařovacího procesu

3.2.1 Provedení kalorimetru

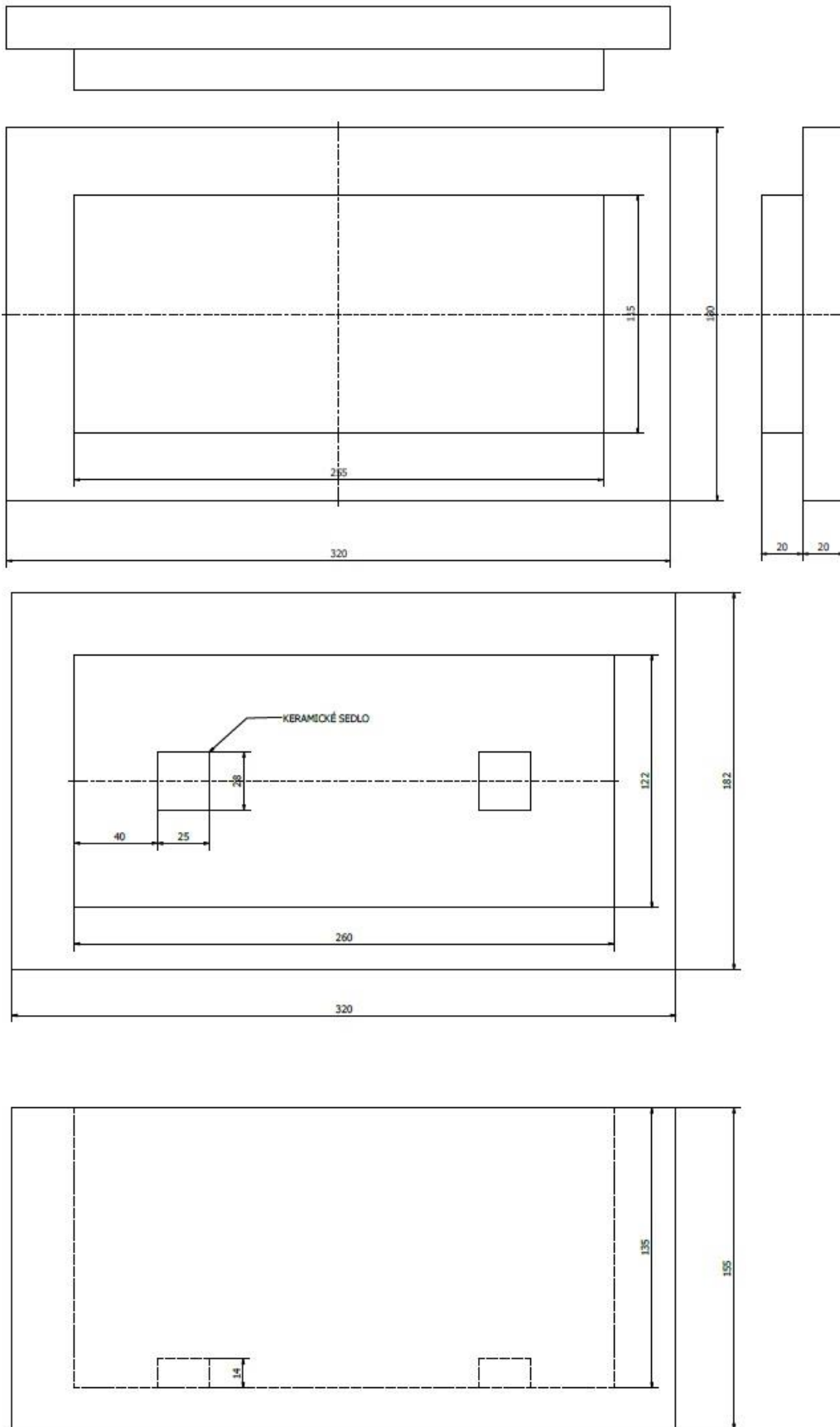
Izolovaný box byl vyroben z desky tvrzené polyuretanové pěny o tloušťce 20 mm potažené z obou stran hliníkovou fólií. Součinitel prostupu tepla $u=0,827 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$. Schéma kalorimetru je vyobrazeno na obrázku 28 až 30.



Obr. 28 3D model suchého kalorimetru



Obr. 29 Reálné uspořádání suchého kalorimetru



Obr. 30 Konstrukční uspořádání izolovaného boxu

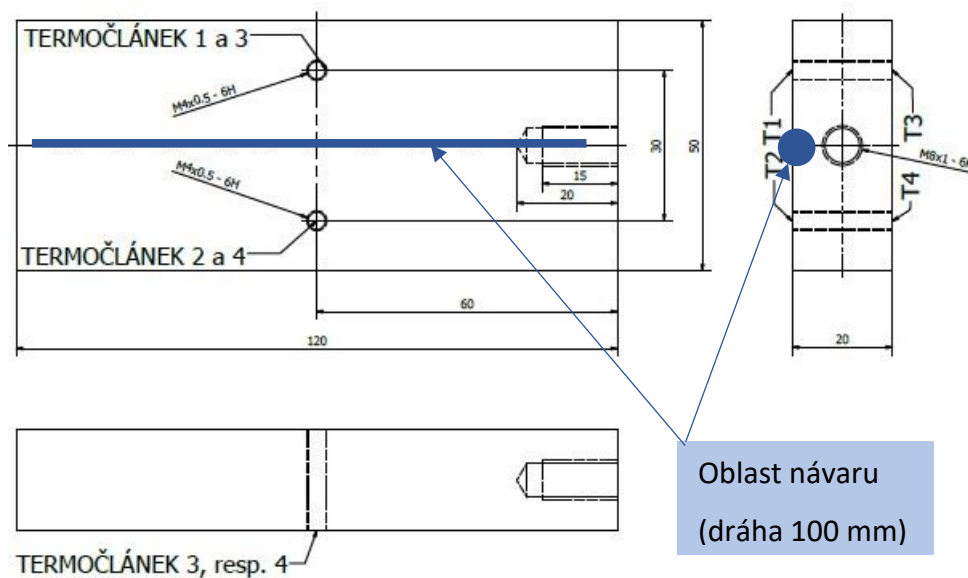
3.2.2 Svařovaný základní materiál

V úplném prvním počátku byla použit měděný vzorek, kvůli vysoké teplotní vodivosti. V další části práce byl použit vzorek oceli jakosti S235JR, která se běžně používá v průmyslové praxi a byl tak realizován experiment svařování při běžných podmínkách., viz. tab.

Tab. 9 Chemické složení oceli S235JR dle ČSN EN 10025-2:2019

Název oceli	Číslo oceli	max. C [%]	max. Mn [%]	max. P [%]	max. S [%]	max. N [%]	max. Cu [%]
S235JR	1.0038	0,17	1,40	0,035	0,035	0,012	0,55

Vzorek pro návar měl konstrukční uspořádání jako je uvedeno na obrázku 31. Termočlánky byly přes podložku přišroubovány šrouby M4 k povrchu navařovaného materiálu. Všechny termočlánky byly umístěny v polovině dráhy návaru v oblasti tepelně ovlivněné oblasti po obou stranách vzorku na osách symetrie. Získané hodnoty teplot v průběhu svařování byly průběžně ze všech čtyř termočlánků zohledněny, aby byla odhadnut tepelný vliv v oblasti pomyslného kříže spojníc termočlánků T1-T3 a T2-T4, viz. obrázek 31. Termočlánky byly připojeny k datalogeru ALMENO 5690-2M Ahlborn, kde byly zaznamenávány průběžné hodnoty teplot z termočlánků T1 až T4. Vzorek byl rovněž připojen k zemnímu vodiči. Navařování housenky probíhá v podélné ose základního materiálu.



Obr. 31 Základní materiál určený k navařování (včetně uspořádání termočlánků)

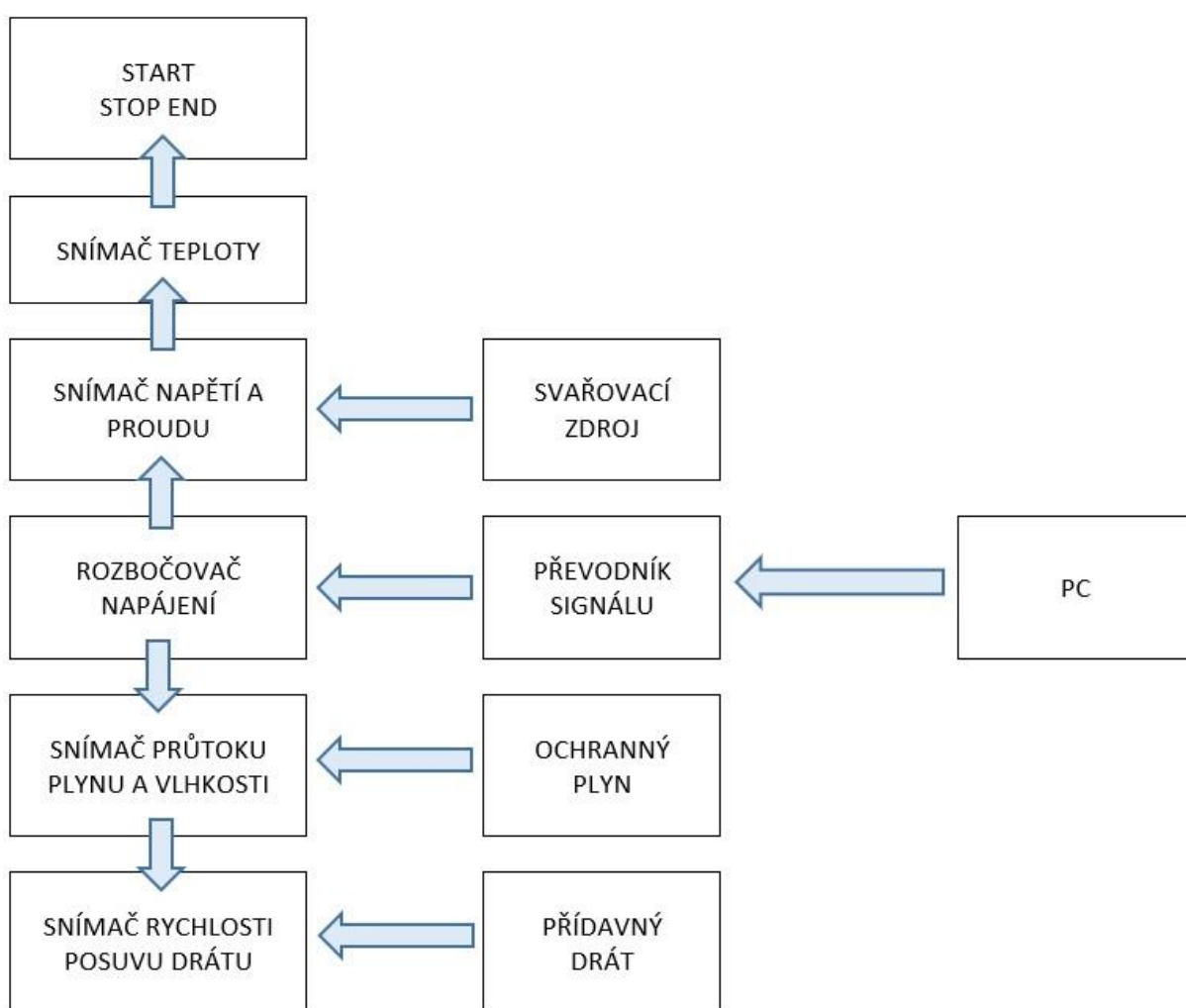
3.2.3 Příprava před svařováním

Před započítím každého experimentu proběhla řada nutných přípravných a kontrolních úkonů. Nejprve byla zahájena příprava a simulace programu pro pohyb robota při najíždění do izolovaného boxu, svařování, vyjíždění z boxu a návrat do základní polohy. Byly nastaveny na svařovacím zdroji (Fronius TransPuls Synergic CMT3200) příslušné svařovací parametry a režim svařování. Bližší specifikace svařovacích parametrů bude popsána později (viz kapitola 3.2.4). Skutečné svařovací parametry byly získány pomocí monitorovacího systému Weldmonitor 4.5 a svařovacího zdroje Fronius. Ke svařování byl použit svařovací drát značky OK AristoRod 12.50 (viz. příloha A2) od společnosti ESAB o průměru 1,0 mm. V bezprostřední vzdálenosti bubnu s přídavným materiálem byl připojen kontaktní snímač k monitorování rychlosti podávání drátu, resp. spotřeby svařovacího drátu v průběhu svařování. Další snímač/průtokoměr byl připojen k redukčnímu ventilu tlakové láhve ochranného plynu pro kontrolu nastaveného průtoku ochranného plynu. Jako ochranný plyn byla použita plynná směs značky FERROLINE C 18 (18% CO₂ v Ar) od společnosti MESSER.

Samotný vzorek určený k navařování byl před každým experimentem odmaštěn a okartačován a poté také zvážen na laboratorní váze KERN EMB 1200-1. Přesná hodnota hmotnosti základního materiálu určeného k navařování je nutná k výpočtu vneseného tepla podle vztahu (6). Ke vzorku byly také připevněny všechny čtyři termočlánky, které byly připojeny k datalogeru ALMENO 5690-2M. Před zahájením měření bylo zkontrolováno, aby hodnoty teplot jednotlivých termočlánků byly stejné. Přesnost záznamu teplot se pohybovala v desetinách stupně Celsia. Zahájení a ukončení záznamu hodnot teplot probíhalo manuálně a data byla ukládána na přenosnou paměťovou kartu. Po navaření zkušební svarové housenky, byl izolační box víkem kompletně zakrytován až do ustálení teploty, aby byly eliminovány tepelné ztráty.

MONITORING PODMÍNEK A PARAMETRŮ PROCESU SVAŘOVÁNÍ

Pro monitorování byl použit již zmíněný systém Weldmonitor 4.5 s příslušným sw, což je zařízení, které slouží ke sledování reálných hodnot veličin ovlivňující svařovací proces. Toto zařízení je modulární systém, který umožňuje nezávisle připojit jednotlivé externí snímače sledovaných veličin. Celý systém modulů-snímačů je propojen a přiveden přes převodník do PC ke sběru a vyhodnocení dat. Schématicky je zařízení Weldmonitor zobrazeno na obrázku 32.



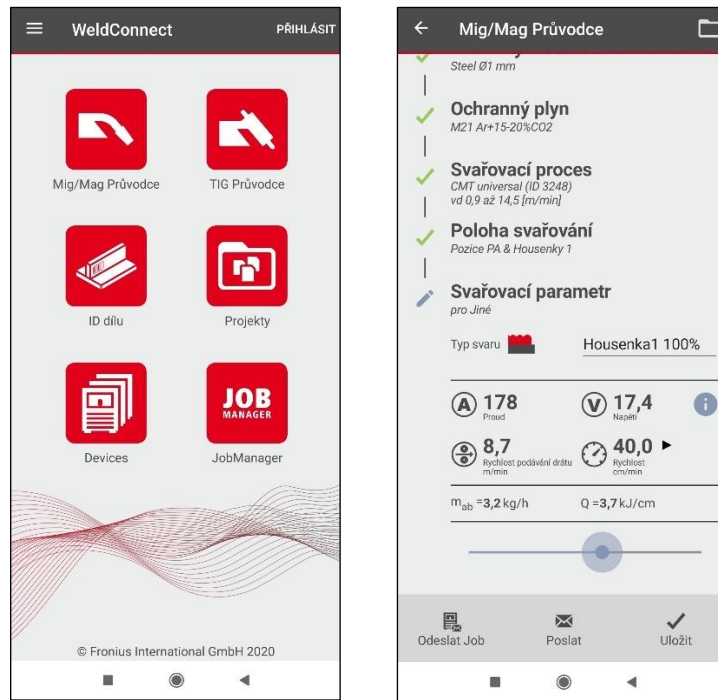
Obr. 32 Schéma Weldmonitoru

NASTAVENÍ SVAŘOVACÍCH PARAMETRŮ

Před zahájením experimentálního navařování bylo nutné odladit proces vytváření svarové housenky a najít vhodné parametry svařování resp. navařování. Základním směrodatným parametrem byl svařovací proud. Pomocí mobilní aplikace WeldConnect od společnosti Fronius byly získáno prvotní nastavení svářecích parametrů pro CMT metodu.

V MIG/MAG průvodci byl definován svařovací zdroj, základní materiál, typ svaru včetně velikosti svarové housenky, materiál a typ přídavného materiálu, dále potom ochranný plyn, svařovací proces CMT a poloha svařování. MIG/MAG Průvodce potom navrhne svařovací proud, svařovací napětí, rychlost podávání drátu a rychlost svařování. Aplikace spočítá teoretickou spotřebu přídavného materiálu v kg/hod, neboli odtavný výkon z hlediska spotřeby přídavného drátu na čase. A rovněž aplikace zobrazí vnesené teplo (tepelný příkon), které je vypočítáno z výkonu elektrického oblouku, rychlosti svařování a zaokrouhlené hodnoty účinnosti metody. Použitý výkon oblouku odpovídá v případě charakteristik standardnímu výkonu podle okamžitých hodnot. Pomocí posuvného ovladače v aplikaci je možné změnit rychlost podávání drátu a rychlost svařování při stejném objemu svaru. Rychlost drátu přitom v synergickém provozu určuje i parametry proudu a napětí. Tyto parametry odpovídají skutečným předpovědím hodnot TPS/i.

Skutečně nastavené hodnoty byly ještě korigovány dle vlastní potřeby a zejména z pohledu stability elektrického oblouku. Projevem stability je rovnoměrnost hoření oblouku, velikost nežádoucího rozstříku a charakter vzniklé svarové housenky.



Obr. 33 Ukázka z nastavení svařovacích parametrů v aplikaci WeldConnect

Skutečné svařovací parametry budou představeny v následující kapitole 3.2.4 v rámci výsledků měření.

3.2.4 Výsledky kalorimetrického měření svařovacího procesu

Měření koeficientu tepelné účinnosti bylo rozděleno do několika etap. V první etapě probíhalo zkušební jednohousenkové navařování měděného vzorku, dále potom navařování vzorku z oceli S235JR stejných rozměrů jako měděný vzorek (viz obrázek 31). V závěrečné etapě bylo provedeno svařování stejného vzorku z oceli avšak doplněného V-drážkou s rozevřením 60°, s různou hloubkou drážky. V-drážka byla zvolena s ohledem na využití v běžné praxi při svařování tupých spojů, aby se výsledky co nejvíce přiblížili reálnému stavu (drážka simulovala přípravu svarových ploch pro tupý V svar). Zároveň nebylo z dostupných zdrojů zjištěno, že by bylo v minulosti ověřováno „chování“ koeficientu tepelné účinnosti při tomto tvaru svařovací drážky.

Experiment byl realizován pro tři různé varianty svařovacího proudu ($I=140 / 170 / 200$ A), vybraného na základě použití výrobcem doporučené aplikace WeldConnect, viz kapitola 3.2.3. Reálné parametry použité do výpočtů byly převzaty z monitorovacího systému Weldmonitor (svařovací proud, svařovací napětí, průtok ochranného plynu, rychlost podávání

drátu, svařovací čas). Jelikož svařovací napětí a proud neustále osciluje, byla efektivní hodnota odečtená z Weldmonitoru a použita k výpočtu zprůměrována ze stabilní oblasti svařování v místě termočlánků. Ze statistických důvodů byl každý experiment 5x opakován. Z dílčích vypočítaných koeficientů účinnosti byl aritmetickým průměrem vypočítán celkový konečný koeficient účinnosti svařovacího procesu.

Pro informaci je uvedena korekce, která spočívá v zahrnutí tepelné kapacity šroubů, kterými byly připevněny termočlánky na svařovaném tělese a dále tepelná kapacita zemního kabelu v délce odpovídající vnitřní části kalorimetru.

VÝSLEDKY Z NAVAŘOVÁNÍ MĚDĚNÉHO VZORKU

Tab. 10 Hodnoty kalorimetrického měření na vzorku mědi při nominálním svařovacím proudu 140 A

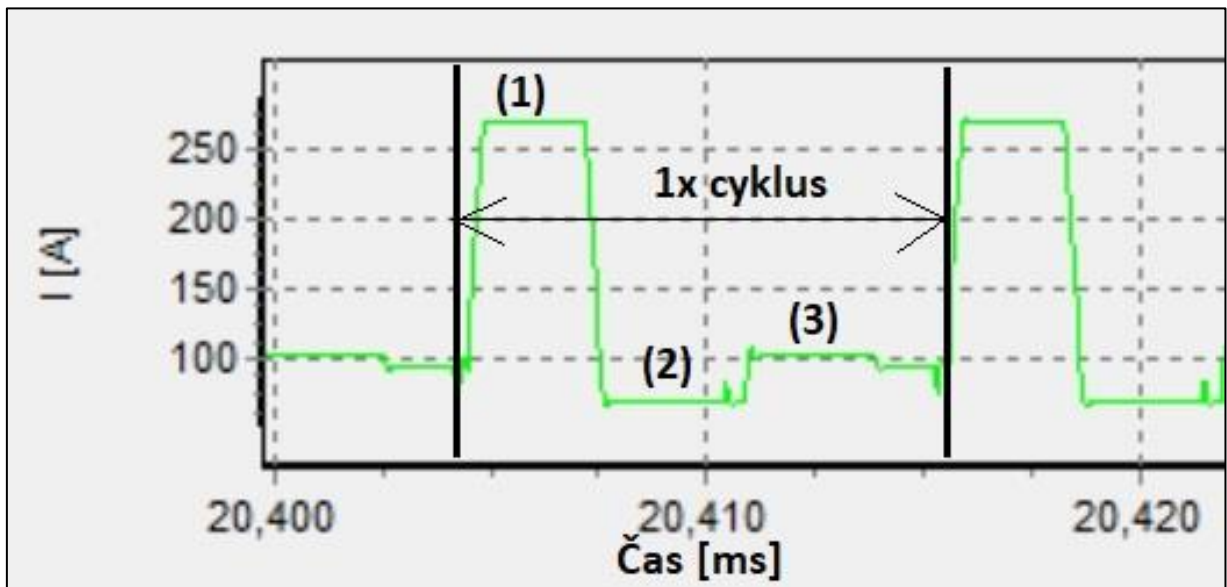
WELDMONITOR	Jednotka	1	2	3	4	5
Minimální teplota	°C	19,9	20,2	23,6	23,1	23,7
Maximální teplota	°C	161,8	159,0	165,3	161,9	165,1
Hmotnost vzorku	g	1050,1	1050,1	1050,2	1050,1	1050,0
Vnesené teplo	J	58009,3	56731,8	57943,3	56776,1	57785,7
Svařovací napětí	V	21,2	20,9	21,4	21,1	21,0
Svařovací proud	A	153,3	151,6	152,1	151,5	151,5
Svařovací čas	s	31,2	31,2	31,2	31,2	31,2
Rychlost svařování	m/min	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19
Průtok ochranného plynu	l/min	12	12	11,9	11,9	11,9
Rychlost podávání drátu	m/min	2,6	2,9	2,7	2,6	2,8
Tepelná práce	J	101378,9	98855,3	101554,1	99735,5	99262,8
Účinnost	-	0,57	0,57	0,57	0,57	0,58
Průměrná účinnost	-	0,57				
Účinnost (po korekci)	-	0,62	0,62	0,61	0,61	0,63
Průměrná účinnost (po korekci)	-	0,62				



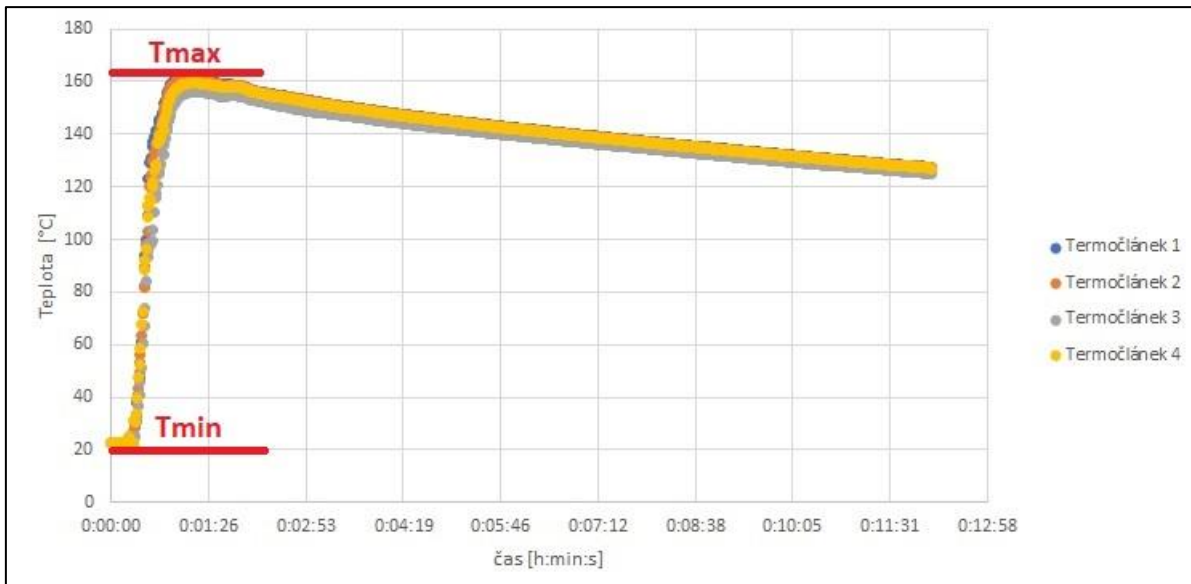
Obr. 34 Časový záznam svařovacího proudu a napětí a výkonu oblouku ($I=140\text{ A}$)

Na následujícím obrázku 35, který je detailním vyobrazením průběhu svařovacího proudu, jsou zřetelné jednotlivé fáze svařovacího proudu typické pro CMT svařování tak jak byly popsány v kapitole 2.5.3:

(1) fáze proudového peaku, (2) fáze background proudu, (3) fáze zkratu



Obr. 35 Detail průběhu svařovacího proudu při CMT svařování (vzorek Cu, $I=140\text{ A}$)

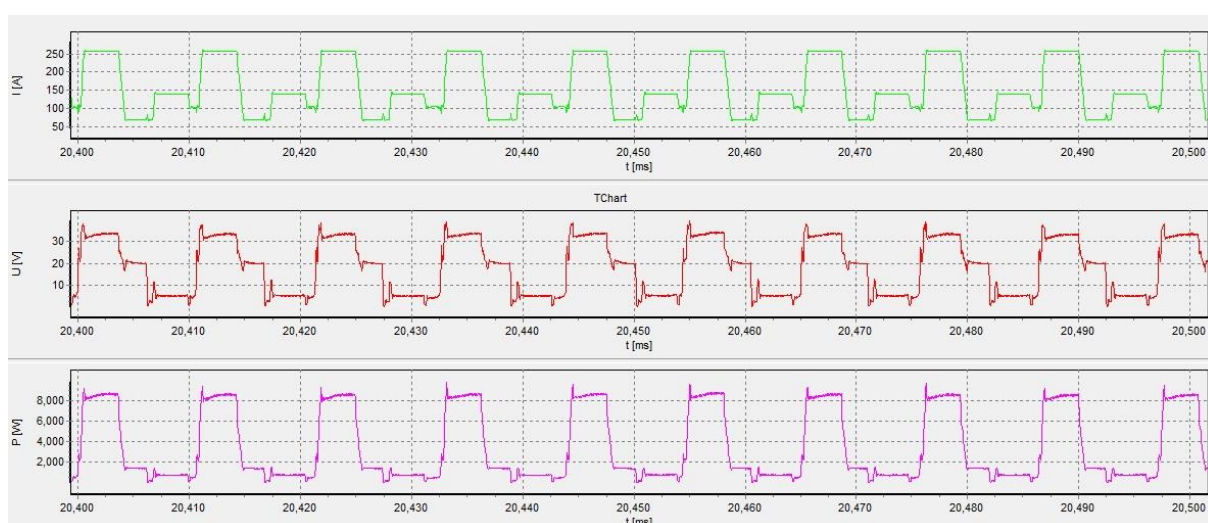


Obr. 36 Průběh teploty během kalorimetrického měření (vzorek Cu, I=140A)

Na obr. 36 je znázorněn průběh teploty zaznamenaný z jednotlivých termočláneků T1 až T4. Před zahájením svařování bylo zkontrolováno, že všechny počáteční hodnoty teplot z termočláneků ukazují stejnou hodnotu vzorku temperovaného na teplotu okolí. Teprve potom bylo zahájeno svařování vzorku. Z hodnot zaznamenaných termočláneků T1 až T4 byly nalezeny maximální teploty vzorku. Všechny čtyři maximální hodnoty teplot z termočláneků T1 až T4 byly zprůměrovány do jedné. Tak bylo zajištěno objektivní pokrytí celého teplotního pole v tepelně ovlivněné oblasti. Rozdíl teplot Tmax a Tmin pak byl použit v další výpočtech vneseného tepla.

Tab. 11 Hodnoty kalorimetrického měření na vzorku mědi při nominálním svařovacím proudu 170 A

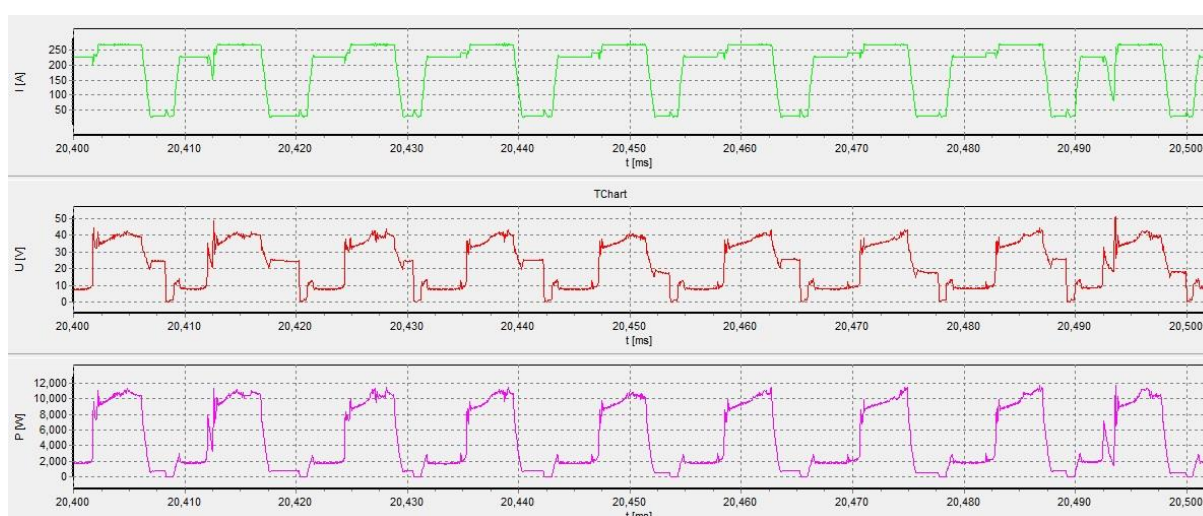
WELDMONITOR	Jednotka	1	2	3	4	5
Minimální teplota	°C	23,4	21,9	22,6	21,6	21,5
Maximální teplota	°C	138,3	134,7	136,1	134,1	138,5
Hmotnost vzorku	g	1054,3	1054,3	1054,1	1054,1	1052,2
Vnesené teplo	J	47169,7	46328,3	46586,2	46186,1	47925,7
Svařovací napětí	V	22,6	22,5	22,8	22,7	22,6
Svařovací proud	A	169,4	169,1	169,3	169,5	169,4
Svařovací čas	s	21,2	21,2	21,1	21,2	21,2
Rychlost svařování	m/min	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
Průtok ochranného plynu	l/min	11,7	11,7	11,7	11,7	11,7
Rychlost podávání drátu	m/min	3,7	3,6	3,7	3,6	3,7
Tepelná práce	J	81162,9	80660,7	81446,8	81570,2	81162,9
Účinnost	-	0,58	0,57	0,57	0,57	0,59
Průměrná účinnost	-	0,58				
Účinnost (po korekci)	-	0,63	0,62	0,62	0,61	0,64
Průměrná účinnost (po korekci)	-	0,62				



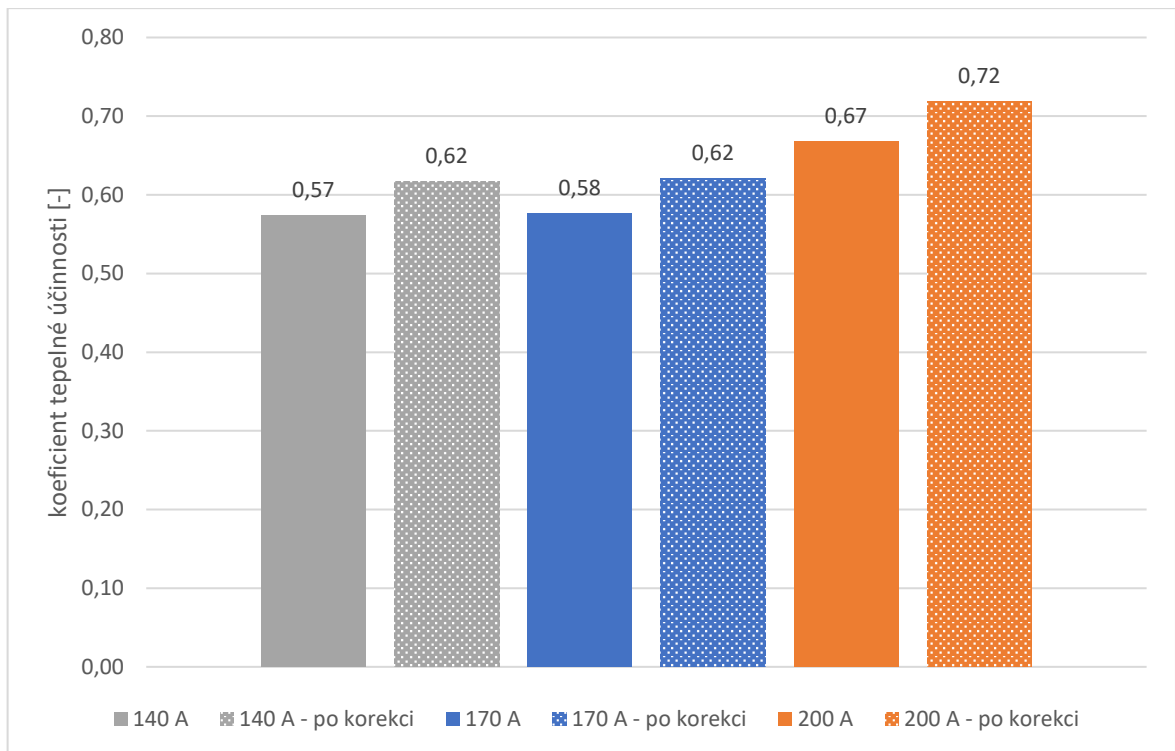
Obr. 37 Časový záznam svařovacího proudu a napětí a výkonu oblouku (I=170 A)

Tab. 12 Hodnoty kalorimetrického měření na vzorku mědi při nominálním svařovacím proudu 200 A

WELDMONITOR	Jednotka	1	2	3	4	5
Minimální teplota	°C	22,1	21,2	22,4	22,1	22,2
Maximální teplota	°C	155,5	171,1	197,5	195,6	161,9
Hmotnost vzorku	g	1052,2	1052,2	1052,1	1051,6	1051,6
Vnesené teplo	J	54643,5	61381,8	71697,4	71028,8	57201,7
Svařovací napětí	V	25,2	25,1	25,3	25,0	24,9
Svařovací proud	A	205,4	205,9	205,8	206,0	206,2
Svařovací čas	s	18,3	18,3	18,3	18,3	18,3
Rychlost svařování	m/min	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
Průtok ochranného plynu	l/min	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6
Rychlost podávání drátu	m/min	4,8	5,0	4,5	4,8	4,8
Tepelná práce	J	94722,3	94576,0	95260,2	94245,0	93959,2
Účinnost	-	0,58	0,65	0,75	0,75	0,61
Průměrná účinnost	-	0,67				
Účinnost (po korekci)	-	0,62	0,70	0,81	0,81	0,66
Průměrná účinnost (po korekci)	-	0,72				



Obr. 38 Časový záznam svařovacího proudu a napětí a výkonu oblouku ($I=200$ A)



Obr. 39 Přehled naměřených koeficientů tepelných účinností pro měděný vzorek

Elektrický oblouk byl při svařování nestabilní a návar na měděném vzorku po ochlazení samovolně odpadával, viz. obr. 40. Svarový kov dostatečně nesmácel povrch základního materiálu, to může být jedním z důvodů relativně nízké hodnoty koeficientu tepelné účinnosti. Proto byl v druhé fázi experimentu měděný zkušební vzorek nahrazen ocelovým a měření bylo zopakováno za stejných podmínek.



Obr. 40 Nesouvislý návar na měděném vzorku ($I=140$ A)

VÝSLEDKY Z NAVAŘOVÁNÍ VZORKU Z OCELI S235JR

Elektrický oblouk byl u návaru na měděných vzorcích nestabilní a kvalita svaru nevyhovující a tak byl pro další experiment zvolen materiál ocel S235JR, který je běžně v praxi svařován. Identické parametry svařování jako byly použity při navařování měděného vzorku (viz. kap. 1.7.4.1) byly také použity pro zkušební návary na ocelových blocích z materiálu S235JR.

Tab. 13 Hodnoty kalorimetrického měření na vzorku oceli S235JR při nomin. svařovacím proudu 140 A

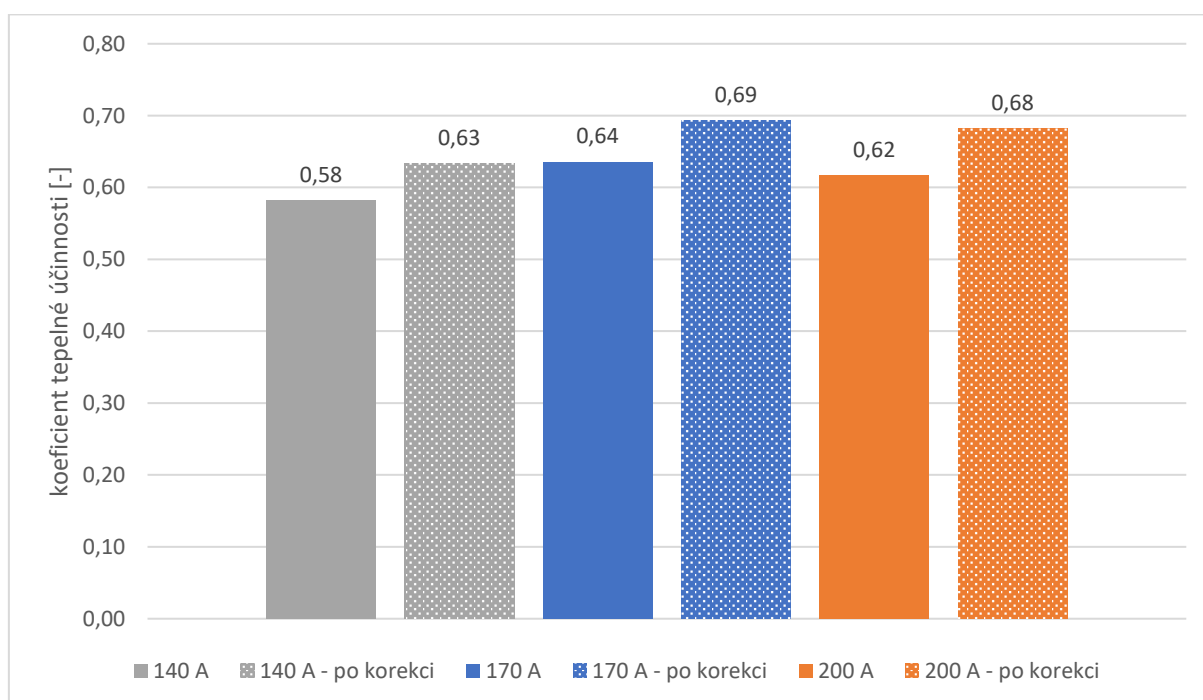
WELDMONITOR	Jednotka	1	2	3	4	5
Minimální teplota	°C	24,2	21,7	25,8	24,6	24,7
Maximální teplota	°C	161,5	157,5	163,7	158,9	158,2
Hmotnost vzorku	g	900,7	904,5	898,7	902,6	896,5
Vnesené teplo	J	58057,6	57634,0	58192,3	56877,6	56146,1
Svařovací napětí	V	20,3	20,6	20,6	20,6	20,9
Svařovací proud	A	153,1	153,3	154,0	153,2	153,6
Svařovací čas	s	31,2	31,2	31,2	31,2	31,2
Rychlost svařování	m/min	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19
Průtok ochranného plynu	l/min	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0
Rychlost podávání drátu	m/min	5,4	5,5	5,4	5,4	5,4
Tepelná práce	J	96967,4	98529,0	98978,9	98225,7	100159,5
Účinnost	-	0,60	0,58	0,59	0,58	0,56
Průměrná účinnost	-	0,58				
Účinnost (po korekci)	-	0,65	0,64	0,64	0,63	0,61
Průměrná účinnost (po korekci)	-	0,63				

Tab. 14 Hodnoty kalorimetrického měření na vzorku oceli S235JR při nomin. svařovacím proudu 170 A

WELDMONITOR	Jednotka	1	2	3	4	5
Minimální teplota	°C	28,0	26,5	28,4	27,7	27,6
Maximální teplota	°C	141,7	152,6	146,0	146,5	156,5
Hmotnost vzorku	g	913,8	909,8	913,9	908,8	913,3
Vnesené teplo	J	48770,6	53840,8	50416,4	50646,9	55226,6
Svařovací napětí	V	22,5	22,4	22,3	22,5	22,3
Svařovací proud	A	171,2	171,4	170,9	171,0	171,2
Svařovací čas	s	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2
Rychlost svařování	m/min	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
Průtok ochranného plynu	l/min	11,8	11,7	11,7	11,7	11,6
Rychlost podávání drátu	m/min	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5
Tepelná práce	J	81662,4	81394,4	80794,7	81567,0	80936,5
Účinnost	-	0,60	0,66	0,62	0,62	0,68
Průměrná účinnost	-	0,64				
Účinnost (po korekci)	-	0,65	0,72	0,68	0,68	0,74
Průměrná účinnost (po korekci)	-	0,69				

Tab. 15 Hodnoty kalorimetrického měření na vzorku oceli S235JR při nomin. svařovacím proudu 200 A

WELD MONITOR	Jednotka	1	2	3	4	5
Minimální teplota	°C	25,6	28,2	27,1	25,3	25,4
Maximální teplota	°C	176,4	158,6	151,2	162,1	168,2
Hmotnost vzorku	g	906,7	906,6	910,5	902,8	908,3
Vnesené teplo	J	64188,8	55480,9	53027,6	57960,0	60870,7
Svařovací napětí	V	25,6	25,1	24,9	25,2	25,2
Svařovací proud	A	200,1	202,6	202,6	201,4	201,4
Svařovací čas	s	18,3	18,3	18,3	18,3	18,3
Rychlost svařování	m/min	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
Průtok ochranného plynu	l/min	11,6	11,0	11,1	11,0	11,3
Rychlost podávání drátu	m/min	8,7	8,7	8,7	8,6	8,7
Tepelná práce	J	93559,8	92874,9	92318,7	92877,6	92877,6
Účinnost	-	0,69	0,60	0,57	0,62	0,66
Průměrná účinnost	-	0,62				
Účinnost (po korekci)	-	0,75	0,65	0,62	0,68	0,71
Průměrná účinnost (po korekci)	-	0,68				



Obr. 41 Přehled naměřených koeficientů tepelných účinností pro ocel S235JR

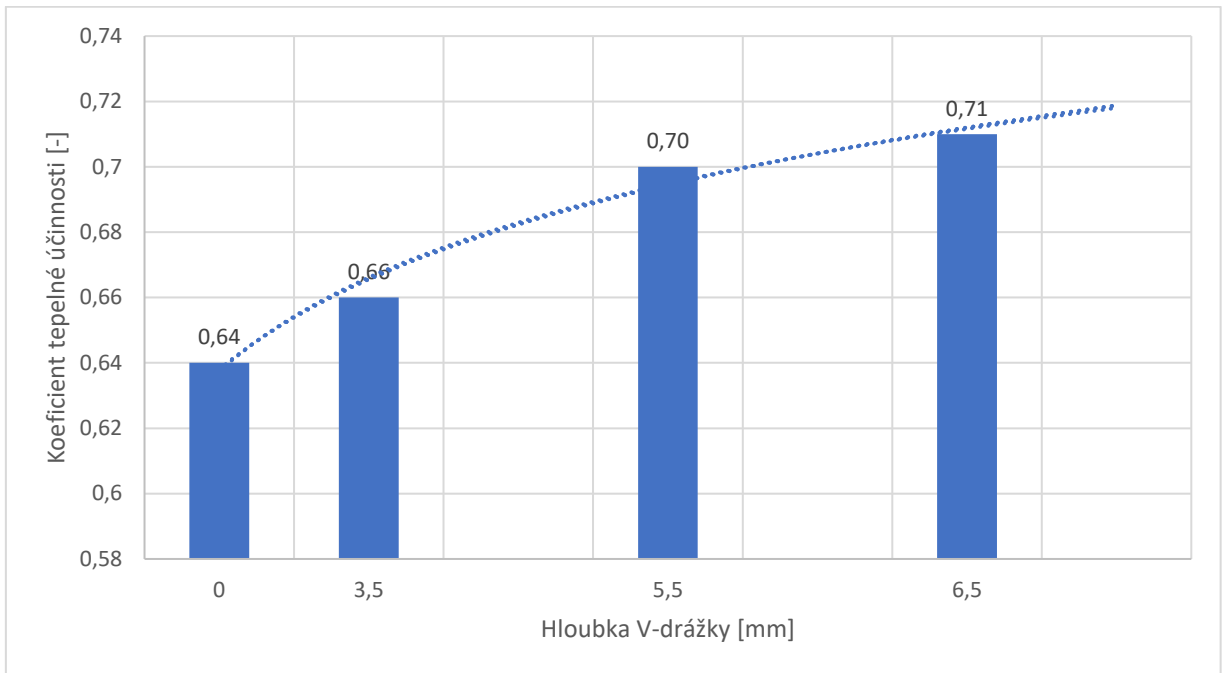
Z výsledků měření koeficientů tepelných účinností (viz. obr. 41) je patrná jistá vyrovnanost hodnot (střední hodnota $k=0,61$). Tyto hodnoty jsou však poněkud nižší než očekávané a proto byl proveden další experiment s V-drážkou, aby byl ověřen její vliv na hodnotu koeficientu tepelné účinnosti.

VÝSLEDKY Z NAVAŘOVÁNÍ VZORKU Z OCELI S235JR S V-DRÁŽKOU

Další experiment proběhl opět na ocelových blocích z materiálu S235JR, které byly připraveny s V-drážkou s úhlem rozevření 60° o hloubce 3,5 mm, 5,5 mm, resp. 6,5 mm. Smyslem tohoto experimentu bylo simulovat svařování tupých spojů typicky běžných v praxi. Pro každou hloubku drážky proběhlo měření dvakrát. Nominální svařovací proud byl vždy 170 A. Ostatní svařovací parametry byly identické jako v předchozích případech se stejným svařovacím proudem. Při hloubce drážky 3,5 mm došlo pouze k částečnému zaplnění drážky svarovým kovem. U hloubky 5,5 mm bylo zaplnění bez převýšení základního materiálu a u hloubky 6,5 mm byl svarový kov na dně drážky s nenařazenými hranami drážky. Se zvyšující se hloubkou drážky se zároveň zvyšuje koeficient tepelné účinnosti, viz obr. 42. Je to pravděpodobně způsobeno větší kontaktní plochou mezi svarovou housenkou a základním materiálem a tedy lepším přenosu tepla, resp. menším tepelným ztrátám jak je naznačeno na obr. 43, 44 a 45. Na makro snímcích se také ukázal neprůvar v kořeni svarů a také částečně studené spoje na stěnách svarové drážky. Svařovací parametry by proto měly být v dalším pokračování výzkumu optimalizovány.

Tab. 16 Hodnoty kalorimetrického měření na vzorku oceli S235JR s V-drážkou při nominálním svařovacím proudu 170 A

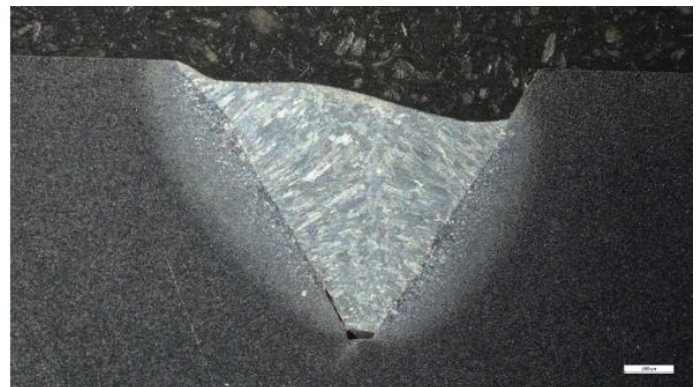
WELDMONITOR	Jednotka						
Hloubka V-drážky	mm	3,5		5,5		6,5	
Pokus	-	1.	2.	1.	2.	1.	2.
Minimální teplota	°C	28,7	27,8	25,6	27,9	27,4	25,1
Maximální teplota	°C	140,2	142,2	148,5	145,8	150,5	150,0
Hmotnost vzorku	g	903,9	907,6	914,1	920,0	897,1	902,7
Vnesené teplo	J	47298,3	48727,2	52722,5	50904,0	51826,2	52912,3
Svařovací napětí	V	20,6	20,7	20,9	20,9	21,0	21,0
Svařovací proud	A	165,7	165,9	167,7	165,4	166,5	166,4
Svařovací čas	s	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2
Rychlost svařování	m/min	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
Průtok ochranného plynu	l/min	10,9	10,9	11,1	10,9	10,9	11,0
Rychlost podávání drátu	m/min	6,1	6,1	5,6	5,7	6,2	6,1
Tepelná práce	J	72364,5	72803,6	74304,5	73285,4	74125,8	74081,3
Účinnost	-	0,65	0,67	0,71	0,69	0,70	0,71
Průměrná účinnost	-	0,66		0,70		0,71	
Účinnost (po korekci)	-	0,71	0,73	0,77	0,75	0,76	0,78
Průměrná účinnost (po korekci)	-	0,72		0,76		0,77	



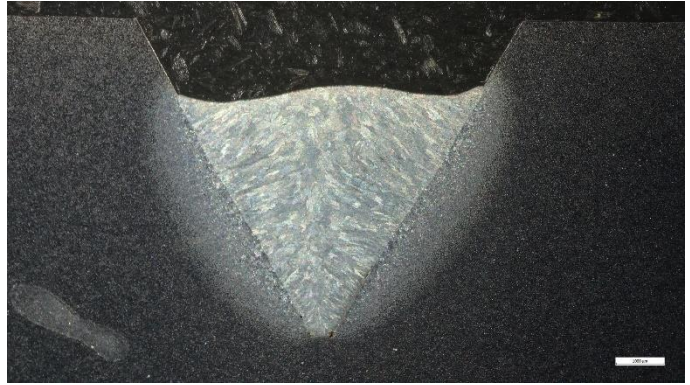
Obr. 42 Závislost koeficientu tepelné účinnosti na hloubce V-drážky



Obr. 43 Svařování metodou CMT do V-drážky (hloubka = 3,5mm, délka hrany zaplněná svarovým kovem 9,25mm, měřítko makro snímku = 1000 μ m, Nital 2%)



Obr. 44 Svařování metodou CMT do V-drážky (hloubka = 5,5mm, délka hrany zaplněná svarovým kovem 11,5mm, měřítko makro snímku = 1000 μ m, Nital 2%)



Obr. 45 Svařování metodou CMT do V-drážky (hloubka = 6,5mm, délka hrany zaplněná svarovým kovem 12 mm, měřítko makro snímku = 1000 μ m, Nital 2%)

4. ZÁVĚR

V této diplomové práci byla provedena rešerše z oblasti svařování metodou CMT- Cold Metal Transfer. Byly zmapovány metody měření a výpočtu koeficientu tepelné účinnosti svařování elektrickým obloukem. Pro kalorimetrické měření účinnosti svařovacího procesu byla vybrána metoda izolovaného boxu - tzv. suchý kalorimetr, který byl použit i jinými autory, kteří se zabývali stejným problémem [8, 11, 17].

K navařování byly použity dva základní materiály, měď a konstrukční ocel S235JR. Pro výpočet vneseného tepla je nutné znát měrnou tepelnou kapacitu obou materiálů. Jelikož měděný blok mohl vykazovat pouze určitou míru chemické čistoty a měrná tepelná kapacita oceli S235JR není publikována, bylo provedeno ověřovací kalorimetrické měření měrné tepelné kapacity obou materiálů, aby byla eliminována chyba výpočtu. V případě měděného vzorku byla zjištěna hodnota měrné tepelné kapacity $c = 389,3 \pm 2,1 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Tato hodnota se liší pouze nepatrně od tabulkové hodnoty pro čistou měď ($383 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$). U použité oceli S235JR byla naměřena a vypočtena měrná tepelná kapacita $469,3 \pm 2,8 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ (čisté železo $450 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$). Jak je však uvedeno v kapitole 2.2, měrná tepelná kapacita materiálu je do určité míry závislá i na teplotě. Hodnoty měrné tepelné kapacity byly zjištěny při teplotě nižší než 100°C , avšak naměřené maximální teploty základního materiálu (při vlastním experimentu) v místě připojených termočlánků dosáhly téměř 200°C . Při pokračování výzkumu by pro zpřesnění výsledků bylo proto vhodné provést další měření měrné tepelné kapacity obou materiálů i při teplotách vyšších než 100°C , aby byla zjištěna teplotní korekce.

Navařování nejdříve probíhalo na měděném bloku (ZM). Proces navařování však nebyl stabilní. To se projevilo na rozptylu hodnot koeficientu tepelné účinnosti v rozmezí 0,57-0,67 přičemž hodnota stoupala se zvyšujícím se svařovacím proudem. Proto proběhlo také navařování ocelového bloku (ZM) za stejných podmínek jako uměděného vzorku. U ocelového bloku se koeficient tepelné účinnosti pohyboval v rozmezí 0,58-0,64. Rozptyl hodnot se snížil nicméně hodnoty jsou nižší než ty uvedené v publikacích v kapitole 1.1., resp. [8]. Může to být způsobeno několika faktory. Jednak to může být díky ověřeným hodnotám měrné tepelné kapacity navařovaných materiálů, ale i díky jiným použitým svařovacím parametrům a rovněž také odlišnými podmínkami svařování a měření. Významným faktorem, který může ovlivnit výslednou hodnotu účinnosti, může být i ztráta tepla vyzářením v průběhu svařování. Ačkoliv byl kalorimetr v průběhu svařování postupně za svařovacím hořákem uzavírán, druhá polovina kalorimetru před hořákem zůstávala částečně odkrytá do zavaření vzorku. To by bylo možné

do budoucna vyřešit lamelovým či kartáčovým uzávěrem kalorimetru, který by zabránil tepelným ztrátám v průběhu svařování (resp. provádění návaru). Dalším faktorem, který pravděpodobně ovlivnil tepelné ztráty, byl svařovací čas. Podle studie, kterou představuje Pépe [8], koeficient tepelné účinnosti je v první fázi do 25 s téměř lineárně klesající s délkou svařovacího času (viz obrázek 10). S vyšším svařovacím časem se tato závislost stává exponenciálně klesající a svařovací čas významně ovlivňuje výsledný koeficient tepelné účinnosti. Na druhou stranu příliš krátký čas svařování může vnést chybovost z jiných příčin, protože nemá dostatečnou vypovídající hodnotu. Bylo by proto vhodné nalézt optimální délku svařovaného vzorku. Rovněž by bylo vhodné upravit kalorimetr, aby měl co nejmenší přebytečný objem, aby nedocházelo k tepelným ztrátám vyzařením. Toto je nejvíce patrné na poklesu křivky teploty v průběhu svařování. K eliminaci tepelných ztrát by rovněž pomohlo zmenšení nosných ploch keramických podložek, např. v podobě hrotů, z materiálů s nízkou tepelnou vodivostí.

V další části práce byl ještě ověřen vliv drážky na koeficient tepelné účinnosti při svařování tupých V-spojů používaných v běžné praxi. Drážka s úhlem rozevření 60° měla hloubku v rozmezí 3,5 až 6,5 mm. Koeficient tepelné účinnosti rostl se stoupající hloubkou drážky až na hodnotu $k=0,71$. Tento jev je pravděpodobně způsoben díky větší ploše mezi svarovým kovem a základním materiálem, který napomáhá k intenzivnímu přesunu tepla vedením.

Získané výsledky měření by bylo zajímavé porovnat i s hodnotami koeficientu tepelné účinnosti získané jinými typy kalorimetrů, např. s kryogenními kapalinami, případně dalšími tzv. mokřými kalorimetry.

Seznam použitých literárních zdrojů

- [1] S. Selvi, A. Vishvaksenan, E. Rajasekar, 2018, *Cold metal transfer (CMT) technology – An overview*, Defence technology 14, 28-44
- [2] *What is Cold Metal Transfer Welding? Understanding It Thoroughly*, webové stránky Waterwelders [online], dostupné z <https://waterwelders.com/cold-metal-transfer-welding/> (07/2021)
- [3] *MIGATRONIC: Intelligent Arc Control* – propagační materiál společnosti MIGATRONIC, [online] dostupné z <https://www.migatronic.com/cz/produkty-a-reseni/svarovaci-funkce/intelligent-arc-control-iac/> (07/2021)
- [4] *KEMPPi: WiseRoot*, propagační materiál společnosti KEMPPi, [online] dostupné z <https://www.kemppi.com/en-US/offering/family/wiseroot/pdf/> (07/2021)
- [5] *Aristo SuperPulse*, propagační materiál společnosti ESAB, [online] dostupné z https://mam.esab.com/assets/1/BDBA5CC688D14EBE822C00D265DF8E7D/doc/99B6ABF49C8646A1A531B5A9AA36B860/ARC_23185-en_US-FactSheet_Main-01.pdf (07/2021)
- [6] J. Janovec, K. Macek, P. Zuna, 2004, *Fyzikální metalurgie*, České vysoké učení technické v Praze, Vydavatelství ČVUT, 13-14 [cit. 2021-07-29], ISBN 978-80-01-02935-0. Dostupné z: <https://vufind.techlib.cz/Record/000165992> (07/2021)
- [7] *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*, 2016, Brno: Česká svářečská společnost ANB, VUT v Brně, FSI, odbor svařování – ATB2
- [8] N. Pépe, S. Egerland, P. A. Colegrove, D. Yapp, A. Leonhartsberger, A. Scotti, 2013. *Measuring the process efficiency of controlled gas metal arc welding processes*, Science and Technology of Welding and Joining [online]. 16(5), 412-417 [cit. 2021-07-29]. DOI: 10.1179/1362171810Y.0000000029. ISSN 1362-1718. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1179/1362171810Y.0000000029> (07/2021)
- [9] *Surface Tension Transfer® (STT®)*, propagační materiál společnosti Lincoln Electric, [online], dostupné z <https://www.westermans.com/downloads/stt%20process.pdf> (07/2021)
- [10] S.-F. Goecke, *Energiereduziertes Lichtbogen-Fügeverfahren für wärmeempfindliche Werkstoffe*, 2005, EWM Mündersbach, EWM HIGHTEC WELDING GmbH, [online] dostupné z <https://www.ewm-sales.com/upload/wm031800.pdf> (07/2021)
- [11] S. Ježek, T. Gurčík, L. Kolařík, P. Rohan, *Calorimetric evaluation of thermal efficiency of selected metal transfers for MAG welding*, 2020, Department of Manufacturing Technology,

Faculty of Mechanical Engineering, Czech Technical University in Prague, Technological forum 2020

- [12] *Cold Metal Transfer / Technologie*, webové stránky společnosti Fronius, [online] <https://www.fronius.com/cs-cz/czech-republic/perfect-welding/hledat?searchedBU=Perfect%20Welding#!/searchconfig/%7B%22searchword%22%3A%22cold%20metal%20transfer%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%224dgdpgwi2rruyf6rjo0d%22%2C%22activeDepartment%22%3Anull%2C%22initialSearch%22%3Atrue%7D> (07/2021)
- [13] ČSN EN 1011-1: Svařování - Doporučení pro svařování kovových materiálů - Část 1: Všeobecná směrnice pro obloukové svařování, 2009, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (ÚNMZ).
- [14] K. Hurtig, I. Choquet, A. Scotti & L.-E. Svensson, 2016, *A critical analysis of weld heat input measurement through a water-cooled stationary anode calorimeter*: Science and Technology of Welding and Joining, ISSN: 1362-1718 (Print) 1743-2936, [online], Journal homepage: <https://www.tandfonline.com/loi/ystw20> (07/2021)
- [15] O. Liskevych, A. Scotti, 2015, *Determination of the gross heat input in arc welding*: Journal of Materials Processing Technology 225 (2015) 139–150, [online], dostupné z <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013615300157> (07/2021)
- [16] A. Haelsig, M. Kusch, P. Mayr, 2015, *Calorimetric analyses of the comprehensive heat flow for gas metal arc welding*: Weld World (2015) 59:191–199, DOI 10.1007/s40194-014-0193-0, [online], dostupné z https://www.researchgate.net/publication/271911879_Calorimetric_analyses_of_the_comprehensive_heat_flow_for_gas_metal_arc_welding (07/2021)
- [17] S. Egerland, P. Colegrove, 2011, *Using Solid State Calorimetry for Measuring Gas Metal Arc Welding Efficiency*: FRONIUS International GmbH, DOI: 10.5772/28754, dostupné z <https://www.intechopen.com/chapters/25069> (07/2021)
- [18] K. Kulhánek, *Vzdělávací modul svařování MIG/MAG (CO₂)*: Střední odborná škola a střední odborné učiliště Neratovice, EU Operační program Vzdělávání pro konkurenceschopnost, [online] dostupné z http://www.sosasou-opvk.cz/3doc/vys/Vyukovy_vzdelavaci_modul_svarovani_MIG-MAG.pdf (07/2021)

- [19] D. Radaj, 2012, *Heat effects of welding: temperature field, residual stress, distortion*, Springer Science & Business Media, Springer-Verlag, 2012, [online] dostupné z <https://www.springer.com/gp/book/9783642486425> (07/2021)
- [20] Gray T., Camilleri D., McPherson N., 2014, *Control of welding distortion in thin-plate fabrication: design support exploiting computational simulation*. Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies: Number 83, Elsevier 2014., [online] dostupné z <https://www.sciencedirect.com/book/9780857090478/control-of-welding-distortion-in-thin-plate-fabrication> (07/2021)
- [21] Kah P., Suoranta R., Martikainen J., 2012, *Advanced gas metal arc welding processes*, Springer-Verlag London Limited, 2012., Int J Adv Manuf Technol (2013) 67:655–674, DOI 10.1007/s00170-012-4513-5, [online] dostupné z <https://www-proquest-com.ezproxy.techlib.cz/docview/2262402626?pq-origsite=summon> (07/2021)
- [22] Rose W. M., 2016, *Cold Metal Transfer Gas Metal Arc Welding Apparatus and method of Operation*, United States Patent No. US 9,321,116 B2, 2016., [online], dostupné z <https://pdfpiw.uspto.gov/.piw?PageNum=0&docid=09321116&IDKey=203A00D4FB89&HomeUrl=http%3A%2F%2Fpatft.uspto.gov%2Fnetacgi%2Fnph-Parser%3FSect1%3DPTO1%2526Sect2%3DHITOFF%2526d%3DPALL%2526p%3D1%2526u%3D%25252Fmetahtml%25252FPTO%25252Fsrchnum.htm%2526r%3D1%2526f%3DG%2526l%3D50%2526s1%3D9321116.PN.%2526OS%3DPN%2F9321116%2526RS%3DPN%2F9321116> (07/2021)
- [23] Robert W., Jr. Messler, Warren F. Savage, 2008, *Principles of Welding : Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy*, John Wiley & Sons, Incorporated, [online], dostupné z <https://ebookcentral.proquest.com/lib/techlib-ebooks/detail.action?docID=482178&pq-origsite=summon> (07/2021)
- [24] D. T. Swift-Hook , A. E. F. Gick, 1973 *Penetration Welding with Lasers*, Welding Journal, vol. 52, pp. 492s-499s
- [25] A. Okada, 1977, *Application of Melting Efficiency and its Problems*, Journal of the Japan Welding Society, vol. 46, pp. 53-61
- [26] J. N. Dupont and A. R. Marder, 1995, *Thermal Efficiency of Arc Welding Processes*, Welding Journal, vol. 74, pp. 406s-416s
- [27] H. B. Smartt, J. A. Stewart, and C. J. Einerson, 1985, *Heat Transfer in Gas Tungsten Arc Welding*, presentation at ASM International Welding Congress, Toronto, Canada

- [28] P. W. Fuerschbach, G. A. Knorovsky, 1991, *A Study of Melting Efficiency in Plasma Arc and Gas Tungsten Arc Welding*, *Welding Journal*, vol. 70, pp. 287s-297s
- [29] N. Collings, K. Y. Wong, A. E. Guile, 1979, *Efficiency of Tungsten-Inert Gas Arcs in Very High Speed Welding*, *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, Volume 126, Issue 3, p. 229 –231
- [29] N. Collings, K. Y. Wong, A. E. Guile, 1979, *Efficiency of Tungsten-Inert Gas Arcs in Very High Speed Welding*, *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, Volume 126, Issue 3, p. 229 –231
- [30] P. W. Fuerschbach, 1996, *Measurement and Prediction of Energy Transfer Efficiency in Laser Beam Welding*, *Welding Journal*, vol. 75, pp. 24s-34s
- [31] P. W. Fuerschbach and G. R. Eisler, 2002, *Effect of laser spot weld energy and duration on melting and absorption*, *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 7, pp. 241-246
- [32] N. N. Rykalin, 1951, *Calculation of Heat Flow in Welding*, Moscow: Translated by Zvi Paley and C. M. Adams Jr.
- [33] P. W. Fuerschbach, 1998, *Cathodic Cleaning and Heat Input in Variable Polarity Plasma Arc Welding of Aluminum*, *Welding Journal*, vol. 77, pp. 76s-85s
- [34] C. Hsu, P. Soltis, 2002, *Proc. Int. Conf. on Trends in welding research*, ASM, Phoenix, AZ, 15-19 April 2002, 369–374
- [35] ČSN EN ISO 4063: *Svařování a příbuzné procesy - Přehled metod a jejich číslování*, 2011, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (ÚNMZ)

Seznam tabulek

Tab. 1 Hodnoty koeficientu tepelné účinnosti dle evropské normy EN 1011-1: 2009 [13].....	17
Tab. 2 Koeficienty účinnosti pro různé metody svařování oceli a hliníku dle D. Radaje [19] ..	18
Tab. 3 Koeficienty tepelné účinnosti pro různé metody svařování dle T. Graye a kol. [20]	18
Tab. 4 Koeficienty účinnosti dle různých zdrojů.....	19
Tab. 5 Typické hodnoty koeficientů tepelné účinnosti pro různé způsoby obloukového a plamenového svařování dle Jr. Messlera a W. Roberta [13], čísla uvedená v závorkách symbolizují metodu svařování dle ČSN EN ISO 4063 [35]	20
Tab. 6 Určení měrné tepelné kapacity kalorimetru	55
Tab. 7 Naměřené hodnoty měrné tepelné kapacity u měděného vzorku	56
Tab. 8 Naměřené hodnoty měrné tepelné kapacity u ocelového vzorku S235JR.....	56
Tab. 9 Chemické složení oceli S235JR dle ČSN EN 10025-2:2019	62
Tab. 10 Hodnoty kalorimetrického měření na vzorku mědi při nominálním svařovacím proudu 140 A.....	67
Tab. 11 Hodnoty kalorimetrického měření na vzorku mědi při nominálním svařovacím proudu 170 A.....	70
Tab. 12 Hodnoty kalorimetrického měření na vzorku mědi při nominálním svařovacím proudu 200 A.....	71
Tab. 13 Hodnoty kalorimetrického měření na vzorku oceli S235JR při nomin. svařovacím proudu 140 A	73
Tab. 14 Hodnoty kalorimetrického měření na vzorku oceli S235JR při nomin. svařovacím proudu 170 A	74
Tab. 15 Hodnoty kalorimetrického měření na vzorku oceli S235JR při nomin. svařovacím proudu 200 A	75
Tab. 16 Hodnoty kalorimetrického měření na vzorku oceli S235JR s V-drážkou při nominálním svařovacím proudu 170 A.....	77

Seznam obrázků

Obr. 1 Závislost měrné tepelné kapacity C_v a C_p na teplotě pro měď [6]	15
Obr. 2 Schématické znázornění vstupu a výstupu tepla ze svařovaného plechu během obloukového svařování [14]	22
Obr. 3 Schématické uspořádání kryogenního kalorimetru s důrazem na stálou trajektorii a pádovou výšku zkušební desky [15], vysvětlivky: Fall distance ... pádová výška	24
Obr. 4 Schématické uspořádání ponorného vodního kalorimetru [16]	25
Obr. 5 Vodou chlazená svařovací hlava [16]	26
Obr. 6 Konstrukční uspořádání kalorimetru s vodou chlazenou stacionární anodou [14]	26
Obr. 7 Schéma suchého kalorimetru jako izolovaného boxu [8]	27
Obr. 8 Závislost teploty vzorku na čase v průběhu svařování [8].....	28
Obr. 9 Koeficient tepelné účinnosti pro jednotlivé metody svařování a různé kalorimetry [8]	29
Obr. 10 Závislost koeficientu tepelné účinnosti (process efficiency) na čase svařování (welding time) [8]	30
Obr. 11 Síly působící na odtavující se konec elektrody (kapku) [24].....	31
Obr. 12 Schéma typů přenosu kovu vyjádřené v závislosti na svařovacích parametrech U a I resp. v	32
Obr. 13 Průběh svařovacího proudu u STT svařovacího procesu [9]	36
Obr. 14 Přenos materiálu a průběh napětí a proudu při svařovacím procesu ColdArc [21] ...	38
Obr. 15 Sekvence přechodu materiálu při svařovacím procesu ColdArc [21]	39
Obr. 16 Průběh výkonu oblouku při zapalování oblouku u standardního zkratového oblouku a ColdArc oblouku	39
Obr. 17 Upravený proces WiseRoot svařování krátkým (zkratovým) obloukem [4]	41
Obr. 18 Režimy svařování technologie Aristo SuperPulse [5]	43
Obr. 19 Průběh svařovacího proudu a napětí při CMT svařování [1].....	45
Obr. 20 Schématické znázornění fází při CMT svařování [12]	46
Obr. 21 Přenos kapičky svarového kovu při CMT svařování zaznamené vysokorychlostní kamerou [1]	46
Obr. 22 Srovnání obloukových technologií [12]	48
Obr. 23 Robotické CMT svařování [12].....	49
Obr. 24 Uspořádání experimentu při měření měrné tepelné kapacity.....	54

Obr. 25	Uspořádání kalorimetru a použité vzorky k měření měrné tepelné kapacity.....	54
Obr. 26	Schématické uspořádání CMT svařování připravené pro kalorimetrické měření.....	57
Obr. 27	Reálné uspořádání kalorimetrického měření svařovacího procesu.....	59
Obr. 28	3D model suchého kalorimetru	60
Obr. 29	Reálné uspořádání suchého kalorimetru	60
Obr. 30	Konstrukční uspořádání izolovaného boxu	61
Obr. 31	Základní materiál určený k návařování (včetně uspořádání termočlánků).....	62
Obr. 32	Schéma Weldmonitoru.....	64
Obr. 33	Ukázka z nastavení svařovacích parametrů v aplikaci WeldConnect.....	66
Obr. 34	Časový záznam svařovacího proudu a napětí a výkonu oblouku (I=140 A)	68
Obr. 35	Detail průběhu svařovacího proudu při CMT svařování (vzorek Cu, I=140A)	68
Obr. 36	Průběh teploty během kalorimetrického měření (vzorek Cu, I=140A)	69
Obr. 37	Časový záznam svařovacího proudu a napětí a výkonu oblouku (I=170 A)	70
Obr. 38	Časový záznam svařovacího proudu a napětí a výkonu oblouku (I=200 A)	71
Obr. 39	Přehled naměřených koeficientů tepelných účinností pro měděný vzorek	72
Obr. 40	Nesouvislý návar na měděném vzorku (I=140 A)	72
Obr. 41	Přehled naměřených koeficientů tepelných účinností pro ocel S235JR	75
Obr. 42	Závislost koeficientu tepelné účinnosti na hloubce V-drážky	78
Obr. 43	Svařování metodou CMT do V-drážky (hloubka = 3,5mm, délka hrany zaplněná svarovým kovem 9,25mm, měřítko makro snímku = 1000 μm, Nital 2%).....	78
Obr. 44	Svařování metodou CMT do V-drážky (hloubka = 5,5mm, délka hrany zaplněná svarovým kovem 11,5mm, měřítko makro snímku = 1000 μm, Nital 2%).....	78
Obr. 45	Svařování metodou CMT do V-drážky (hloubka = 6,5mm, délka hrany zaplněná svarovým kovem 12 mm, měřítko makro snímku = 1000 μm, Nital 2%)	79

Přílohy

A1 Technická specifikace materiálu pro stavbu kalorimetru/izolačního boxu : Izolační desky puren® FAL, dostupné z

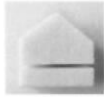
<https://www.puren.cz/www/upload/products/documents/20190325011242103.pdf>

(07/2021)

A2 Technická specifikace přídavného materiálu OK Aristorod 12.50 od společnosti ESAB, dostupné z <https://www.esab.cz/cz/cz/products/filler-metals/mig-mag-wires-gmaw/mild-steel-wires/ok-aristorod-12-50.cfm> (07/2021)

PŘÍLOHA A1

Technická specifikace materiálu pro stavbu kalorimetru/izolačního
boxu: Izolační desky puren® FAL



Technický list

Izolační desky puren® FAL pro podlahy a stropy / terasy



ÜB / AG

		Tvrďá polyuretanová pěna (PIR) dle DIN EN 13165								
Použití	Izolační deska pro podlahy / terasy aplikace pod betonový potěr nebo sklepní strop									
Vrstvy	oboustraně	hliník								
Zpracování hran	po obvodu	tupé (od tloušťky 50mm na vyžádání provedení hran s ozubem)								
K dodání v tloušťkách		mm	20	30	40	50	60	80	100	120
Tepelný odpor	R	(m²·K)/W	0,870	1,304	1,739	2,174	2,609	3,636	4,545	5,455
Součinitel prostupu tepla	U***	W/(m²·K)	0,827	0,608	0,481	0,398	0,339	0,251	0,205	0,173
Difúzní odpor	S _d **	m	1500							
Desky / Balík		Kus	25	16	12	10	8	6	5	4

Technické parametry polyuretanové izolační desky puren® FAL			
Vlastnost	Norma / Zkušební postup	Jednotky	Hodnota
Materiál	Polyuretanová tvrdá pěna (PIR) DIN EN 13165, bez obsahu freonu biologicky a ekologicky nezávadný, recyklovatelný, odolný vůči hnilobě a plísni		
Obecné povolení stavebního dohledu	Z-23.15-1428, Z-23.15-1431		
Rozměry			
Délka	DIN EN 822	mm	1200
Šířka	DIN EN 822	mm	600
Tloušťka	DIN EN 823	mm	20, 30, 40, 50, 60, 80, 100, 120 další tloušťky na vyžádání
Objemová hmotnost	DIN EN 1602	kg/m³	> 30
Tepelná vodivost PIR		u tloušťky [mm]	20, 30, 40, 50, 60, 80, 100, 120
Jmenovitá hodnota (EU) λ ₀	DIN EN 13165	W/(m·K)	0,023
Naměřená hodnota (D) λ	DIN EN 4108-4	W/(m·K)	0,024
Pevnost v tlaku			
napětí v tlaku při 10% deformaci	DIN EN 826	kPa	≥ 120
povolené trvalé napětí v tlaku při deformaci < 2%		kPa	≥ 24
Pevnost v tahu kolmo k rovině desky	DIN EN 1607	kPa	≥ 40
Způsob použití	DIN 4108-10		PUR 023 / 024 DEO dh PUR 023 / 024 DI
Označení	DIN EN 13165		PU-EN 13165-T2-DS(70,90)3-DS(-20,-)2-CS(10(Y))120-TR40
Reakce na oheň	nedoutná, netaví se, neodkapává		
Třída hořlavosti / R _{if} (EU)	DIN EN 13501-1		E
Třída stavebního materiálu (D)	DIN 4102-1		B2
Požární technická charakteristika (CH)	požárně technická charakteristika		5.3
Teplotní použitelnost		°C	-20 až +90
Nasákavost	DIN EN 12087	Vol %	≤ 3 *
Měrná tepelná kapacita C	EN 12524	J/(kg·K)	1400 *
Faktor difúzního odporu vodních par P	EN 12086		40 - 200 *
Lineární součinitel teplotní roztažnosti	DIN EN 1604	1/K	3-7·10 ⁻⁵ *

* Údaje z literatury - nejsou součástí údajů nezávislého dohledu a systému řízení výroby

** Hliníková vrstva

*** Je zohledněn tepelný odpor při přestupu tepla R_{si} a R_{se}. Ostatní vrstvy nejsou posuzovány.



Zkušební laboratoř: 0751 FIW Mnichov
DIN EN 13165



Certifikační orgán: ÜGPU - 2016, 2033
Z-23.15-1428, Z-23.15-1431

puren gmbh · Ringoldshäuser Straße 4 · D-88662 Überlingen
Tel 07551 8099-0 Fax 07551 8099-20 info@puren.com
www.puren.com

Stav ke dni 10/2013
Náš katalog a informační materiál má dle nejlepšího vědomí poskytovat radu, obsah je však bez právní závaznosti. Technické změny vyhrazeny.
Odkazujeme tak na naše všeobecné obchodní a dodací podmínky.

PIR izolační deska

PŘÍLOHA A2

Technická specifikace přídatného materiálu OK Aristorod 12.50 od společnosti ESAB

OK Aristorod 12.50

OK Aristorod 12.50 is a bare Mn-Si-alloyed G3Si1/ER70S-6 solid wire for the GMAW of non-alloyed steels, as used in general construction, automotive components, pressure vessel fabrication and shipbuilding. OK Aristorod 12.50 is treated with ESAB's unique Advanced Surface Characteristics (ASC) technology, taking MAG welding operations to new levels of performance and all-round efficiency, especially in robotic and mechanised welding. Characteristic features include excellent start properties; trouble-free feeding at high wire speeds and lengthy feed distances; a very stable arc at high welding currents; extremely low levels of spatter; low fume emission; reduced contact tip wear and improved protection against corrosion of the wire.

Zařazení svařového kovu dle normy	EN ISO 14341-A : G 38 3 C1 3Si1 EN ISO 14341-A : G 42 4 M20 3Si1 EN ISO 14341-A : G 42 4 M21 3Si1
Zařazení svařovacího drátu dle normy	SFA/AWS A5,18 : ER70S-6 EN ISO 14341-A : G 3Si1 CSA W48 : B-G 49A 3 C1 S6 JIS Z 3312 : YGW 12 (C1)
Schválení	ABS 3Y SA BV SA3YM CE EN 13479 DB 42.039.29 DNV-GL III YMS LR 3YS H15 PRS 3YS RS 3YMS VdTUV 10052 CWB B-G 49A 3 C1 S6 JIS YGW12 (C1) NAKS/HAKC 1.0-1.6 mm NAKS/HAKC 1.2-1.6 mm FINA 3Y S FINA 3Y S

Schválení jsou platná podle místa výroby. Prosim kontaktujte ESAB pro další informace.

Typ legování Carbon-manganese steel (Mn/Si-alloyed)

Typické vlastnosti v tahu

Podmínky	Mez skluzu	Mez pevnosti v tahu	Prodloužení
AWS CO2 (C1)			
Po svaření	430 MPa	530 MPa	30 %
EN 80Ar/20CO2 (M21)			
Po svaření	470 MPa	560 MPa	26 %
Uvolněného Napětí 15hr 620°C	370 MPa	495 MPa	28 %
EN CO2 (C1)			
Po svaření	440 MPa	540 MPa	25 %

Typical Charpy V-Notch Properties

Condition	Testing Temperature	Impact Value
AWS CO2 (C1)		
Po svaření	-30 °C	75 J
EN 80Ar/20CO2 (M21)		
Po svaření	20 °C	130 J
Po svaření	-20 °C	120 J
Po svaření	-30 °C	100 J
Po svaření	-40 °C	90 J
Po svaření	-50 °C	70 J
Uvolněného Napětí 15hr 620°C	20 °C	120 J
Uvolněného Napětí 15hr 620°C	-20 °C	90 J
EN CO2 (C1)		
Po svaření	20 °C	110 J
Po svaření	-30 °C	75 J

Typického chemického složení svařového kovu v %

C	Mn	Si	S	P	Cu	Ti+Zr
0,10	1,11	0,72	0,012	0,013	0,07	<0,01

Typical Wire Composition %

C	Mn	Si
0,08	1,46	0,85



OK Aristorod 12.50

Údaje ukládání

Průměr	A	V	Rychlost podávání drátu	Produktivita
0.8 mm	60-200 A	18-24 V	3.2-10.0 m/min	0.8-2.3 kg/h
0.9 mm	70-250 A	18-26 V	3.0-12.0 m/min	0.9-3.5 kg/h
1.0 mm	80-300 A	18-32 V	2.7-15.0 m/min	1.0-5.5 kg/h
1.14 mm	100-350 A	18-34 V	2.6-15.0 m/min	1.2-7.0 kg/h
1.2 mm	120-380 A	18-35 V	2.5-15.0 m/min	1.3-8.0 kg/h
1.32 mm	130-400 A	19-35 V	2.4-15.0 m/min	1.5-8.5 kg/h
1.4 mm	150-420 A	22-36 V	2.3-12.0 m/min	1.6-8.7 kg/h
1.6 mm	225-550 A	28-38 V	2.3-10.0 m/min	2.1-9.4 kg/h
2.0 mm	300-650 A	32-44 V	3.0-7.0 m/min	4.4-10.2 kg/h