VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ROBOTIZOVANÉ SVAŘOVÁNÍ SKŘÍNĚ LINEÁRNÍHO HYDROMOTORU

ROBOTIC WELDING CASE OF LINEAR FLUID MOTOR

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Bc. Jan Střechovský

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. Marian Sigmund, Ph.D., IWE

SUPERVISOR

BRNO 2023

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	**Bc. Jan Střechovský**
Studijní program:	Strojírenská technologie
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	**Ing. Marian Sigmund, Ph.D., IWE**
Akademický rok:	2022/23

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

Robotizované svařování skříně lineárního hydromotoru

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce předpokládá studium proveditelnosti, a pokud bude proveditelné poté porovnání ručního a robotizovaného svařování prototypu skříně (trubky) lineárního hydromotoru. Zvládnutí celé technologie svařování, včetně svaření prototypového dílce a následné zkoušení kvality svaru. Pokud požadovaná kvalita svaru vyhoví, stím související návrh možné kvalifikace postupů svařování a obsluhy svařovacího robota. Závěrem by mělo být technicko–ekonomické zhodnocení srovnání možné náhrady.

Cíle diplomové práce:

Vypracovat literární rešerši o daných materiálech a technologiích svařování části skříně hydromotoru.
Popsat celý technologický postup výroby skříně hydromotoru.
Navrhnout možný technologický postup svařování skříně hydromotoru na robotu.
Na svařených vzorcích provézt kvalitativní vyhodnocení svarů.
Výsledky návrhu i kvalitu vyhodnotil a ekonomicky zhodnotit.

Seznam doporučené literatury:

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

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

FOLDYNA, Václav. Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. 2., upr. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001. ISBN 80-85771-85-3.

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

BÖHM, Jiří. Svařovací roboty a manipulátory pro obloukové svařování pod ochrannými plyny. Praha: ČÚV komitétu pro svařování ČSVTS, 1981.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

Ing. Jan Zouhar, Ph.D. ředitel ústavu	doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D. děkan fakulty

ABSTRAKT

Práce se zabývá studiem proveditelnosti robotického svařování víka lineárního aktuátoru. V první části je vypracována rešerše kde je kladen důraz na specifikace a dopad jednotlivých částí procesu svařování na vzhled a vlastnosti svaru. Jsou zde také zaneseny některé základní výpočty potřebné pro správný průběh experimentu. Experimentální část práce se zaměřuje na nalezení vhodných svařovacích parametrů a následné vyhodnocení svařovaných vzorků z hlediska vzniklých vad. V následující části dochází k porovnání efektivity ručního a robotického svařování. Závěr práce obsahuje shrnutí dosažených výsledků a rozhodnutí o proveditelnosti robotického svařování daného spoje.

Klíčová slova

Obloukové svařování, robotizace, zkoušení svaru, vady, MAG, MCAW

ABSTRACT

The work deals with the feasibility study of robotic welding of a linear actuator cover. The first part includes a literature review focusing on the specifications and impact of individual welding process components on the appearance and properties of the weld. Some basic calculations necessary for the proper progress of the experiment are also included. The experimental part of the work focuses on finding suitable welding parameters and subsequent evaluation of the welded samples in terms of resulting defects. The following section compares the efficiency of manual and robotic welding. The conclusion of the work summarizes the achieved results and the decision on the feasibility of robotic welding for the given joint.

Keywords

Arc welding, robotization, weld testing, defects, MAG, MCAW

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

STŘECHOVSKÝ, Jan. *Robotizované svařování skříně lineárního hydromotoru* [online]. Brno, 2023. Dostupné z: https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/145845. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Marian Sigmund.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Robotizované svařování skříně lineárního hydromotoru vypracoval(a) samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

místo, datum

Bc. Jan, Střechovský

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto panu Ing. Mariánu Sigmundovi, Ph.D., IWE za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování diplomové práce, panu Ing. Josefu Izákovi za rady a pomoc při provedení experimentální části práce a své přítelkyni a rodině za podporu při psaní práce. Nakonec bych rád poděkoval firmě SUB Slovácké strojírny, jenž vypsala projekt *"Lineární hydraulické aktuátory pro náročné aplikace"*, kterým je tato práce podpořena.

OBSAH

Zadání práce

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD 9
1 ROZBOR ZADÁNÍ 10
1.1 Představení SUB - Slovácké strojírny Uherský Brod 11
1.2 Možnosti řešení výroby 12
2 Robotizace a technologie svařování 15
2.1.1 Přenos kovu v oblouku 17
2.1.2 Materiály a svařitelnost 22
2.1.3 Pevnostní kontrola svaru 26
2.1.4 Zkoušení svaru 26
2.2 Současný technologický postup 29
3 Experimentální část 30
3.1 Výpočty 31
3.1.1 Výpočet pevnosti svaru 33
3.2 Použité zařízení 34
3.3 Vzorky a příprava svařování 37
3.3.1 Svařování metodou MAG 40
3.3.2 Svařování metodou MCAW 41
3.4 Zkoušení svarů 41
3.5 Vizuální zkouška 43
3.6 Penetrační zkouška 50
3.7 Makroskopická zkouška 53
3.8 Finální zhodnocení svarů 57
4 Technologicko-ekonomické zhodnocení 58
ZÁVĚR 59

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratek

Seznam příloh

Seznam výkresů

ÚVOD

Technologie svařování, je jednou ze základních metod pro spojování materiálů. Jejím principem je vytvoření nerozebíratelného spojení pomocí vazebných sil v materiálech a je téměř neodmyslitelnou součástí většiny průmyslových provozů. Hlavními výhodami technologie svařování je její efektivita a rozsah použití, kdy například při výrobě větších složitějších konstrukcí poskytuje často nejlepší variantu díky možnosti spojení menších, dobře vyrobitelných, dílů. Pokud by takováto složitá konstrukce měla podléhat výrobě jinou technologií, byla by značně náročnější a to jak časově tak materiálově a v důsledku tedy i cenově. Hlavními výhodami samotného svaru jsou pak jeho pevnost, tuhost, trvanlivost a těsnost. Právě díky těmto vlastnostem je často preferovaným druhem spojení i v případech kdy je využití jiné technologie spojení cenově srovnatelné. Rozsah použití sváření je značný v důsledku mnoha nastavitelných parametrů a procesů které se jej týkají, ale také díky mnoha použitelným metodám, které pokrývají různé oblasti materiálů a použití.[1; 2]

Obr. 1 Detail kruhového svarového spoje [3].

Obr. 2 Svařování potrubní konstrukce [4].

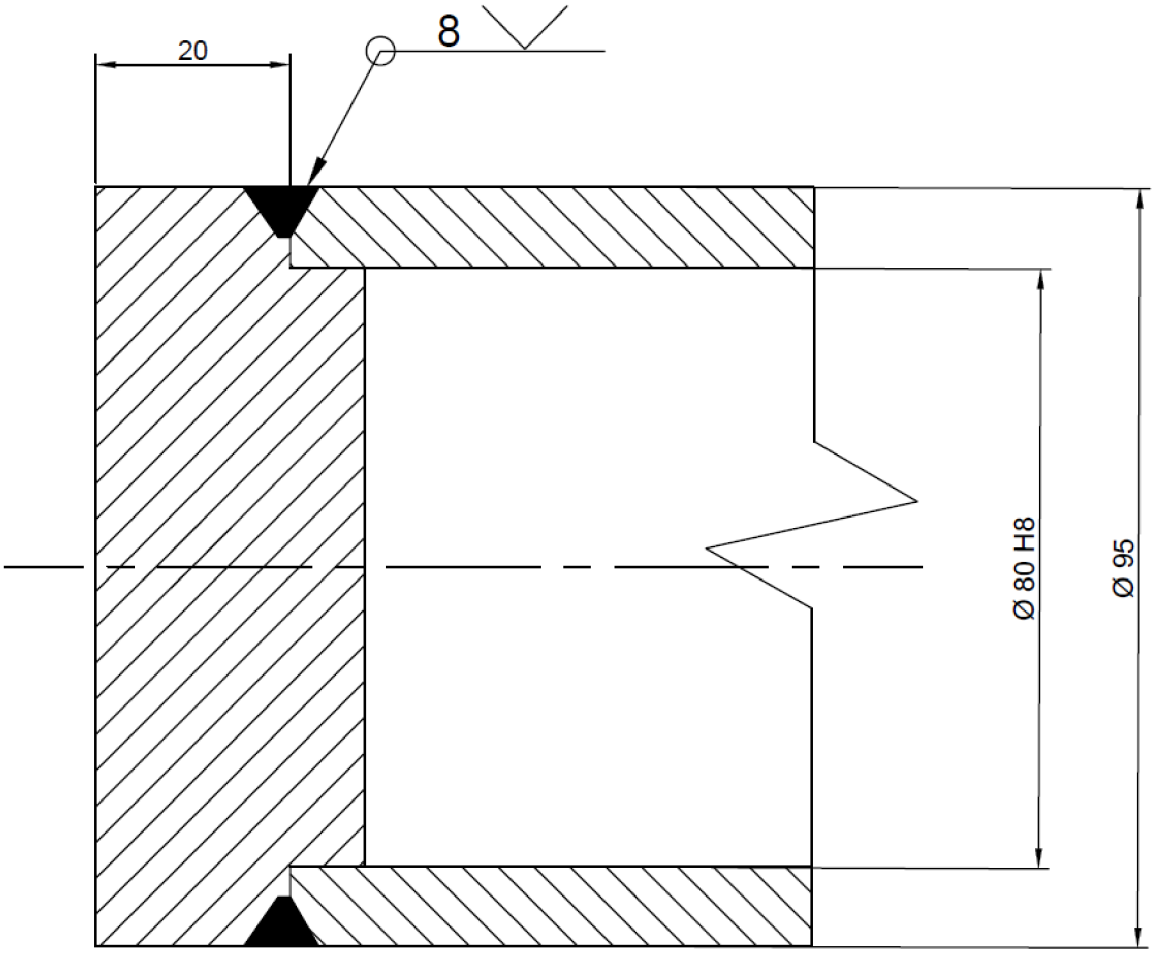
Dalším tématem kterého se práce dotýká je robotizace, konkrétně robotizace právě svařovacích procesů. V dnešní době poskytuje robotizace velkou škálu přínosných vlastností, které jsou lidskou prací nedosažitelné. Zejména přesnost, opakovatelnost a rychlost procesů jsou důvody, proč se stále více výrobců přiklání k modernizaci pracovišť za použití robotizace. To zahrnuje i tento projekt, jehož cílem je začlenění robotizace do svařovacího procesu víka aktuátoru lineárních hydromotorů. Tyto hydromotory jsou poté využity pro montáž požárních a montážních plošin a podléhají tak jistým standardům výroby, které je nutno dodržet. Použití robotizovaného svařování značně přispívá k dodržení těchto standardů a snížení chybovosti při tvorbě svaru, se současným snížením svařovacího času. [5; 6]

Hydromotory jsou široce využívány jak ve strojírenství, tak v jiných odvětvích průmyslu. Jejich hlavním principem je převod tlakové energie na mechanickou. Lineární hydromotor je tedy aktuátor poháněný hydraulickým okruhem.[7]

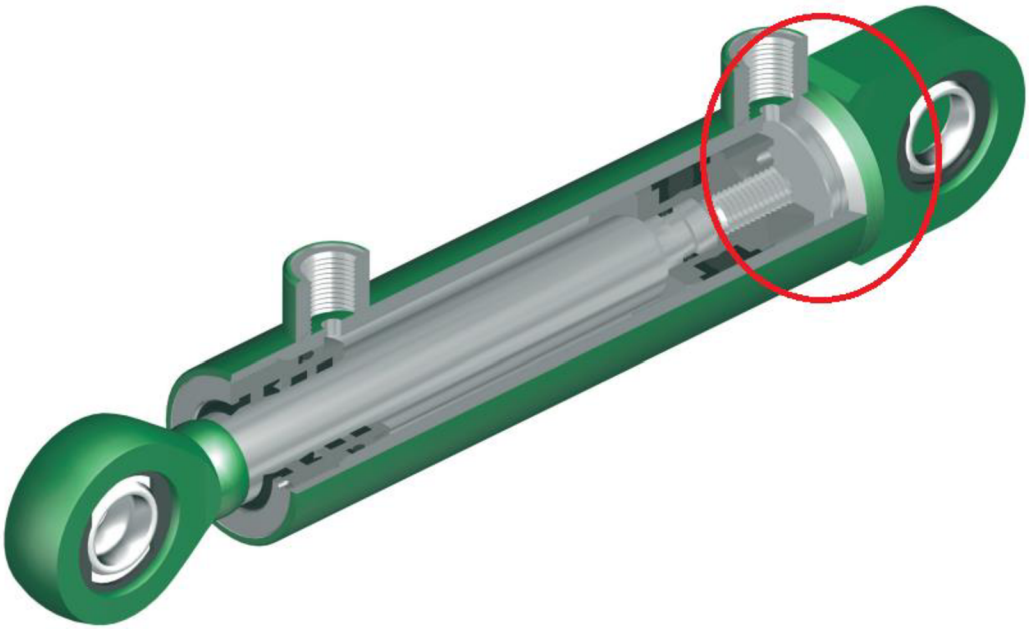
1 ROZBOR ZADÁNÍ

Řešeným problémem je sváření právě víka aktuátoru. Konkrétně se jedná o žádost firmy na zpracování proveditelnosti tohoto svařování za pomocí robotického ramene namísto současného ručního provedení. Požadavek vznikl jak za účelem zkvalitnění svaru, tak pro jeho dobré ekonomické předpoklady při správné realizaci. Výchozím polotovarem je trubka TR Ø95x10 a víko Ø95x28. Celkové rozměry aktuátoru jsou pak Ø95x200.

Použitým materiálem je ocel S355J2N. Jedná se o jemnozrnnou konstrukční ocel, která má při obsahu 0,2 % C feriticko-perlitickou strukturu. Ocel je vhodná ke svařování všemi obvykle používanými způsoby svařování. Musíme ovšem dbát na zvyšující se obsah uhlíku s tloušťkou, což může vést společně s působením vodíku k výskytu trhlin za studena. Vzhledem k typu oceli bude nutné vybrat vhodnou svařovací metodu, která bude zároveň vyhovovat realizaci na robotu.[8]



Obr. 3 Svařovací výkres pro řešený svar.



Obr. 4 Aktuátor s vyznačeným místem svaru [9].

1.1 Představení SUB - Slovácké strojírny Uherský Brod

Slovácké strojírny je průmyslová společnost založena roku 1951 v Uherském Brodě a jedná se o jednoho z nejvýznamnějších průmyslových výrobců ve Zlínském kraji. Zaměstnává kolem tisíce zaměstnanců a skládá se z pěti výrobních závodů konkrétně: Uherský Brod, Komořany, Postřelmov, Čelákovice a Zábřeh na Moravě. Zahraniční export firmy míří převážně do Německa, Holandska, Rakouska a Švýcarska. Firma exportuje cca 75 % své produkce. Pro účely svařování disponuje firma metodami SAW (121), MAG (135), MAG (136/138) a WIG (141) a největší ocelové konstrukce zde dosahují hmotnosti až 50 tun. Činnost firmy zasahuje do různých oborů, různým percentilem výroby například.[10] :

- Elektro výzbroj (19,3 %),
- vysokozdvižné vozíky a plošiny spolu se silniční dopravní technikou (12,7 %),
- průmyslové stroje a zařízení (11,8 %),
- drtiče stavebního odpadu (9,5 %).

Svařování		
Platný certifikát kvality: ČSN EN ISO 3834 – 2		
Certifikáty: DIN 18800 – 7, AD 2000M, TRD 201		
Základní materiály používané pro svařování: 1.1, 1.2, 1.3, 8, 22		
Svařovací metody dle DIN EN ISO 4063:	121 (UP) 135 (MAG) 141 (WIG) 136 (MAG)	
Svařovací dozor:	dle ČSN EN ISO 14 713 (v souladu s ČSN EN ISO 3834-2)	
Kvalifikace svářečů:	dle ČSN EN 287-1 AD 2000 HP3, TRD 201 136 (MAG)	80 svářečů 8 svářečů 15 svářečů

Obr. 5 Technologické dispozice firmy pro svařování [10].

Obr. 6 Letecká fotografie závodu v Uherském Brodu [10].

1.2 Možnosti řešení výroby

Pro svařování oceli S355J2N, tedy jemnozrnné konstrukční oceli, vybíráme dle doporučených metod obloukového tavného svařování pro tyto oceli. Jedná se v principu o tavné svařování s odtavující se elektrodou.[11; 12]

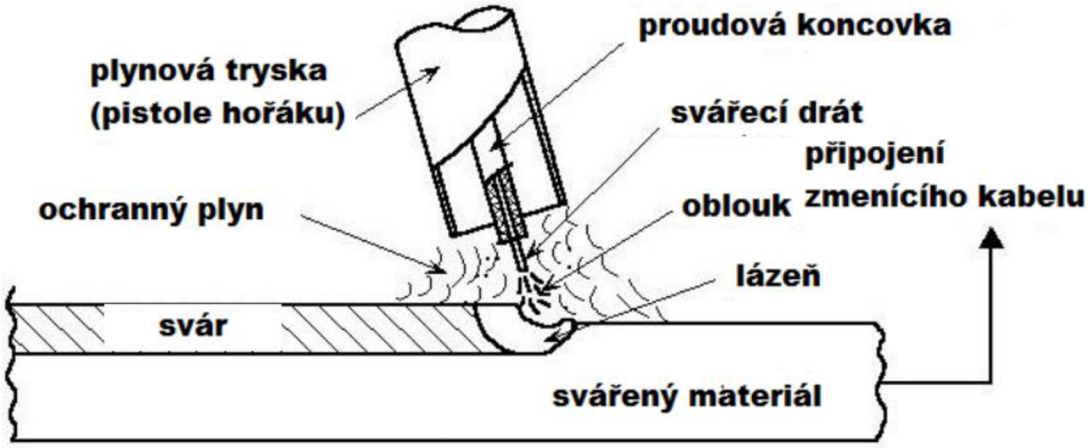
Doporučené metody tavného svařování pro ocel S355:

- Obloukové svařování tavící se elektrodou v aktivním plynu - MAG (135).
- Obloukové svařování plněnou elektrodou v aktivním plynu – FCAW/MCAW (136/138).

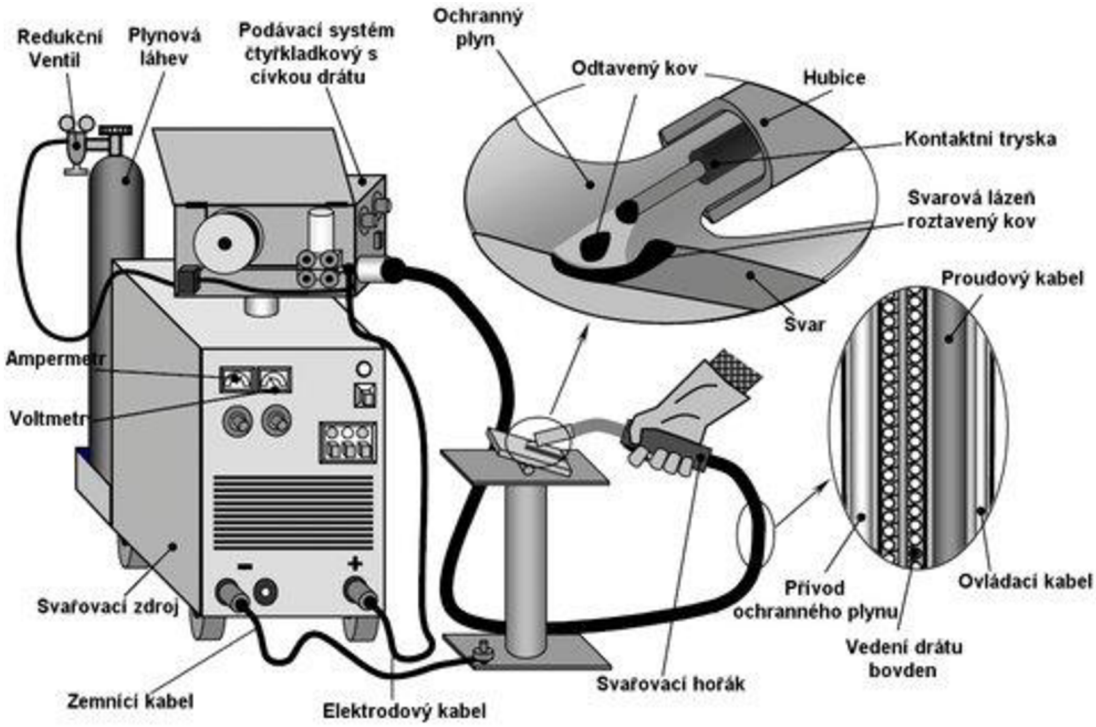
Metoda MAG je jedna z celosvětově nejrozšířenějších svařovacích metod pro nelegované a nízkolegované oceli. Metoda je založena na hoření oblouku mezi tavným drátem a základním materiálem, který hoří v oblasti ochranné atmosféry aktivního plynu. Napájení proudem je uskutečněno třecím kontaktem v oblasti ústí hořáku. Metoda MAG se vyznačuje vysokou proudovou hustotou až 600 $A \cdot mm^{-2}$, což je nejvyšší hodnota ze všech obloukových metod, svařovací proud se poté pohybuje ve značně velkém rozmezí 30 až 800 A. Stchéma této metody vidíme na obrázku č. 8. Celý svařovací systém metodu MAG, který je však použitelný i pro metodu FCAW/MCAW, můžeme vidět na obrázku č. 9.[1; 2; 12; 13]

Mezi hlavní výhody metody MAG patří [2; 12; 13]:

- Možnost svařování ve všech polohách.
- Poměrně hluboký závar a dobrý profil svaru.
- Snadný start oblouku.
- Vysoká proudová hustota a velký rozsah proudu.
- Malý nebo žádný rozstřik a nízká pórovitost.
- Poměrně malá výsledná TOO.
- Snadná mechanizace a robotizace.



Obr. 8 Schéma svařování metodou MAG [14].



Obr. 9 Svařovací systém pro metody MAG a MCAW [13].

Metoda FCAW/MCAW je co se týče zařízení a práce s ním se tato metoda příliš neliší. Svařovací proud se pohybuje v hodnotách do 500 A, napětí pak v rozmezí 25 až 35 V. Hlavní rozdíl je v použité elektrodě, která je koncipovaná jako kovový drát plněný tavidlem. Odtavováním tohoto tavidla poté vzniká struska, která funguje jako další ochrana svaru při jeho chladnutí. Svařování také probíhá s ochranným plynem, je zde ovšem možnost použití speciálních drátů MOG, kde ochranná atmosféra vzniká pomocí rozkladu přísad v náplni. Další dělení této metody pak určuje samotná náplň drátu. Dráty plněné rutilovou či bazickou náplní řadíme do metody 136, kdežto dráty plněné kovovým práškem řadíme do metody 138. [15; 16]

Hlavní výhody metody FCAW/MCAW jsou [5; 17]:

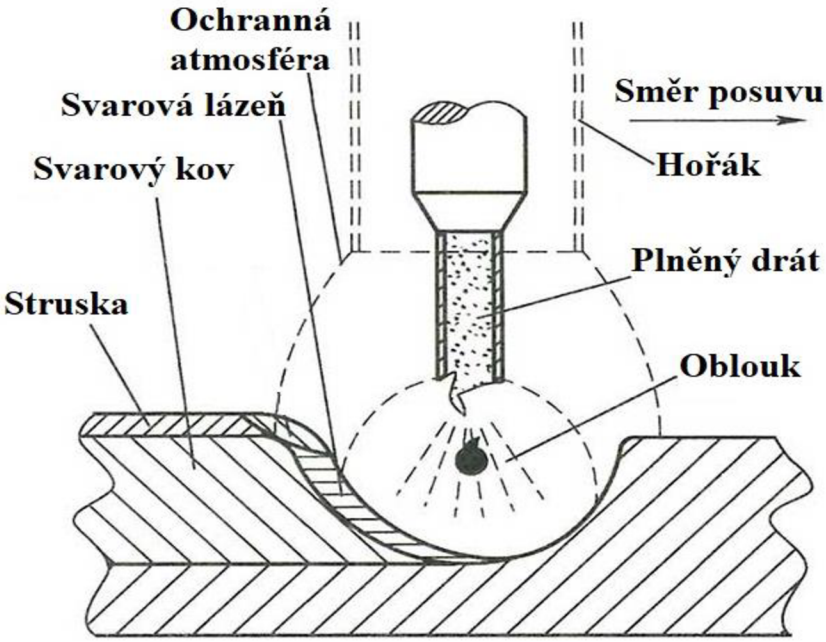
- Legování a mikrolegování svaru bez propalu,
- dobré mechanické vlastnosti svaru,

- v případě FCAW ochrana svaru pomocí strusky,
- malá náchylnost na tvorbu trhlin,
- kapkový a sprchový přenos bez rozstřiku,
- snížení nebezpečí vzniku studených spojů.

Základní dělení plněných drátů je dle jejich náplní, které ovlivňují reakce probíhající mezi struskou a ZM a tak i výsledné vlastnosti spoje.[5]:

- Rutilové - struska pomáhá formovat svar a zvyšuje rychlost svařování.
- Bazické - struska má dobré rafinační účinky.
- Kovoé - netvoří strusku, ale obsahuje prvky stabilizující hoření oblouku.

Vzhledem k použití, tvaru vzorku a výhodám jednotlivých metod, bylo rozhodnuto pro experiment využít jak metodu MAG (135) tak MCAW (138).



Obr. 10 Schéma svařování metodou MCAW/FCAW [16].

Obr. 11 Plněný drát pro MCAW [18].

Obr. 12 Plný drát pro MIG/MAG [19].

2 ROBOTIZACE A TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ

Svařovací roboty zajišťují svařování s vysokou rychlostí i přesností a jsou tak nedílnou součástí výrobních provozů mnoha odvětví jako jsou například automotive, elektronika, letectví či kosmonautika. Hlavní součástí, která odlišuje robotické svařování od manuálního je samotné rameno, které zajišťuje správné polohování hořáku vůči dílci. Robotická ramena jsou povětšinou šestiosá a tím zajišťují dostatečný rozsah pohybu pro většinu aplikací a to i s poměrně složitými drahami svařování.[6; 20]

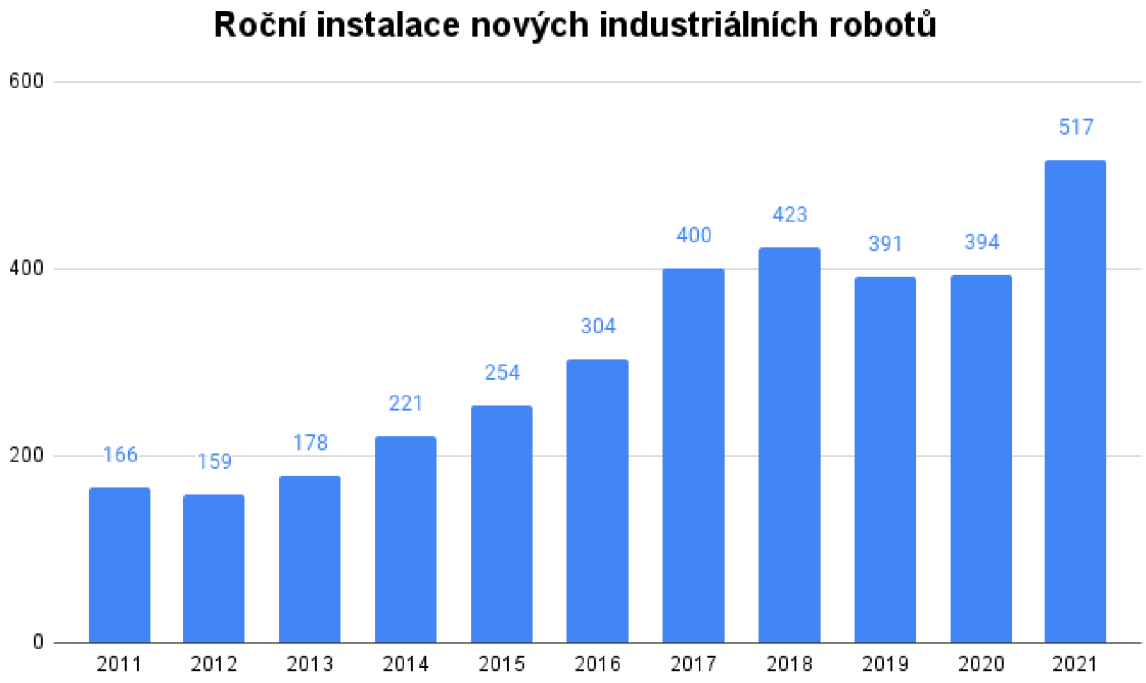
Obr. 13 Druhy ramen svařovacích robotů [6].

Další důležitou součástí je pak hořák, jehož součástí je také typicky přívod ochranného plynu a podavač drátu, který zajišťuje přísun přídavného materiálu do oblasti svaru. Svařovací roboty jsou často vybaveny kamerovým systémem či sensory, které jim pomáhají s orientací v prostoru, zejména pak při polohování hořáku vůči svaru. Mohou však být vybaveny i dalšími technologiemi jako je termokamera pro měření teploty svaru což může být důležité při dodržování předepsaných teplotních hodnot jako je hodnota interpass při kladení více svarových housenek.[2; 5; 21]

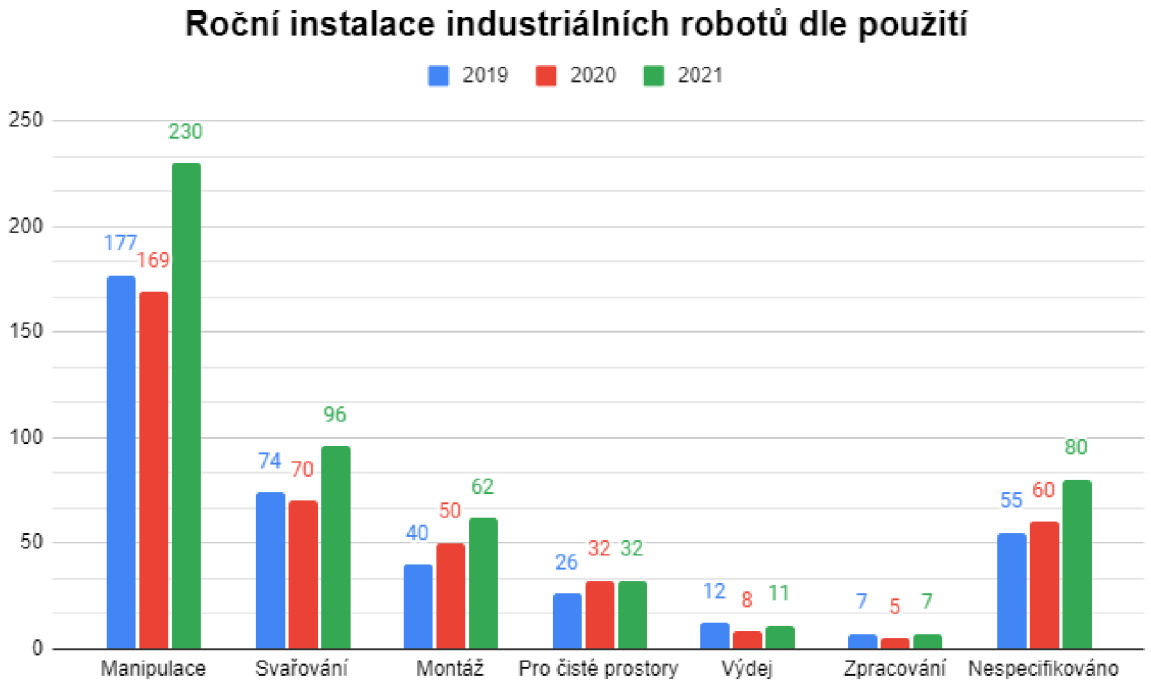
Obr. 14 Termokamera Gobi+ 640 pro měření teploty při svařování [21].

Hlavní výhodou robotických svařovacích systémů je jejich schopnost provádět opakující se úkony s vysokou přesností a stálostí. Díky tomu jsme schopni, při správném nastavení, snížit výskyt svarových defektů se současným zvýšením rychlosti a tím i produktivity

svařování. Robotické svařování se tak stále více stává nedílnou součástí sériové výroby velkých ale i menších firem. Jak můžeme vidět na následujících grafech vydaných Mezinárodní Federací Robotiky v roce 2022, zavádění nových robotických systémů je celosvětově rostoucí trend. Obrázek č. 15 ukazuje zavádění nových robotů do výroby v industriálním segmentu. Obrázek č. 16 pak ukazuje účel těchto robotů v industriálním segmentu. Vidíme tak, že svařování tvoří podstatnou část robotizace v industriálním segmentu.[2; 5; 22]



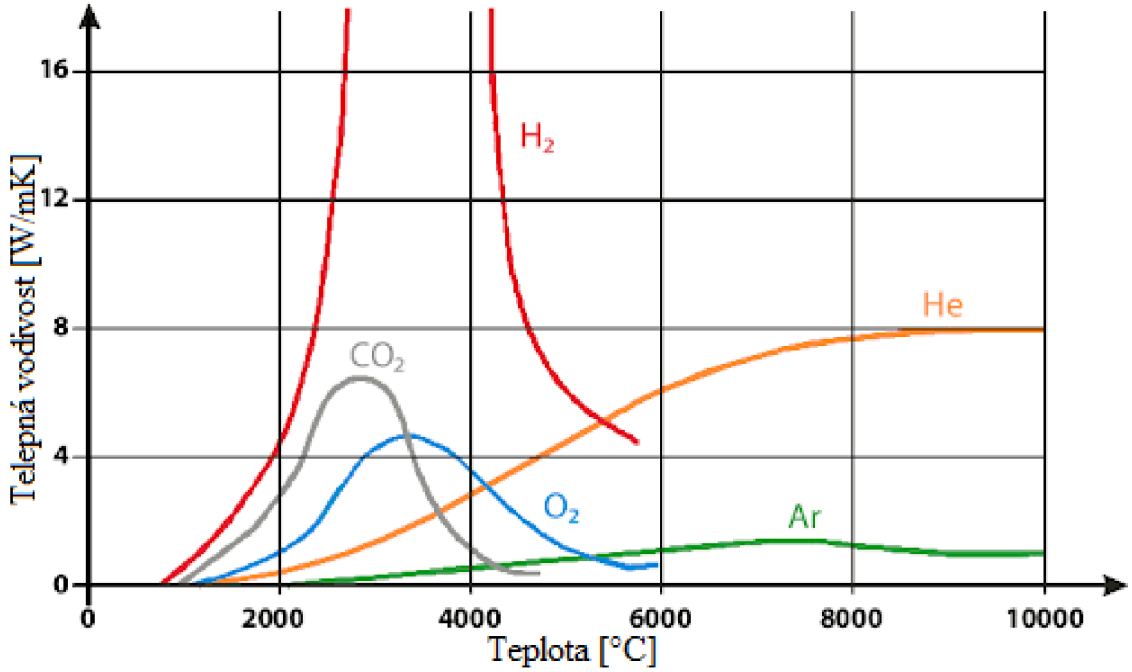
Obr. 15 Graf celosvětového zavádění nových robotů do výroby v industriálním segmentu [22].



Obr. 16 Graf využití robotů v různých částech industriálního segmentu mezi lety 2019-2021 [22].

Nejdůležitější rolí ochranných plynů je ve svařovacím procesu ochrana svaru před vzdušným kyslíkem a dusíkem. Podstatnými fyzikálními vlastnostmi těchto plynů je pak schopnost ionizace a tepelná vodivost. Hlavním specifikem metody MAG je pak aktivní plyn, který vstupuje do svařovacího procesu chemickými reakcemi se svarovou lázní. Aktivní plyny, konkrétně CO_2 a O_2, přidáváme především k Ar pro zlepšení technologických a metalurgických vlastností spoje, ale také pro zvýšení stability oblouku. Můžeme ovšem použít i čistý CO2. Přidáním těchto aktivních plynů do inertního zvýšíme oxidační schopnost ochranné atmosféry, což nám v důsledku způsobuje větší propal legujících prvků. Z tohoto důvodu je proto žádoucí použít přídavný materiál obsahující zvýšené množství prvků s dezoxidačními vlastnostmi, které pomocí chemických reakcí snižují obsah volného kyslíku ve svarové lázni a tím i propal legur. Nejčastěji používané dezoxidační prvky jsou pak mangan, křemík, hliník či titan.[5; 23; 24; 25]

Dalším specifikem ochranných plynů, kterou je třeba zohlednit je jejich tepelná vodivost. Platí zde přímá úměra mezi vodivostí a ionizačním potenciálem ochranného plynu. V důsledku to znamená, že plyny s nízkou tepelnou vodivostí se vyznačují snadnějším zapálením oblouku a jeho vyšší stabilitou, ale nedovolují přenos vysokého svařovacího výkonu. Naopak plyny s vysokou vodivostí jako například hélium snižují stabilitu oblouku, ale zajistí vnesení menšího tepla do svaru při současném přenesení vyššího svařovacího výkonu. Díky tomu tak můžeme svařovat větší rychlostí.[5; 24; 25]



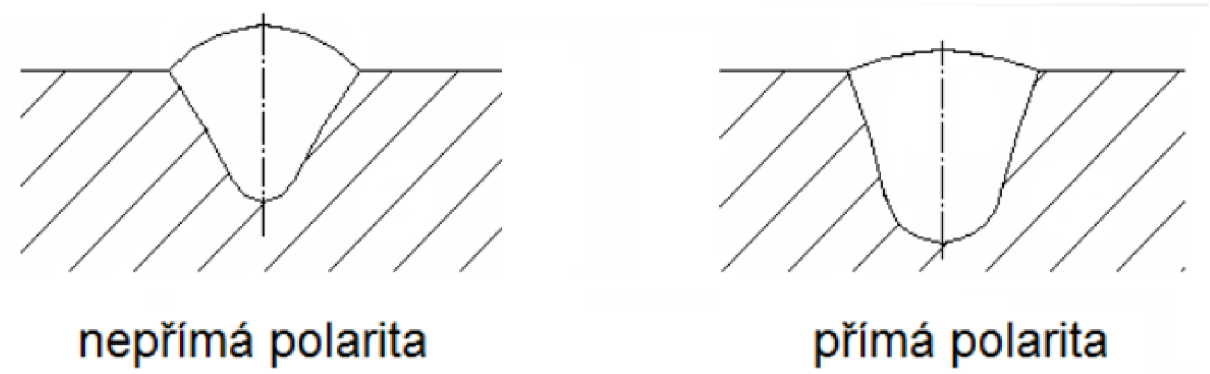
Obr. 17 Tepelná vodivost ochranných plynů v závislosti na teplotě [24].

2.1.1 Přenos kovu v oblouku

Pro správnou definici funkce svařovacího oblouku je nutné vysvětlit pojem polarita, což je způsob zapojení proudu do svařovacího obvodu, který však mění vlastnosti svařování. Používáme dva typy zapojení obvodu, takzvanou přímou a nepřímou polaritu. Při zapojení na přímou polaritu zapojíme elektrodu jako katodu. Toto zapojení nám v důsledku způsobí menší hloubku závaru, naopak šířka závaru a převýšení je zde vyšší než u nepřímé polarity. Při zapojení na nepřímou polaritu zapojíme elektrodu jako anodu a dostaneme opačný výsledek, tedy větší hloubku závaru s menší šířkou a převýšením. Výsledný rozdíl v závaru můžeme vidět na obrázku č. 18.[2; 23]

Specifikem tavného svařování s odtavující se elektrodou je přenos kovu obloukem. Námi využívané zařízení TransPuls Synergic 3200 CMT umožňuje použití čtyř typů přenosu vhodných pro naši aplikaci.[26]:

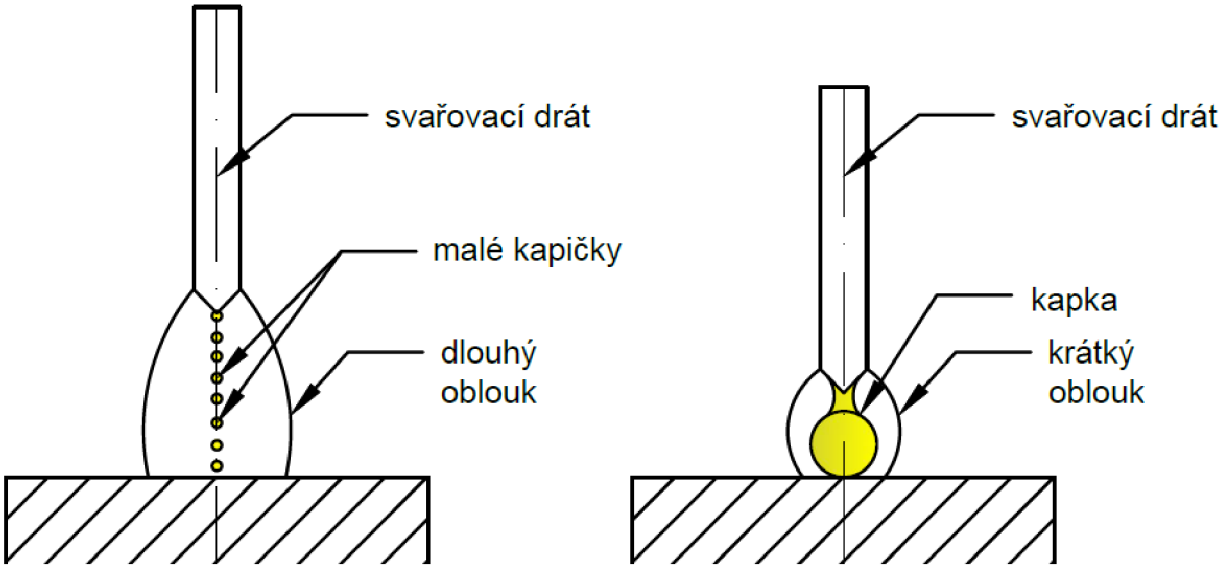
- krátkého oblouku se zkratovým přenosem,
- dlouhého oblouku s bez zkratovým sprchovým přenosem,
- impulsního bez zkratového přenosu.
- Cold Metal Transfer



Obr. 18 Rozdíl závaru pro různé polarity [12].

Při zkratovém přenosu kovu dochází k periodickému přerušování oblouku zkratem, při němž se odděluje část roztaveného kovu z konce elektrody s frekvencí 20 až 200 Hz. Vlivem povrchového napětí se kapka rovnoměrně rozptýlí do svarové lázně. Hlavní použití je pro tenké plechy, kořenové vrstvy a pro překlenutí širších mezer. Pracuje s rozsahy proudů 60 až 180 A. Tento přenos je použitelný pro všechny ochranné plyny.[2; 5; 12; 23]

Sprchový přenos je uskutečněn při hodnotách proudu 200 až 500 A. Při takto vysokých proudech se nestačí vytvořit větší kapky roztaveného kovu, protože jsou s vysokou frekvencí 150 až 350 Hz strhávány z elektrody směrem k povrchu za působení elektromagnetických sil ve formě menších kapiček. Tvoří tedy jakousi sprchu. Výhodami tohoto přenosu je pak nízký až žádný rozstřik a poměrně hluboký závar. Pro tento typ přenosu můžeme použít ochranné plny obsahující O_2, Ar či směsi $Ar + CO_2$ kde však musíme minimální podíl argonu 80 %, vzhledem k nevhodným vlastnostem CO_2.[2; 5; 12; 23]

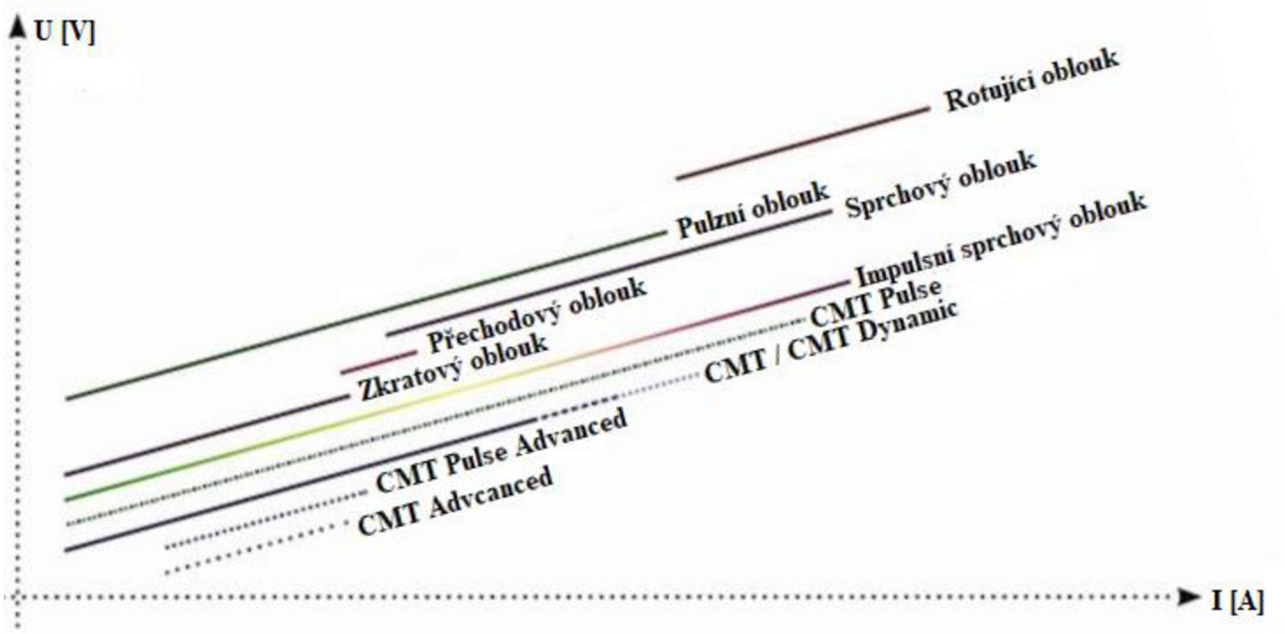


a) Sprchový přenos b) zkratový přenos

obr. 19 Přenos kovu v oblouku.

Impulsní přenos je modifikací sprchového přenosu. Tento přenos má pravidelnou frekvenci amplitudy proudu, která je řízena pomocí elektroniky a pohybuje se v rozmezí 25-500 Hz. Základní proud je velice nízký 20 až 50 A a má za úkol pouze udržet ionizaci oblouku. Impulsní proud v jeho amplitudě naopak zajišťuje odtavení kapky kovu z elektrody. Pomocí závislosti frekvence těchto impulzů na proudu pak zajišťujeme velikost samotné odtavené kapky. Tento přenos má značné výhody oproti sprchovému přenosu a to.[2; 5; 12]:

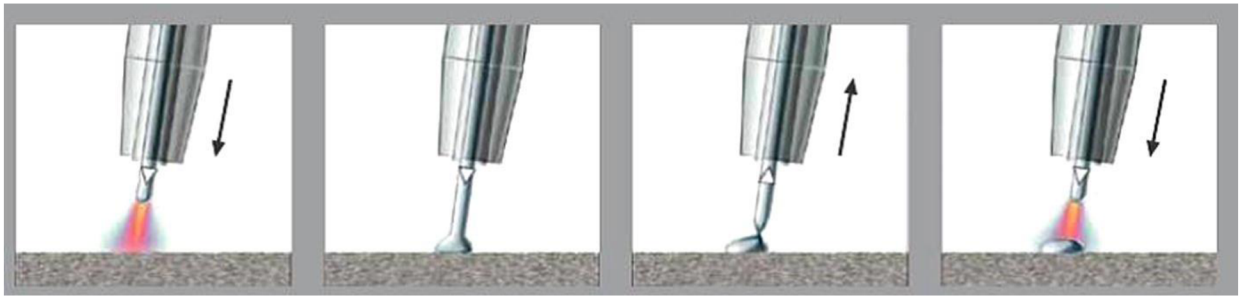
- Menší vnesené teplo a tím i menší deformační účinek.
- Vysoký impulsní proud - možnost použití širších, levnějších drátů.
- Široké možnosti využití díky úpravě svařovacích parametrů.
- Svařování polohových svarů.



Obr. 20 Rozsah svařovacích parametrů pro různé metody přenosu kovu v oblouku [23].

Speciální technologie přenosu kovu CMT byla vyvinuta společností Fronius v roce 2004 na základně MIG/MAG svařování. Dosahuje stabilního procesu zkratového přenosu kovu bez rozstřiku pomocí přesné kontroly svařovacích parametrů a posuvu drátu. Zároveň je výhodný z hlediska nízkoteplotního přenosu, díky kterému se dosahuje lepších parametrů materiálové charakteristiky, reziduálních napětí ve svaru a geometrie svaru. Hlavním principem přenosu CMT je přesná kontrola proudu ve fázích se souběžným posuvem drátu, docílíme tak přenosu kapky kovu za poměrně nízkých teplot bez vlivu elektromagnetických sil na kapku.[23; 27]

Proces přenosu kovu můžeme rozdělit do tří částí cyklu, ve kterých probíhá změna proudové charakteristiky. V první fázi je vytvořen oblouk mezi elektrodou a svařencem působením vysokého proudu. Tento oblouk nataví elektrodu, která se současně přibližuje k lázni. Druhá fáze se vyznačuje nízkým proudem, který zabrání odtržení kapky kovu z konce elektrody při přibližování k lázni. Třetí fáze začíná ve chvíli, kdy se elektroda dotýká lázně. V této fázi dochází ke zkratu, zhasne oblouk a napětí se sníží téměř na nulu. Zároveň dochází ke zpětnému pohybu drátu, čímž dochází k oddělení kapky kovu z elektrody. V této fázi se také nacházíme v oblasti velmi nízkého proudu, což v důsledku způsobí, že oddělení proběhne bez rozstřiku. Délka jednoho cyklu však není předem dána a mění se na základě charakteristik oblouku, průměrně však dosahujeme posuvu drátu s frekvencí 70 Hz. Standardní CMT proces probíhá při zapojení na přímou polaritu.[23; 27; 28]

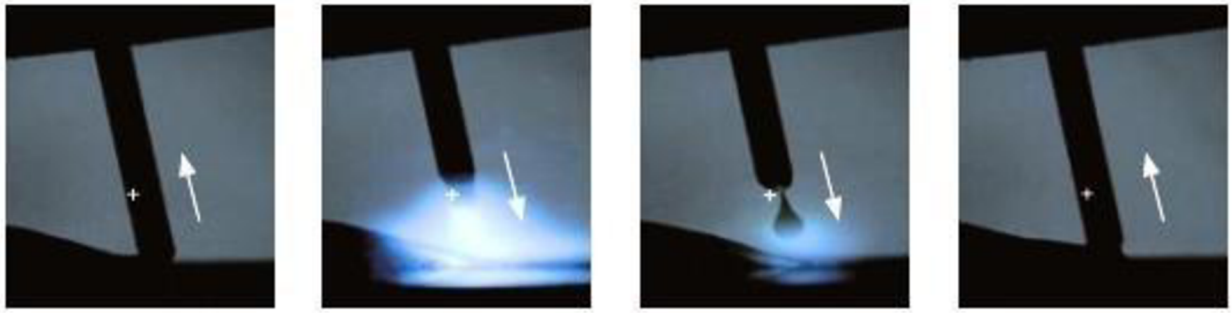


Obr. 21 Přenos kapky kovu pomocí CMT [23].

CMT přenos je v dnešní době ve fázi stálého vývoje a experimentů. Výsledkem tohoto vývoje jsou v současné době další modifikace CMT přenosu. Tyto modifikace upravují jak vstupní parametry, tak chování samotného CMT procesu a jsou schopny zvýšit produktivitu či kvalitu spoje oproti klasickému CMT přenosu.[23; 27; 28] Tyto modifikace pak jsou [23; 27; 29]:

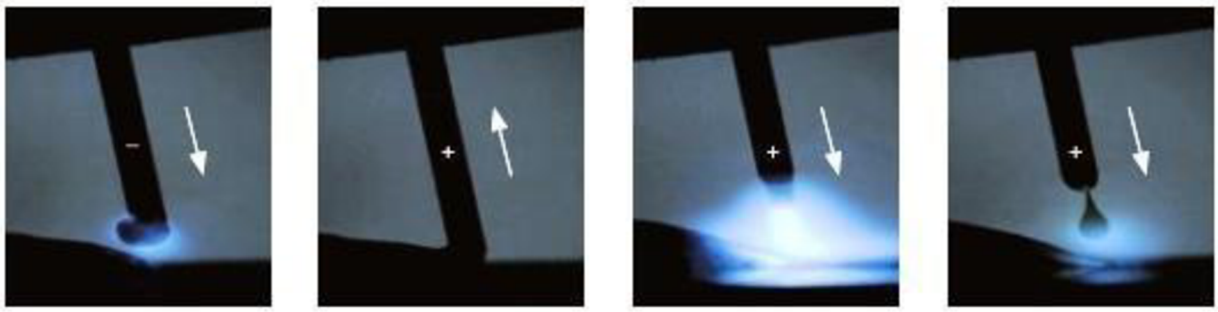
- CMT Pulse
- CMT Advanced
- CMT Pulse Advanced
- CMT Dynamic

První modifikací je CMT Pulse, který kombinuje CMT přenos s pulzním cyklem. To ovšem ve výsledku znamená více vneseného tepla. Výhodou tohoto režimu je, že v každém cyklu dochází k oddělení další kapky kovu, což zvýší přenos materiálu do svarové lázně a tak i rychlost svařování. Fáze pulzního přenosu následuje po dokončení CMT fáze. Kdy po zpětném pohybu drátu dochází k zapálení pulzního oblouku se současným posuvem drátu směrem k lázni se současným odtržením kapky kovu. Po oddělení oblouk zhasne a znovu pokračuje CMT cyklus.[23; 27; 29]



Obr. 22 Cyklus CMT Pulse [23].

Dalším, poměrně novým typem je CMT Advanced, který na rozdíl od standardního CMT a CMT Pulse používá střídavý proud. Díky použití střídavého proudu dosahujeme ještě menšího vneseného tepla než při CMT. K obrácení polarity dochází ve fázi zkratu, což kromě nižšího vneseného tepla zvýší i přenos kovu.[23; 27; 28; 29]



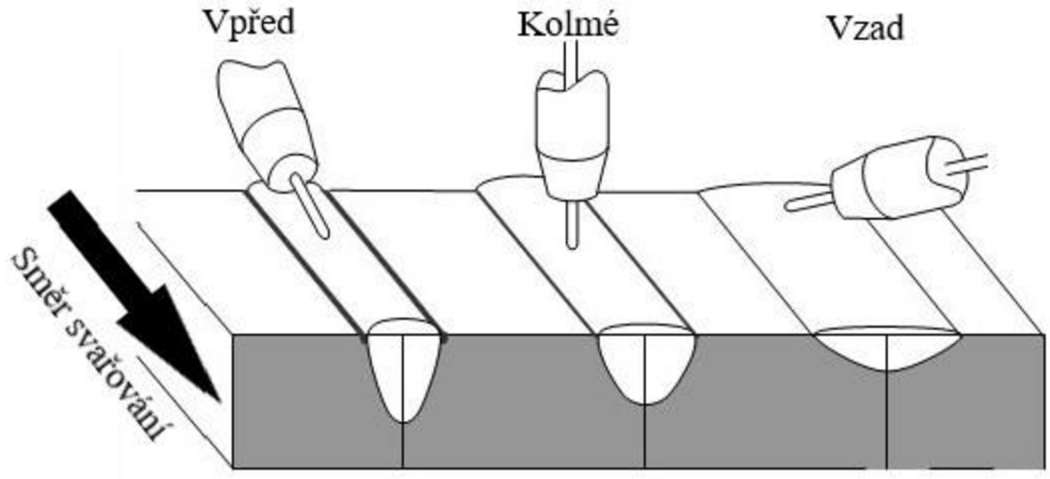
Obr. 23 Cyklus CMT Advanced [23].

CMT Pulse Advanced kombinuje přednosti a specifika obou výše uvedených metod. Cyklus CMT je obohacen o změnu polarity ve zkratové fázi a po jejím dokončení následuje pulzní fáze stejně jako u CMT Pulse, kde je polarita opět přímá.[23; 27; 29]

Nejnovějším typem CMT přenosu je CMT Dynamic. Hlavním specifikem tohoto typu přenosu je zvýšení rychlosti pohybu drátu až k 130 Hz, což v důsledku umožní vyšší průvar základního materiálu a současně možnost zvýšení rychlosti svařování.[23; 27; 29]

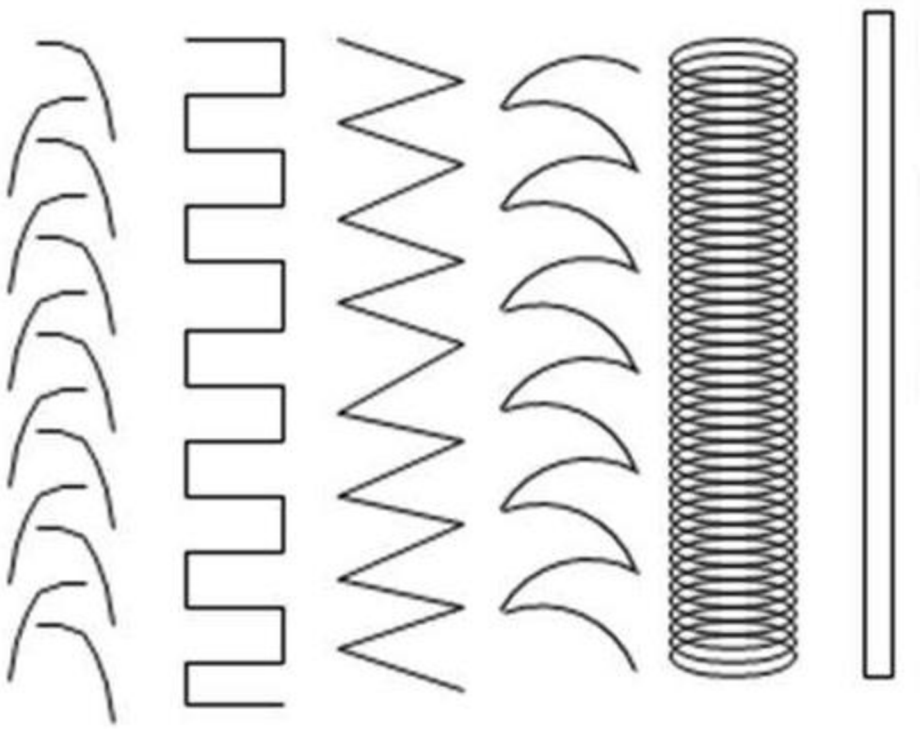
Pro svařování je možné použití tří základních technik svařování, kterými v důsledku ovlivníme geometrické vlastnosti svaru. Ovlivnění geometrie probíhá pomocí usměrnění tepelného, ale i mechanického působení na svár pomocí naklonění směru hořáku. Techniky mají své výhody a nevýhody a je tedy potřeba zvážit jejich použití pro danou aplikaci.[2; 12]:

- Svařování vpřed - Při této technice je hořák nakloněn dopředu. Tím dosahujeme působení na větší plochu základního materiálu a v důsledku tak dosahujeme širší svarové lázně, menšího průvaru a menšího převýšení svaru.
- Svařování vzad - Při svařování vzad dochází ke vtlačování roztaveného kovu do svarové lázně, tím pádem dochází ke zvýšení průvaru a převýšení a naopak ke snížení šířky svarové lázně.
- Kolmé svařování - Představuje kombinaci obou výše uvedených technik a poskytuje tak průměrné hodnoty všech parametrů převýšení, šířky i průvaru.



Obr. 24 Dopad techniky svařování na geometrii svaru [30].

Rozkyv je jedním z důležitých specifik robotického svařování, neboť jsme schopni precizně kontrolovat jeho dráhu. Vzhledem k tomu, že hloubka závaru je určena rychlostí posuvu a hodnotou proudu, pokud tedy nemůžeme měnit polaritu či typ přenosu kovu, je rozkyv hořáku spolu s vybranou technikou svařování jediným způsobem jak housenku rozšířit a zploštit. Rozkyv nám ovšem poskytuje i další výhody, jako je lepší distribuce tepla a svarového kovu ve svaru. Při výběru druhu rozkyvu je nutné zohlednit více faktorů, jako například tloušťku svařovaného materiálu, druh svařování, přípravu svarových ploch atd. Hlavním pravidlem pro užití rozkyvu je, že by jeho šířka neměla přesáhnout čtyřnásobek průměru drátu, pokud není odborným dozorem stanoveno jinak. Běžně využívané typy rozkyvu můžeme vidět na obrázku č. 25.[5; 13; 31]



Obr. 25 Standardně využívané typy rozkyvu [31].

2.1.2 Materiály a svařitelnost

Svařovaným materiálem je ocel S355J2N. Jedná se o nelegovanou jakostní konstrukční ocel, jemnozrnnou obecně udávanou s minimální mezí kluzu 355 MPa, mezí pevnosti 530 MPa, normalizačně žíhanou či válcovanou a jakostí J2. Jakost J2 označuje hodnotu nárazové práce 27 J při zkušební teplotě -20 °C. Ocel je vhodná ke svařování všemi obvykle používanými způsoby svařování. Musíme, však dbát na zvyšující se obsah uhlíku s tloušťkou což může vést k výskytu trhlin za studena.[8; 32]

Tab. 1 Normy značení oceli S355J2 [33].

Značení	S355J2
Číselné značení	1.0577
Dle normy ČSN	11 503
Dle normy EN 10025	S355J2G4
Dle normy DIN	St 52-3 N

Tab. 2 Obecné chemické složení oceli S355J2N [8].

C [%] (pro t < 16mm)	Mn [%]	Si [%]	Cr [%]	Mo [%]	V [%]
Max 0,23	Max 1,7	Max 0,6	-	-	-
Ni [%]	Cu [%]	P [%]	S [%]	Ti [%]	Al [%]
-	Max 0,6	Max 0,035	Max 0,035	-	-

Tepelný příkon svařování pomáhá určit chování materiálu při svařování, protože ovlivňuje teplotní cyklus a tím i nebezpečí zakalení či vzniku trhlin. Ovlivňuje výsledné vlastnosti TOO, jako například pokles pevnosti v pásmu částečné překrystalizace či míru difuze vodíku ve svaru. Je tedy důležité jej vypočítat. Při svařování jemnozrnných ocelí je vhodné, aby vnesené teplo nepřesáhlo hodnotu 10 kJ·cm^{-1}. [1; 34; 35; 36; 37] Tepelný příkon je nutno vypočítat podle vztahu který definuje norma ČSN EN 1011-1 pro obloukové metody jako [34; 36; 38]:

$$Q = k \cdot \frac{U \cdot I}{v \cdot 1000} \tag{2.1}$$

kde: Q je množství tepla přivedeného do svaru na jednotku délky [kJ·mm^{-1}]
k je koeficient tepelné účinnosti použité metody svařování [-]
U je napětí při svařování [V]
I je intenzita svařovacího proudu [A]
v je rychlost svařování [mm· s^{-1}]

Tab. 3 Určení koeficientu tepelné účinnosti dle použité metody svařování [36].

Číslo metody	Svařovací metoda	k
12	Svařování pod tavidlem. (SAW)	1,0
111	Ruční obloukové svařování obalenou elektrodou. (MMA)	0,8
131	Obloukové svařování tavící se elektrodou v inertním plynu. (MIG)	0,8
135	Obloukové svařování tavící se elektrodou v aktivním plynu. (MAG)	0,8
138	Obloukové svařování plněnou elektrodou s kovovým práškem v aktivním plynu. (MCAW)	0,8
136	Obloukové svařování tavidlem plněnou elektrodou v aktivním plynu. (FCAW)	0,8
137	Obloukové svařování tavidlem plněnou elektrodou v inertním plynu.	0,8
141	Obloukové svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu. (WIG/TIG)	0,6

Základním kritériem, podle kterého posuzujeme vhodnost ocelí ke svařování, je svařitelnost. Je to technologická vlastnost materiálu, která vyjadřuje jeho vhodnost pro tvorbu svařovaných spojů předepsané jakosti a konstrukční spolehlivosti. Faktory ovlivňující svařitelnost jsou pak především [39; 40; 41]:

- Chemické složení materiálu,
- technologie svařování,
- svařovací proces a prostředí,
- způsob namáhání svaru.

Jedním z hlavních parametrů, které je třeba zohlednit při svařování a určení svařitelnosti je chemické složení oceli, které vyjadřujeme pomocí uhlíkového ekvivalentu. Ten určuje dopad chemického složení na kalitelnost oceli. Důvodem je přímá úměra mezi kalitelností oceli a nebezpečím vzniku křehkých zakalených struktur jako je spodní bainit a martenzit, které zvyšují riziko tvorby trhlin ve spoji a TOO a to i při nižších rychlostech ochlazování, což značně komplikuje svařovací proces. Díky tomuto faktu užíváme uhlíkový ekvivalent

jako ukazatel svařitelnosti při zohlednění chemického složení. Platí tedy, že čím vyšší je hodnota uhlíkového ekvivalentu, tím hůře je materiál svařitelný. Pro různé skupiny ocelí doporučuje norma ČSN EN 1011-2 různé vzorce pro výpočet v závislosti na chemickém složení oceli. Pro jemnozrnnou ocel udává norma dvě metody výpočtu CE a CET. Vzhledem k hodnotám použitých v rovnicích pro výpočet těchto parametrů můžeme konstatovat, že parametr CE dává větší váhu obsahu legujících prvků, kdežto parametr CET více zohledňuje obsažený uhlík.[34; 35; 38; 39; 41] V našem případě je však nejvhodnější použití parametru CET vzhledem k tomu že bude použit při výpočtech teplot předehřevu a interpass.

Stanovení parametru CET dle ČSN EN 1011-2 [38]

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \ [\%] \tag{2.2}$$

Stanovení parametru CE dle ČSN EN 1011-2 [38]

$$CET = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40} \ [\%] \tag{2.3}$$

Tab. 4 Omezení pro výpočet uhlíkového ekvivalentu [38].

Omezení pro výpočet	CET	CE
C	0,05 - 0,25 %	0,05 - 0,25 %
Si	Max 0,8 %	Max 0,8 %
Mn	0,5 – 1,9 %	Max 1,7 %
Cr	Max 1,5 %	Max 0,9 %
Cu	Max 0,7 %	Max 1 %
Ni	Max 2,5 %	Max 2,5 %
Mo	Max 0,75 %	Max 0,75 %
V	Max 0,18 %	Max 0,2 %
Ti	Max 0,12 %	-
B	Max 0,005 %	-
Nb	Max 0,06 %	-

Sklon k zakalení, který uhlíkový ekvivalent vyjadřuje, ovlivňuje zejména náchylnost svarových spojů ke vzniku trhlin za studena. Kromě chemického složení materiálu zde největší roli hraje obsah vodíku vneseného do svaru při svařování. Hlavním zdrojem vneseného vodíku je vlhkost z obalů elektrod, může se ale projevit i vzdušná vlhkost, mastnoty, nebo organické zbytky jako například pot. Z tohoto důvodu probíhá před svařováním sušení elektrod. Problémem je značný rozdíl rozpustnosti vodíku v kovu při různých teplotách, kde při normálních pokojových teplotách dosahuje rozpustnost cca 5-8 ml·100 g, avšak při teplotě 1800 °C dosahuje až 33 ml·100 g. Díky této vlastnosti pak při chladnutí svaru prudce klesá rozpustnost vodíku, což způsobí, že vodík, který přesáhne mez rozpustnosti v mřížce rekombinuje na molekulární vodík. Při této rekombinaci zvětšuje svůj objem a vznikají póry. Objemové změny při rekombinaci poté působí velkým místním napětím a tlakem a způsobují vznik studených trhlin.[35; 42]

Předehřev svarového spoje je jednou z hlavních pomůcek při omezení rizika vzniku studených trhlin a to pomocí usnadnění difuze vodíku. To konkrétně tak, že prodlouží čas, při kterém může vodík difundovat ze spoje, ale také tím že napomáhá vytvoření struktur, které jsou příznivější pro tuto difuzi. Předehřev má také pozitivní vliv na svar jako takový. Snížením rychlosti ochlazování zabraňuje zakalení a je díky němu snížen teplotní gradient,

čímž se snižují zbytková napětí ve svaru. Dosažení této teploty je kontrolováno v předepsané vzdálenosti od svaru v libovolném směru a její určení probíhá pomocí upravených ARA diagramů či výpočtem z rovnic podléhajících normě. Metoda výpočtu funguje na principu empiricky stanovených rovnic, ze kterých získáme údaje o jednotlivých vstupních vlivech. Zde je potřeba si tyto vstupní vlivy stanovit, výslednou teplotu předehřevu poté určíme jako součet dílčích vlivů [35; 42]:

- Tepelný příkon,
- stupeň obsahu vodíku,
- svařovaná tloušťka,
- chemické složení.

Výpočet vlivu chemického složení [38]:

$$T_{pCET} = 750 \cdot CET - 150 \tag{2.4}$$

kde: CET je uhlíkový ekvivalent pro daný typ oceli [%]

Vliv tloušťky [21]:

$$T_{pd} = 160 \cdot \tanh\left(\frac{d}{35}\right) - 110 \tag{2.5}$$

kde: d je tloušťka svařovaného materiálu [mm]

Výpočet vlivu obsahu difúzního vodíku ve svaru [38]:

$$T_{pHD} = 62 \cdot H_D^{0,35} - 100 \tag{2.6}$$

kde: H_D je obsah difuzního vodíku ve svarovém kovu [ml/100g]

Výpočet vlivu tepelného příkonu [38]:

$$T_{pQ} = (53 \cdot CET - 32) \cdot Q - 53 \cdot CET + 32 \tag{2.7}$$

kde: Q je tepelný příkon dle (21) [kJ · mm^{-1}]

Výpočet teploty předehřevu [38]:

$$T_p = T_{pCET} + T_{pd} + T_{pHD} + T_{pQ} \tag{2.8}$$

Výpočet teploty předehřevu v rozepsaném stavu [21]:

$$T_p = 697 \cdot CET + 160 \cdot \tanh\left(\frac{d}{35}\right) + H_D^{0,35} + (53 \cdot CET - 32) \cdot Q - 328 \tag{2.9}$$

Pro tyto rovnice však také platí určitá omezení pro jejich použití. Prvním takovým omezením je maximální hodnota meze kluzu Re 1000 MPa. Další omezení se vztahují k veličinám užitým v samotném výpočtu a to [38]:

CET = 0.2 až 0.5 [%]
d = 10 až 90 [mm]
H_D= 1 až 20 [ml·100g^{-1}]
Q = 0.5 až 4 [kJ·mm^{-1}]

Dalším důležitým teplotním parametrem ve svařovacím procesu je teplota interpass - Ti. Interpass hraje roli při aplikaci vícevrstvého svaru a uvádí se jako maximální povolená teplota před nanesením nové svarové housenky. Maximální hodnotu předepisujeme pro správné

dosažení specifické mikrostruktury materiálu, kdežto minimální, která se většinou rovná teplotě předehřevu pro správnou difuzi vodíku ze svaru.[37]

2.1.3 Pevnostní kontrola svaru

Před provedením samotného experimentu je žádoucí provést základní pevnostní kontrolu svaru dle daného zatížení a podmínek, kterým bude svařená součást následně vystavena. Námi řešený svar bude zatížen zejména v tahu, a tomu podléhají také výpočtové vzorce.

Porovnání působícího a dovoleného napětí [39]:

$$\sigma_{SV} \leq \sigma_D \tag{2.10}$$

kde: σ_D je dovolené napětí [MPa]
σ_{SV} je působící napětí [MPa]

Výpočet působícího napětí [39]:

$$\sigma_{SV} = \sigma_{\perp} = \frac{F_N}{A_W} = \frac{4 \cdot F_N}{\pi \cdot (D^2 - d^2)} \tag{2.11}$$

kde: F_N je působící normálná síla [N]
D je vnější průměr svařovaného dílce [mm]
d je vnitřní průměr svařovaného dílce [mm]

Výpočet dovoleného napětí [39]:

$$\sigma_D = \alpha \cdot \frac{R_e}{k} \tag{2.12}$$

kde: R_e je mez kluzu materálu [MPa]
k je koeficient bezpečnosti [-]
α je převodní součinitel typu svařování [-]

Tab. 5 Výběr převodního součinitele [39].

Druh svaru	Druh hlavního namáhání	Převodní součinitel α		
		Ruční	Odporové	Automatizované
Tupý	Tlak	1	1	1
Tupý	Tah	0,85	0,9	1
Tupý	Ohyb	0,9	1	1
Tupý	Smyk	0,7	0,7	0,7

2.1.4 Zkoušení svaru

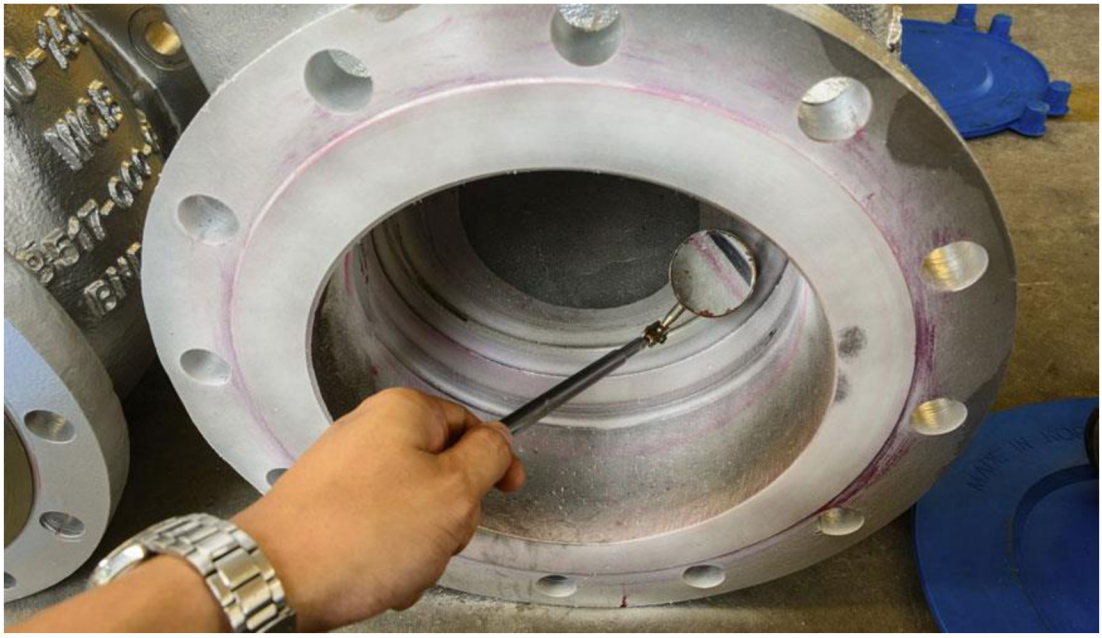
Po provedení svařování je nutné vyhodnotit, zdali kvalita a provedení svaru dosahuje požadovaných hodnot. Za tímto účelem provádíme různé zkoušky svaru pro odhalení chyb a zhodnocení jejich přípustnosti. Přípustnost vad ovlivňují požadované stupně kvality určené dle ČSN EN ISO 5817 či ČSN EN ISO 10042.[34; 35; 43] Základní dělení zkoušek svarů je:

- nedestruktivní (NDT) - Při provedení zkoušky zde nedochází k porušení spoje. Tyto zkoušky jsou jedním ze základních kamenů kontroly kvality svařování ve většině provozů. Pomocí nedestruktivních metod většinou zjišťujeme povrchové 5, pouze při použití zkoušky ultrazvukem či radiografické pak zjistíme i vady vnitřní.[35; 43; 44]

- Vířivými proudy,
- magnetickým práškem,
- kapilární,
- radiografické,
- ultrazvukem,
- vizuální.

▪ destruktivní (DT - při provedení zkoušky dochází k porušení spoje. Pomocí těchto zkoušek se zaměřujeme spíše na mechanické vlastnosti spoje. Tento typ zkoušek vychází z předpokladu, že při dodržení stejných parametrů svařovacího procesu jsou vlastnosti a vady zkoušeného dílce shodné s dalšími. Tedy pokud bude zkoušený dílec vyhovující, můžeme konstatovat, že budou vyhovující i ostatní.[34; 35; 45]
  - Makroskopická,
  - mikroskopická,
  - tahem,
  - rázem v ohybu,
  - tvrdosti.

Vizuální zkouška je nejzákladnější, nejlevnější a tak i nejběžnější formou NDT. Lze ji provádět jak během, tak i po svařování. Jejím cílem je odhalení povrchových vad viditelných okem, ale také hodnocení různých parametrů svařování jako převýšení, velikost svaru, míra zápalu atd… Dá se použít samostatně nebo předchází ostatním metodám. I zde je třeba dodržet jistá pravidla kontroly, jako jsou maximální vzdálenost, úhel pohledu či nasvícení. Vizuální zkoušku můžeme dále dělit na přímou a nepřímou. Při přímé metodě nesmí být přerušená optická dráha mezi okem a pozorovaným svarem. Při nepřímé metodě se naopak počítá s přerušením optické dráhy. Je tedy použitelná pro místa kde není možné kontrolu provést pouhým okem a používají se tedy různé pomůcky umožňující kontrolu svaru, jako například endoskop či videokamera.[35; 44]

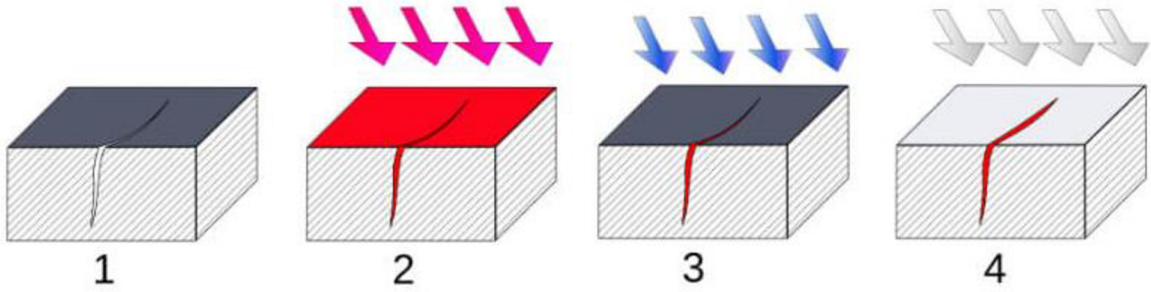


Obr. 26 Vizuální zkouška nepřímou metodou [46].

Kapilární zkouška, jinak také penetrační zkouška, je založena na využití principů nízkého povrchového napětí a následném vzlínání tekutiny penetrantu pomocí kapilárních sil. V průběhu zkoušky je nejprve povrch očištěn, aby se zabránilo zkreslení výsledků pomocí

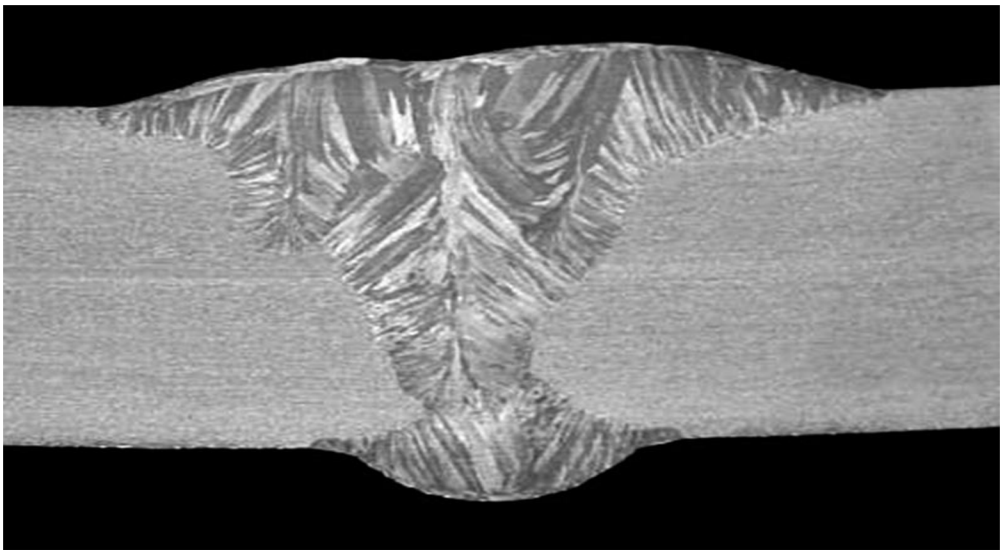
vnějších faktorů, jako jsou nečistoty či mastnoty. Poté je na povrch nanesen penetrant s nízkým povrchovým napětím, který postupně zateče do všech vad nacházejících se na povrchu součásti. Po určitém časovém úseku, který je závislý na použitém penetrantu, se penetrant odstraní z povrchu vzorku. Následuje nanesení vývojky, jejíž funkcí je napomoci vzlínání penetrantu z povrchových vad. Pomocí vzlínání se pak penetrant projeví na povrchu a ukazuje tak na povrchové vady, které můžeme následně zhodnotit.[35; 44; 47]

Kapilární zkoušku dělíme pomocí použitého penetrantu. Základní metodou je tzv. barevná indikace, kde penetrant obsahuje barvivo, nejčastěji červené, které můžeme následně pozorovat. Další metodou je metoda fluorescenční, kde penetrant obsahuje fluorescenční tekutinu, která se projeví po nasvícení povrchu pomocí UV záření. Posledním typem je pak metoda dvouúčelová, při které je použitá kombinace fluorescenční tekutiny a barviva. [35; 44; 47]



Obr. 27 Grafický průběh penetrační zkoušky [47].

Makroskopické hodnocení patří mezi destruktivní metody zkoušení a pro její hodnocení je tedy nutné svar narušit. Jejím cílem je kontrola struktury v řezu při zvětšení max. 30x. Dle způsobu narušení svaru dále můžeme dělit makroskopickou zkoušku na leptací a lomovou. V případě leptací zkoušky dojde k rozřezání svaru na vzorky, které jsou poté naleptány pro vyniknutí makrostruktury. Druhým typem je lomová zkouška, při které je vytvořen vrub přes který dojde k rozlomení vzorku. Následně se hodnotí vzhled lomových ploch. Při hodnocení makroskopickou zkouškou zohledňujeme hlavně tvar svaru, způsob kladení vrstev, odmíšení svarového kovu, tvar, šířku a charakter TOO.[34; 35; 45]



Obr. 28 Makroskopický výbrus tupého svaru [45].

2.2 Současný technologický postup

Jak můžeme vidět v tabulce č. 6, současný technologický postup počítá s poměrně velkým vedlejším i hlavním časem pro svařování víka. Pro naše účely bude podstatné dosáhnout snížení právě těchto časů při zachování kvality svaru. Vzhledem k současným parametrům svařování bude pro experiment použit stejný přídavný materiál i ochranný plyn pro robotizaci metody MAG. Vzhledem k tomu, že metoda MCAW funguje na podobném principu, jako metoda MAG bude zde také použit stejný ochranný plyn pro snížení nákladů firmy na případné zavedení této metody do výroby.

Tab. 6 Současný technologický postup.

Číslo operace	Vedlejší čas [min]	Hlavní čas [min]	Popis operace
010	16	35	Ustavit a nastehovat válec s víkem, nechat svařit a upravit, poté ustavit úchyt návarkem
020	0	0	Kontrola provedení
030	23	18	Předehřát dle WPS, svařit dle výkresu, očistit svary a okolí, vyznačit značku svářeče
040	10	5	Vyrovnat a upravit po svaření
050	0	0	Kontrola provedení a rozměrů
060	60	20	Upnout na prisma, frézovat
070	3	6	Odjehlit, vyčistit
080	0	0	Finální kontrola provedení

Tab. 7 Současné parametry svařování.

Metoda	MAG (135)				
Vrstva	Proud [A]	Napětí [V]	Rychlost svařování [mm/s]	Rychlost posuvu drátu [m/min]	Druh přenosu kovu v oblouku
Kořenová	240-250	22-23	2,5-2,9	8-8,5	Zkratový
Druhá	270-280	26-27	3,3-3,7	9-9,5	Sprchový
Krycí	250-260	24-25	3,1-3,5	8,5-9	Sprchový

Průměr drátu [mm]	Průtok plynu [l/min]	Ochranný plyn	Přídavný materiál
1,0	12-17	M21	G3Si1
Teplota předehřevu [°C]	**Teplota Interpass [°C]**	**Typ proudu a polarita**	**Poloha svařování**
Min. 150	Max. 220	DC [+]	PA

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Cílem experimentální části je robotizace svařování dílce, které v současné době probíhá ručně. Jedná se o výzkum proveditelnosti s následným sestavením WPS pro dané metody, které budou doporučeny firmě ke kvalifikaci, pokud budou svary vyhovující.

Obr. 29 části hydraulického válce.

Tab. 8 Mechanická analýza vzorku oceli S355J2N

Pevnost v tahu R_m [MPa]	Mez kluzu R_e [MPa]	Tažnost A [%]
581	402	28

Tab. 9 Chemická analýza vzorku trubky z oceli S355J2N

C [%]	Mn [%]	Si [%]	Cr [%]	Mo [%]	V [%]
0,17	1,14	0,17	0,13	0,04	-
Ni [%]	Cu [%]	P [%]	S [%]	Ti [%]	Al [%]
0,13	-	0,014	0,018	-	0,02

Tab. 10 Chemická analýza vzorku víka z oceli S355J2N

C [%]	Mn [%]	Si [%]	Cr [%]	Mo [%]	V [%]
0,17	1,14	0,17	0,13	0,04	-
Ni [%]	Cu [%]	P [%]	S [%]	Ti [%]	Al [%]
0,13	-	0,014	0,018	-	0,02

3.1 Výpočty

Pro obě metody svařování byl využit pulzní režim svářecího zdroje ve dvoutaktu oproti zkratovému a sprchovému režimu, který se využívá v současnosti. Tento režim byl využit hlavně kvůli menšímu vnesenému teplu a tak i menšímu deformačnímu účinku a je tedy nutné ho zohlednit při výpočtu vneseného tepla. Zohlednění proběhne rozdělením vneseného tepla na pracovní a základní s následným vypočtením jejich průměru.

Výpočet vneseného tepla při pracovním proudu dle (2.1)

$$Q_p = 0{,}85 \cdot \frac{220 \cdot 27}{7{,}5 \cdot 1000} = 0{,}6732\ kJ \cdot mm^{-1}$$

Výpočet vneseného tepla při základním proudu dle (2.1)

$$Q_z = 0{,}85 \cdot \frac{20 \cdot 27}{7{,}5 \cdot 1000} = 0{,}0612\ kJ \cdot mm^{-1}$$

Výpočet průměrného vneseného tepla.

$$Q_c = \frac{Q_p + Q_z}{2} = \frac{0{,}6732 + 0{,}0612}{2} = 0{,}3672\ kJ \cdot mm^{-1}$$

Vnesené teplo dle (2.1)

- Trubka

Stanovení uhlíkového ekvivalentu dle vztahu (2.2) a (2.3) :

$$CE = 0{,}17 + \frac{1{,}14}{6} + \frac{0{,}13 + 0{,}04 + 0}{5} + \frac{0{,}13 + 0}{15} = 0{,}4027\ \%$$

$$CET = 0{,}17 + \frac{1{,}14 + 0{,}04}{10} + \frac{0{,}13 + 0}{20} + \frac{0{,}13}{40} = 0{,}2978\ \%$$

Vliv chemického složení dle vzorce (2.4) :

$$T_{pCET} = 750 \cdot 0{,}2978 - 150 = 73{,}35\ °\mathrm{C}$$

Vliv tloušťky dle vzorce (2.5) :

$$T_{pd} = 160 \cdot \tanh\left(\frac{8}{35}\right) - 110 = 160 \cdot \frac{\sinh\left(\frac{8}{35}\right)}{\cosh\left(\frac{8}{35}\right)} - 110 = 160 \cdot \frac{1 - e^{-2\cdot\left(\frac{8}{35}\right)}}{1 + e^{-2\cdot\left(\frac{8}{35}\right)}} - 110 = -74\ °\mathrm{C}$$

Vliv obsahu difúzního vodíku ve svaru dle vzorce (2.6) :

$$T_{pHD} = 62 \cdot 5^{0.35} - 100 = 8{,}9\ °\mathrm{C}$$

Vliv tepelného příkonu dosazením do (2.7) :

$$T_{pQ} = (53 \cdot 0{,}2978 - 32) \cdot 0{,}3672 - 53 \cdot 0{,}2978 + 32 = 10{,}26\ °\mathrm{C}$$

Kde: Q_c – průměrné vnesené teplo

Výpočet teploty předehřevu dle vztahu (2.8)

$$T_p = 73{,}35 - 74 + 8{,}9 + 10{,}26 = 18{,}51\ °\mathrm{C}$$

- Víko

Stanovení uhlíkového ekvivalentu dle vztahu (2.2) a (2.3) :

$$CE = 0{,}17 + \frac{1{,}14}{6} + \frac{0{,}13 + 0{,}04 + 0}{5} + \frac{0{,}13 + 0}{15} = 0{,}4027\ \%$$

$$CET = 0{,}17 + \frac{1{,}14 + 0{,}04}{10} + \frac{0{,}13 + 0}{20} + \frac{0{,}13}{40} = 0{,}2978\ \%$$

Vliv chemického složení dle vzorce (2.4) :

$$T_{pCET} = 750 \cdot 0{,}2978 - 150 = 73{,}35\ °\mathrm{C}$$

Vliv tloušťky dle vzorce (2.5) :

$$T_{pd} = 160 \cdot \tanh\left(\frac{28}{35}\right) - 110 = 160 \cdot \frac{\sinh\left(\frac{28}{35}\right)}{\cosh\left(\frac{28}{35}\right)} - 110 = 160 \cdot \frac{1 - e^{-2\cdot\left(\frac{28}{35}\right)}}{1 + e^{-2\cdot\left(\frac{28}{35}\right)}} - 110 = -3{,}75\ °\mathrm{C}$$

Vliv obsahu difúzního vodíku ve svaru dle vzorce (2.6) :

$$T_{pHD} = 62 \cdot 5^{0.35} - 100 = 8{,}9\ °\mathrm{C}$$

Vliv tepelného příkonu dosazením do (2.7) :

$$T_{pQ} = (53 \cdot 0{,}2978 - 32) \cdot 0{,}3672 - 53 \cdot 0{,}2978 + 32 = 10{,}26\ °\mathrm{C}$$

Kde: Q_c – průměrné vnesené teplo

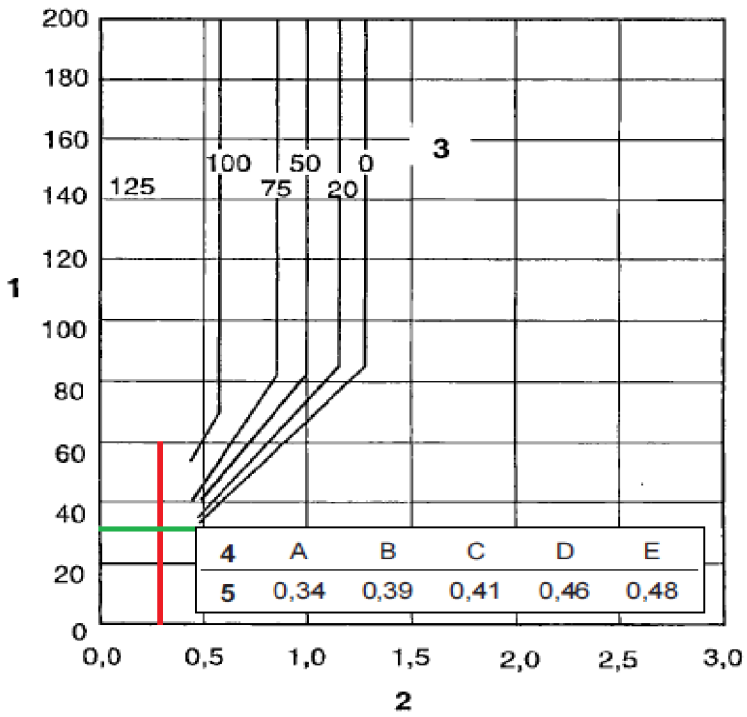
Výpočet teploty předehřevu dle vztahu (2.8)

$$T_p = 73{,}35 - 3{,}75 + 8{,}9 + 10{,}26 = 88{,}76\ °\mathrm{C}$$

Můžeme vidět, že teplota předehřevu vychází dle vzorce, i přes použití kritických hodnot, pro obě dílčí části menší než li standardně využívaná teplota předehřevu 150 °C. Proto je žádoucí provést další kontrolu a to odvozením z grafu přiloženém v normě ČSN EN 1011-2. Grafů pro odvození teploty předehřevu se zde nachází několik a je nutné vybrat správný dle daných kritérií. Byl použit uhlíkový ekvivalent CET, který byl vypočítán víše, dalším nutným parametrem je určit skupinu obsahu difuzního vodíku ve svaru. Dle přiložené tabulky na obrázku č. 30 můžeme námi určenou hodnotu H_D přiřadit do skuiny C a zvolit tak graf číslo 3. [38]

Obsah difúzního vodíku (ml/100 g svarového kovu)			Stupně obsahu vodíku
	>	15	A
10	≤	15	B
5	≤	10	C
3	≤	5	D
	≤	3	E

Obr. 30 Přiřazení stupně obsahu vodíku [38].



1 – Kombinovaná tloušťka [mm]
2 – Tepelný příkon [kJ·mm^{-1}]
3 – Minimální teplota předehřevu [°C]
4 – Stupeň obsahu vodíku
5 – Použitelné pro hodnoty uhlíkového ekvivalentu nepřesahující

Obr. 31 Odvození teploty předehřevu pro trubku dle ČSN EN 1011-2 [38].

Po odečtení hodnot z grafu je zřejmé, že není nutné předepsat teplotu předehřevu a tím i minimální hodnotu interpass. Je ovšem nutné předepsat maximální teplotu interpass pro zamezení růstu zrn v oblasti TOO, který by následně způsobil zhoršení mechanických vlastností svarového spoje. Tato hodnota byla stanovena na teplotu 350 °C.

3.1.1 Výpočet pevnosti svaru

Jako součást hodnocení proveditelnosti svaru byl využit teoretický výpočet pevnosti svaru. Jelikož se jedná o hydraulický systém, bude hlavní zatížení působit v ose na víko. Z hlediska svaru se tedy bude jednat o tahové zatížení. Dle podkladů zadavatele bude dílec vystaven zatížení 450 kN, s přetížitelností 1,25.

Výpočet dovoleného napětí dosazením do (2.12).

$$\sigma_D = \alpha \cdot \frac{R_e}{k}$$

$$= 1 \cdot \frac{402}{1.5} = 268\ MPa$$

kde: R_e je mez kluzu materálu; $R_e = 402$ [MPa]
k je koeficient bezpečnosti; $FS = 1{,}5$ [-]
α je převodní součinitel typu svařování; $\alpha = 1$ pro automatizvaný tupý svar zatížen v tahu/tlaku [-]

Výpočet působícího napětí dle vzorce (2.11).

$$\sigma_{SV} = \frac{4 \cdot F_N}{\pi \cdot (D^2 - d^2)}$$

$$= \frac{4 \cdot 450000}{\pi \cdot (95^2 - 80^2)} = 218{,}3 \ \ MPa$$

kde: F_N je síla působící na víko; $F_N = 450$ [N]
D je vnější průměr svařovaného dílce; $D = 95$ [mm]
d je vnitřní průměr svařovaného dílce; $d = 80$ [mm]

Porovnání napětí dle vztahu (2.10).

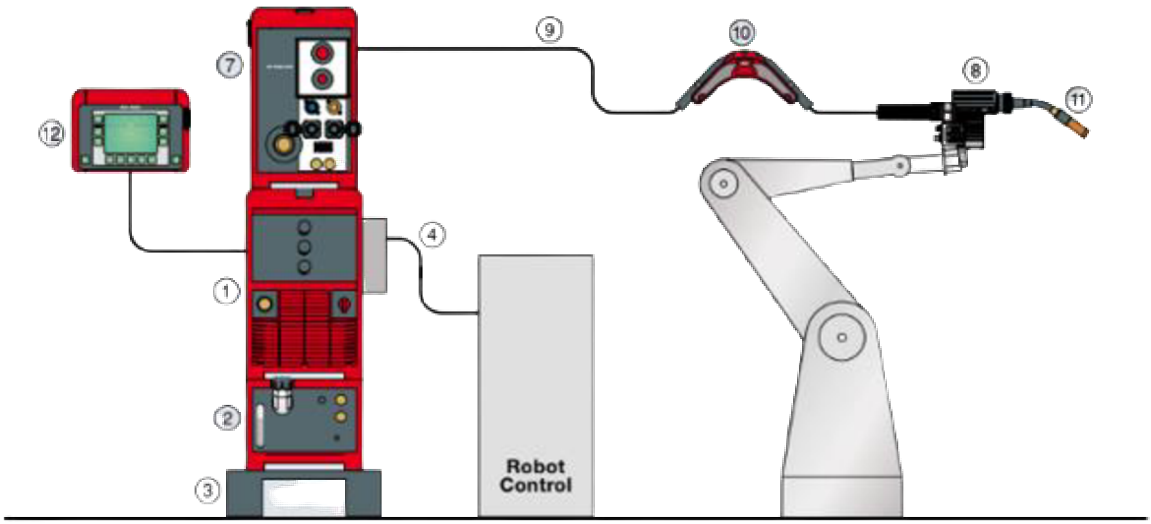
$$\sigma_{SV} \leq \sigma_D$$

$$218{,}3 \leq 268 \ \ \text{MPa}$$

Dle teoretického výpočtu pevnosti svaru je hodnota v mezi únosnosti i pro bezpečnost 1,5, což pro zadanou maximální přetížitelnost 1,25 splňuje potřebné podmínky. Můžeme tedy svar označit za dostatečně pevný pro dané zatížení a můžeme přistoupit ke svařování a následným zkouškám svaru.

3.2 Použité zařízení

Nedílnou součástí svařovacího procesu je použité zařízení. V našem případě se jedná o svařovací systém od firmy Fronius, TransPuls Synergic 3200 CMT. Zařízení je schopno pracovat s krátkým zkratovým přenosem, dlouhým sprchovým a impulsním přenosem a speciálním CMT režimem. Jedná se o mikroprocesorem řízený, digitalizovaný svařovací zdroj pro MIG/MAG svařování s výkonem 320 A. Umožňuje tak reprodukovatelné robotické svařování v těchto režimech.[46]



Obr. 32 Schéma systému Fronius Trans Plus Synergic 3200 CMT [46].

Tab. 11 Technické specifikace standardního složení systému Fronius TransPuls Synergic 3200 CMT [48].

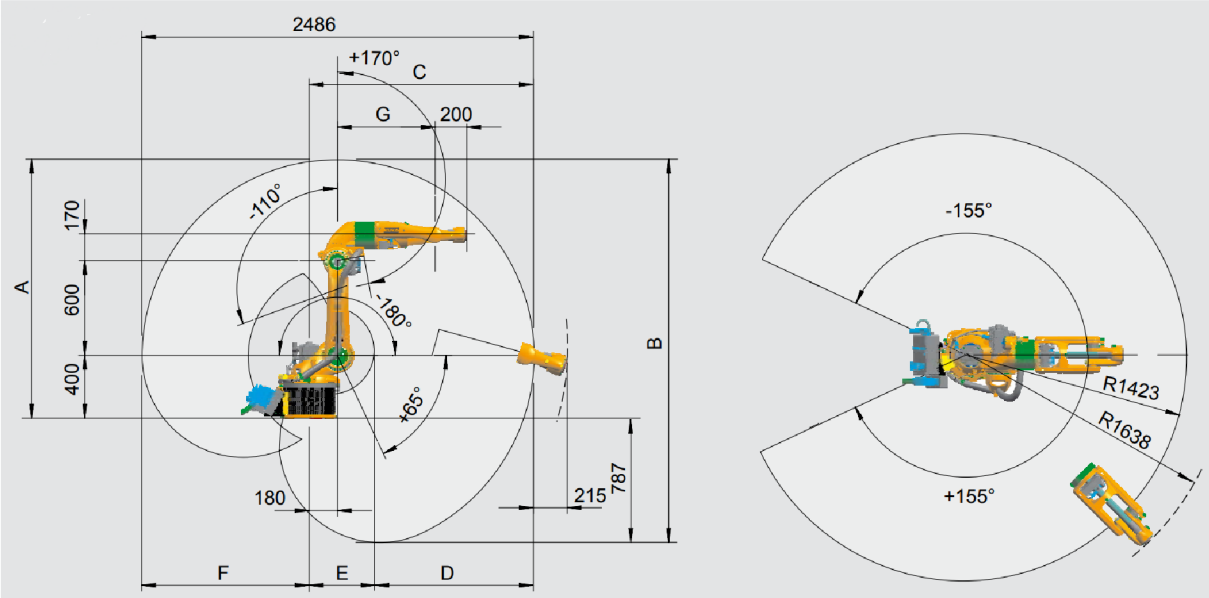
Číslo	Součást	Značení
1	Zdroj	TPS 3200 CMT
2	Chladící modul	FK 4000-R FC
3	Stojanová konzola	-

4	Řídící rozhraní	Weldcom complete
7	Podavač drátu	VR 7000-CMT 4R/G/W/F++
8	Hořák	Robacta Drive CMT W
9	Vedení drátu	Robacta Drive CMR W/F++/4,25m
10	Absorbér drátu	CMT 4,25m/1,2mm
11	Nástavec	Robacta 5000 36°
12	Ovládání	RCU5000i SD Universal

Podavač drátu VR 7000-CMT, je uzpůsoben práci v režimu CMT. Vyžaduje tedy precizní kontrolu posuvu pro dosažení požadované funkce při CMT přenosu. Podavač dosahuje rychlostí vedení drátu 0,5 až 22 m/min pro dráty o tloušťce 0.8 až 1.2 mm.[49]

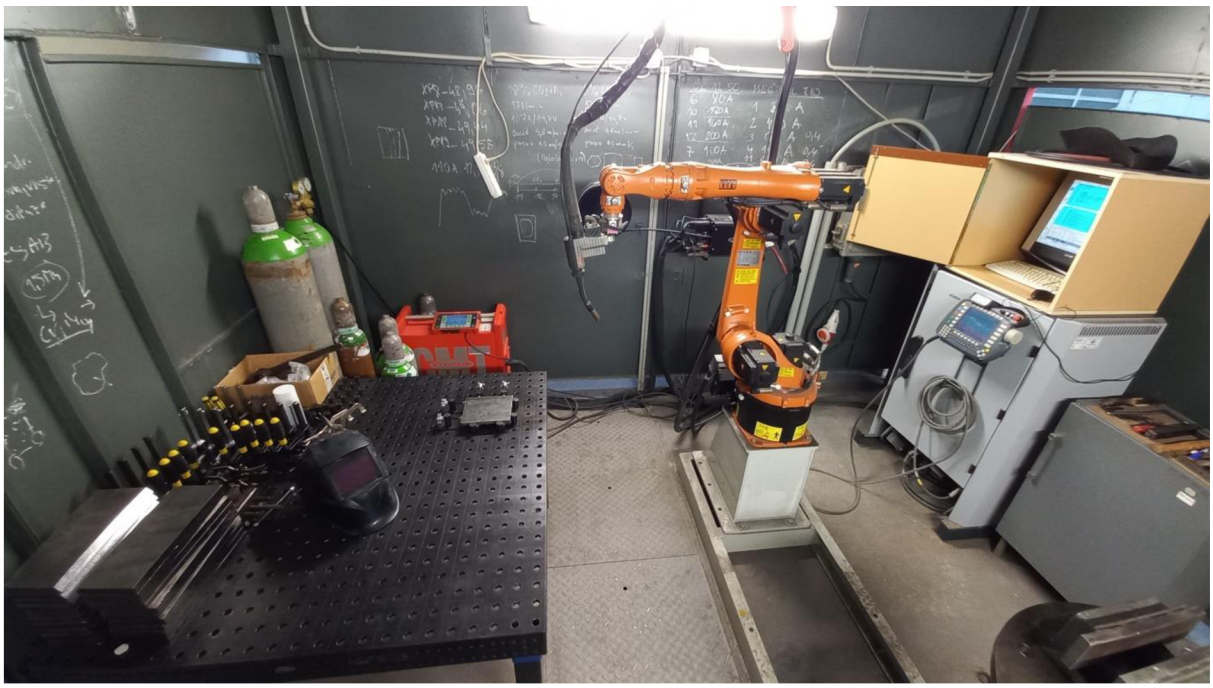
Obr. 33 Podavač VR 7000-CMT [49].

Dalším nezbytným aspektem zařízení pro robotické svařování je samotné robotické rameno. V našem případě se jedná o rameno od firmy Kuka, KR arc 5. Jedná se o šesti osé rameno uzpůsobené svařování s vysokou přesností 0,04 mm při opakovaném svařování. Je schopno bezpečně nést až 5 kg váhy a pokrýt 9,8 m^3 pracovního prostoru. Maximální únosnost ramene je pak 37 kg.[50]



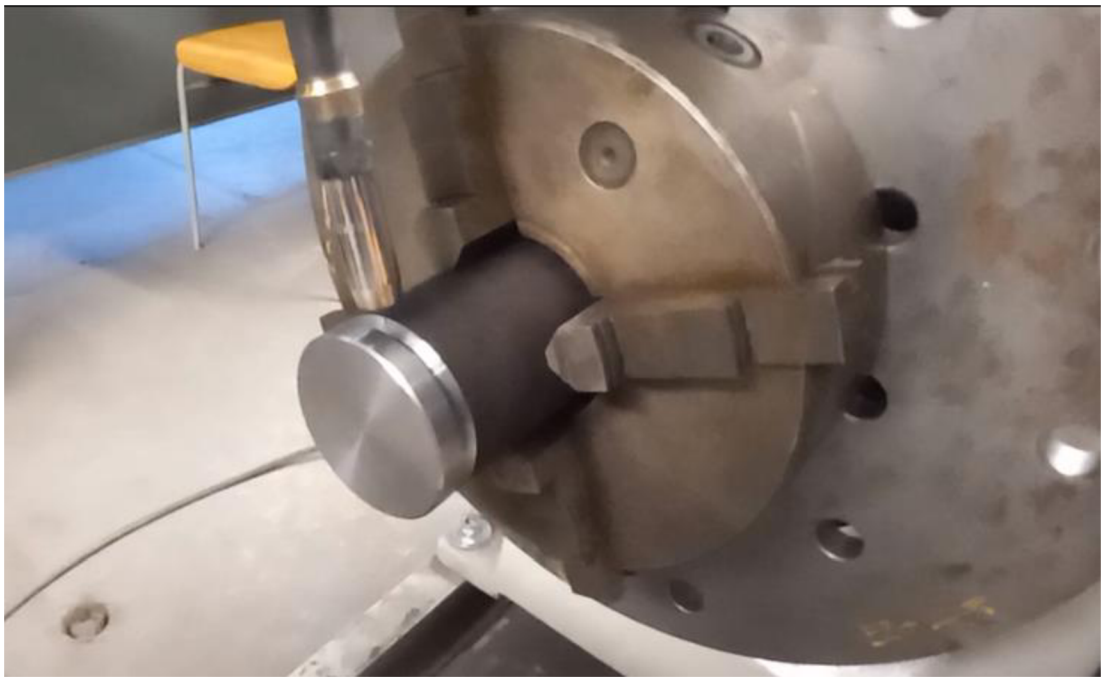
Obr. 34 Pracovní prostor a rozsah pracovních os robotického ramene [50].

Svařování dílce probíhalo ve svařovně FSI, kterou můžeme vidět na obrázku č. 35, nachází se zde potřebné vybavení jako polohovadlo, robot, svařovací zdroj a je tedy plně uzpůsobena pro využití k robotickému svařování.



Obr. 35 Pracoviště svařovny VUT FSI.

Samotné svařování probíhalo pomocí polohovadla rotujícího ve vodorovné poloze, jak vidíme na obrázku č. 36. Další možností je umístění vzorku do polohovadla ve svislé poloze s následnou rotací robotického ramene. Tento způsob je ovšem značně složitější pro programování pohybu ramene a odlazení rychlosti svařování.

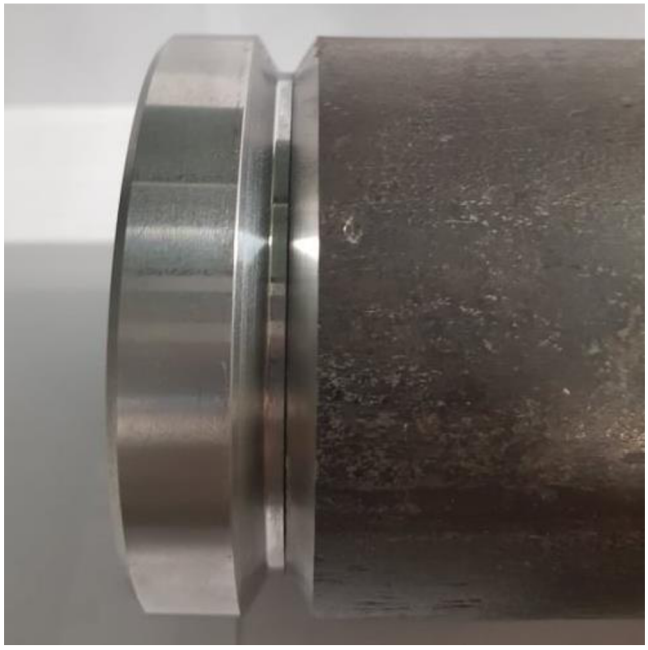


Obr. 36 Umístění vzorku pro svařování.

3.3 Vzorky a příprava svařování

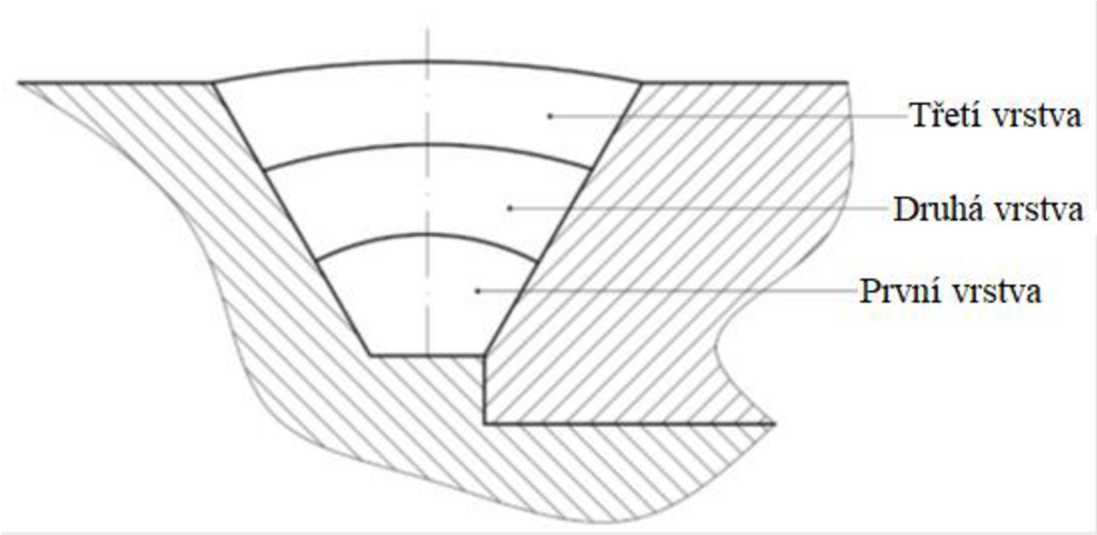
Vzorky pro praktické testování byly dodány firmou ve stavu, který můžeme vidět na obrázku č. 37. Za účelem provádění minimálních změn v současném chodu výroby firmy byla v souladu s normou ČSN EN ISO 9692 zachována současná příprava svarového spoje vzhledem k úhlu, kořenové mezeře i otupení. Příprava samotných svarových ploch probíhala pomocí jejich opracování a následného broušení. Plochy byly následně očištěny pomocí odmaštění a kartáčování. První výraznou odchylkou od původního technologického postupu je nalisování víka na trubku namísto použití stehování. Obrázek č. 38 ukazuje takto nalisované víko.

Obr. 37 Firmou dodaný vzorek.



Obr. 38 Vzorek s nalisovaným víkem připravený pro svařování.

Svařování probíhá na tři housenky, kořenovou, druhou vrstvu a krycí, jak je znázorněno na obrázku č. 39. Stroj funguje v synergickém režimu, navolíme tedy charakteristiku vhodnou pro použitý drát, seřizovač nastaví rychlost podávání drátu a v závislosti na ní se mění hodnoty proudu a napětí. Jednou další možností jak tyto parametry upravit je korekce v omezeném rozsahu.

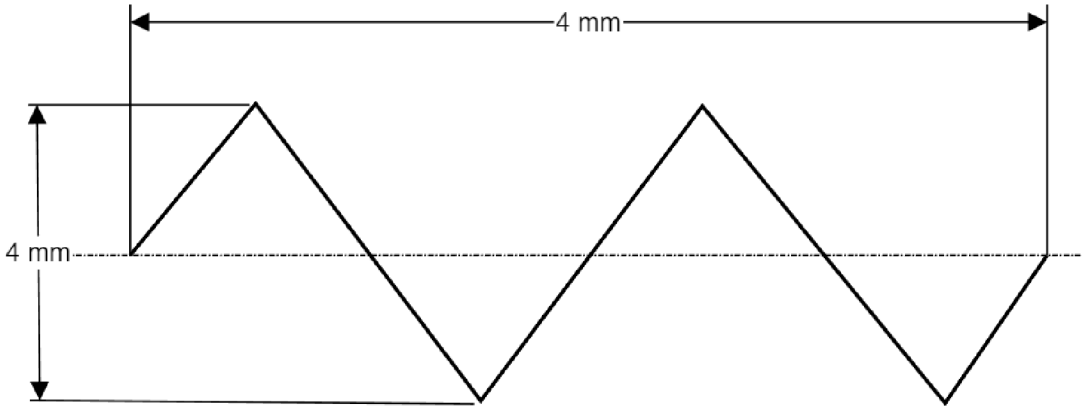


Obr. 39 Způsob kladení housenek.

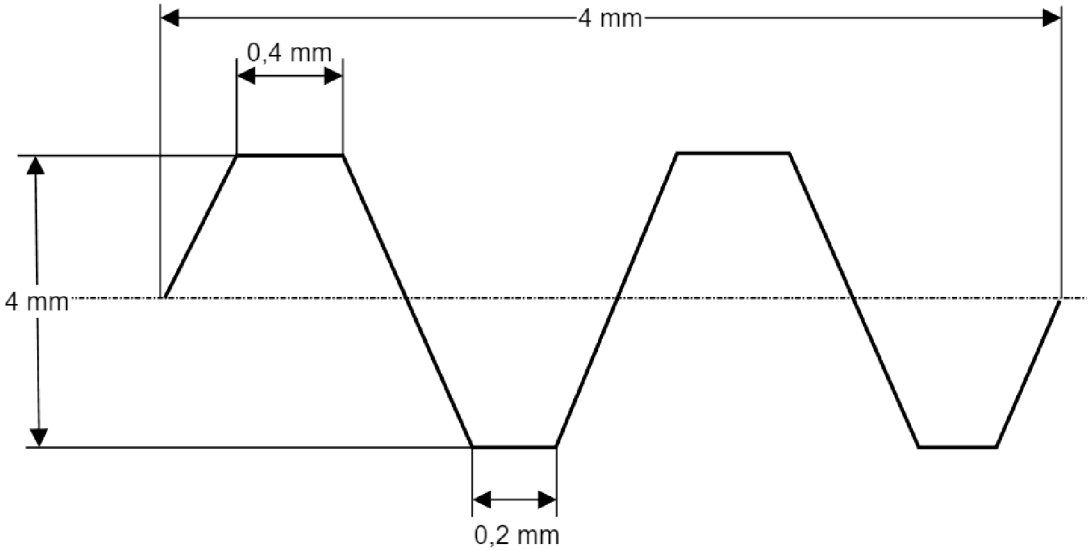
Firma zaslala pro účely experimentu celkem deset vzorků. Přes první fázi testování a ladění robotu včetně svařovacích parametrů, kde byly svary již po letmé kontrole nevyhovující, prošlo celkem pět. Z toho byly následně tři svařeny metodou MAG a dva metodou MCAW a budou podrobněji rozebráni níže. Po svaření a provedení vizuální a penetrační zkoušky byly vzorky nařezány pro makroskopickou zkoušku. Řezy a značení můžeme vidět na obrázku č 40.

Obr. 40 Provedení řezů pro následnou makroskopickou zkoušku.

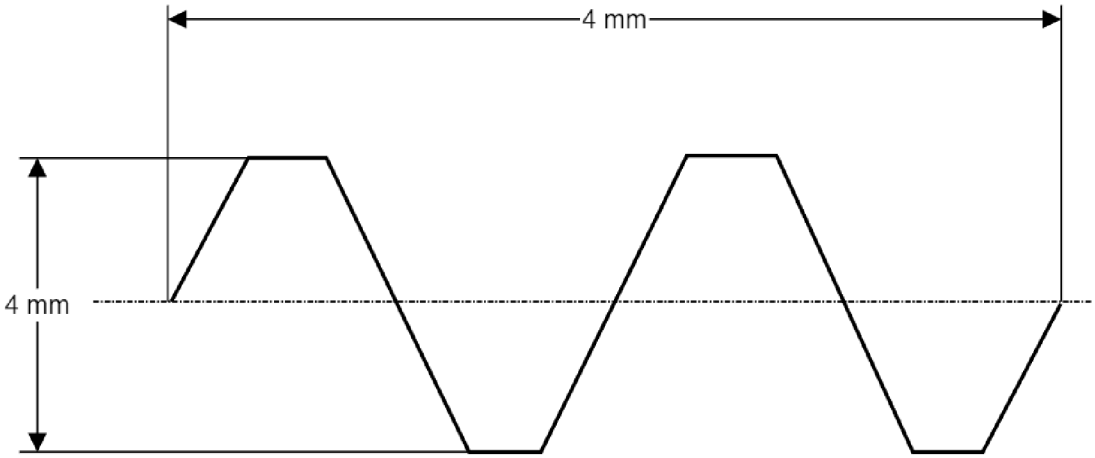
Pro správnou tvorbu svaru, distribuci vneseného tepla a svarového kovu bylo rozhodnuto o využití rozkyvu. Na vzorcích bylo zkoušeno více typů rozkyvu, ze kterých nejlepší výsledky vykazovali tvary trapézu a trojúhelníku, včetně některých jejich modifikací. Parametry těchto rozkyvů jsou definovány na obrázcích č. 41, 42 a 43.



Obr. 41 Rozkyv – Trojúhelník.



Obr. 42 Rozkyv - Asynchronní trapéz.



Obr. 43 Rozkyv – Trapéz.

3.3.1 Svařování metodou MAG

První řešenou variantou je svařování pomocí metody MAG. Tato metoda je v současnosti používaná pro ruční svařování tohoto spoje, a tak nám poskytne důležitá srovnávací data pro činnost svařovacího robotu. Pro zachování přesnosti těchto dat byl zvolen stejný přídavný materiál a to OK Aristorod 12.50 od firmy ESAB (G3Si1) o průměru 1 mm.

Tab. 12 Standardní složení drátu G3Si1 [51].

C [hm. %]	Mn [hm. %]	Si [hm. %]
0,078	1,46	0,85

Tab. 13 Údaje o parametrech pro ukládání drátu [51].

Průměr [mm]	Proud [A]	Napětí [V]	Rychlost podávání [m/min]	Produktivita [kg/h]
1,0 mm	80-250	18-30	2,7-13	1,0-4,8

Tab. 14 Minimální hodnoty mechanických vlastností po svaření [51].

Re [MPa]	Rm [MPa]	A [%]
470	560	28

Pro svařování byl použit ochranný plyn značky M21. Opět se jedná o plyn používaný v současné výrobě, který je ovšem bez problému aplikovatelný i na robotické svařování. Jedná se o směs 18 % CO_2 a 82 % Ar. Tento plyn je sice dražší variantou oproti čistému CO_2, ale zajišťuje lepší hoření oblouku, lepší vzhled svarové housenky a také podstatně nižší rozstřik.

Tab. 15 Svařovací parametry drátu G3Si1.

Vrstva	Proud [A]	Napětí [V]	Rychlost svařování [m/min]	Druh rozkyvu hořáku
Vzorek č. 1				
Kořenová	212	26,8	0,8	Bez rozkyvu
Druhá	173	24,1	0,4	Dvojitý trojúhelník
Krycí	119	21,9	0,26	Dvojitý trapéz
Vzorek č. 2				
Kořenová	212	26,8	0,8	Bez rozkyvu
Druhá	173	24,1	0,4	Dvojitý trojúhelník
Krycí	119	21,9	0,18	Dvojitý trapéz
Vzorek č. 3				
Kořenová	212	26,8	0,8	Bez rozkyvu
Druhá	173	24,1	0,4	Dvojitý trojúhelník

Krycí	121	21,9	0,18	Asynchronní dvojitý trapéz
Průměr drátu [mm]		Průtok plynu [l/min]		Výlet drátu [mm]
1,0		18		17

3.3.2 Svařování metodou MCAW

Druhou řešenou metodou je metoda MCAW. Jedná se o metodu, která v současnosti není firmou používána, byla však zařazena do experimentu díky dobrým výsledným vlastnostem svaru a tomu, že potřebné zařízení pro její realizaci se prakticky neliší od metody MAG. Pořizovací náklady na zapojení této metody do výroby jsou tedy prakticky totožné, až na rozdílnou cenu přídavného materiálu. Zvolený přídavný materiál nese označení MEGAFIL 710. Ochranný plyn je stejně jako u metody MAG použit M21, svařování probíhá v poloze PA a drát obsahuje 5 ml·100g^{-1} difuzního vodíku.

Tab. 16 Standardní složení drátu MEGAFIL 710 [52].

C [hm. %]	Mn [hm. %]	Si [hm. %]
0,05	1,50	0,7

Tab. 17 Minimální hodnoty mechanických vlastností po svaření [52].

Re [MPa]	Rm [MPa]	A [%]
460	580	28

Tab. 18 Svařovací parametry drátu MEGAFIL 710.

Vrstva	Proud [A]	Napětí [V]	Rychlost svařování [m/min]	Druh rozkyvu hořáku
Vzorek č. 4				
Kořenová	195	24,3	0,12	Dvojitý trapéz
Druhá	183	23,6	0,12	Dvojitý trapéz
Krycí	118	21,4	0,18	Trapéz
Vzorek č. 5				
Kořenová	195	24,3	0,12	Dvojitý trapéz
Druhá	205	23,7	0,12	Dvojitý trapéz
Krycí	118	21,4	0,18	Trapéz
Průměr drátu [mm]		Průtok plynu [l/min]		Výlet drátu [mm]
1,0		18		17

3.4 Zkoušení svarů

Ve firmou daných požadavcích na zkoušení svarů je uvedena zkouška tlakem a vizuální dle ČSN EN ISO 5817, stupeň kvality byl firmou určen jako B. To je ovšem nedostatečné pro označení svaru jako vyhovujícího neboť se v něm mohou vyskytovat podpovrchové vady ale

i povrchové vady, které vizuální zkouška nemusí odhalit. Dle normy ČSN EN 17635 tak bylo NDT pro povrchové vady rozšířeno o penetrační zkoušku dle tab. č. 19. Pro kontrolu vnitřních vad určuje norma metody NDT v tab. č 20.[43; 53]

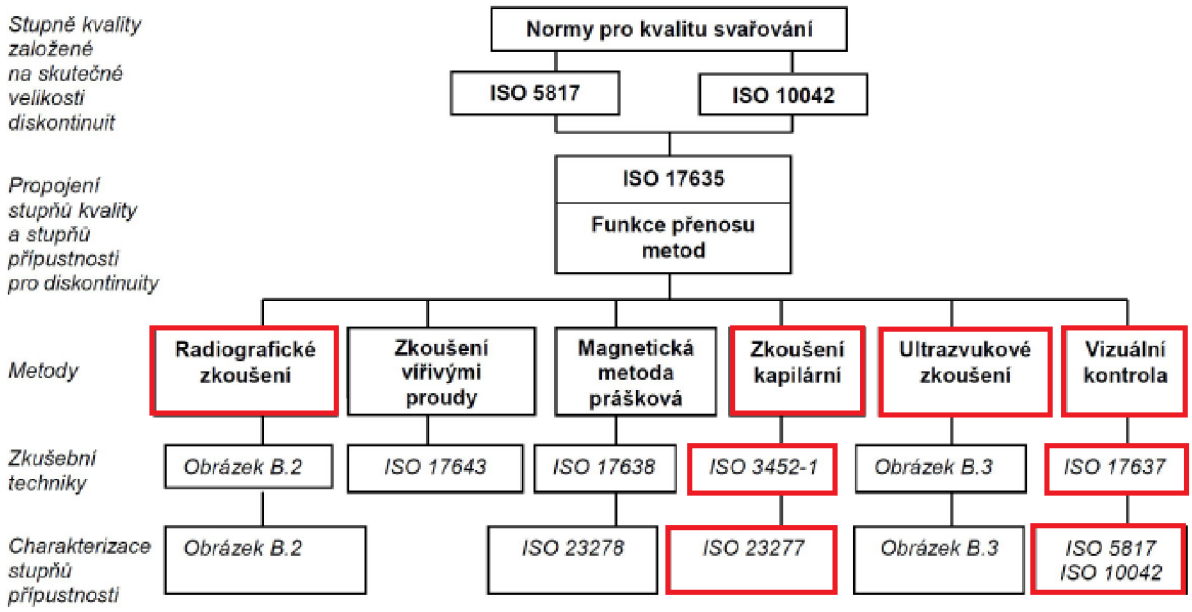
Tab. 19 Doporučené NDT metody pro indikaci povrchových [51].

Materiál	Zkušební metody
Feritická ocel	VT
	VT a MT
	VT a PT
	VT a (ET)
Austenitická ocel	VT
Hliník a nikl	VT a PT
Měď a titan	VT a (ET)

Tab. 20 Doporučené metody NDT zkoušení pro indikaci vnitřních vad [53].

Materiál a typ spoje	Jmenovitá tloušťka ZM		
	$t \leq 8$	$8 < t \leq 40$	$t > 40$
Feritické tupé spoje	RT nebo (UT)	RT nebo UT	UT nebo (RT)
Feritické T-spoje	(UT) nebo (RT)	UT nebo (RT)	UT nebo (RT)
Austenitické tupé spoje	RT	RT nebo (UT)	(RT) nebo (UT)
Austenitické T-spoje	(UT) nebo (RT)	(UT) a/nebo (RT)	(UT) nebo (RT)
Tupé spoje hliníku	RT	RT nebo UT	RT nebo UT
Atd…			
Poznámka 1 : Metody uvedené v závorce jsou použitelné pouze omezeně Poznámka 2: Pro zkoušení ultrazvukem austenitických spojů, viz ISO 22825			

Každá uvedená zkouška má předepsanou normu pro zkušební techniku a následné vyhodnocení v příloze B normy ČSN EN ISO 17635, uvedené na obrázku č. 44. Norma ČSN EN ISO 17635 také v příloze A uvádí vztahy mezi stupni kvality dle ČES EN ISO 5817 a technikami, třídami a stupni přípustnosti zkoušení dalších NDT norem. Pro kontrolu vizuální metodou jsou tyto stupně přípustnosti stejné, pro kapilární metodu jsou uvedeny v tabulce č. 21.[43; 53]



Obr. 44 Znázornění souvislosti norem [53].

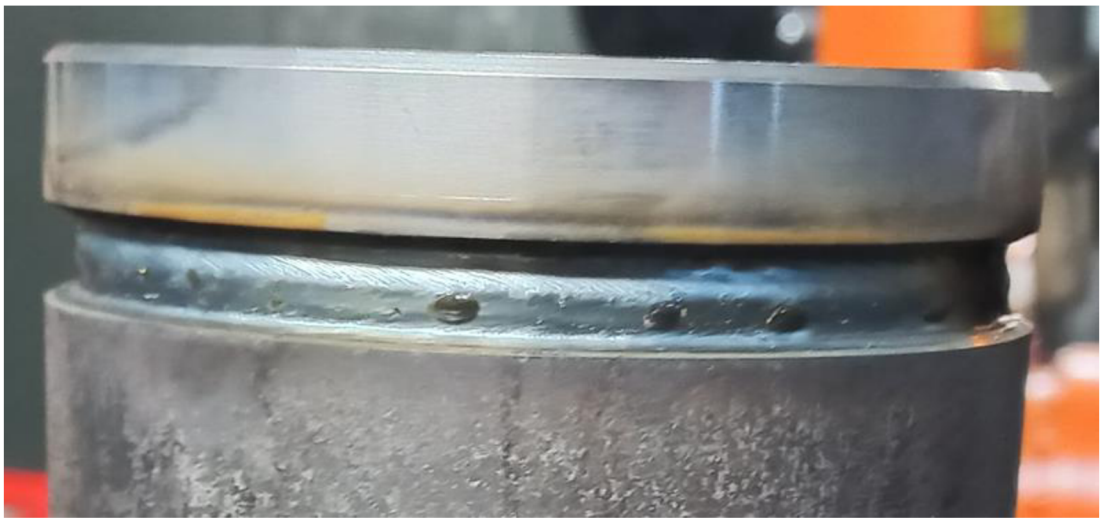
Tab. 21 Zkoušení kapilární metodou [54].

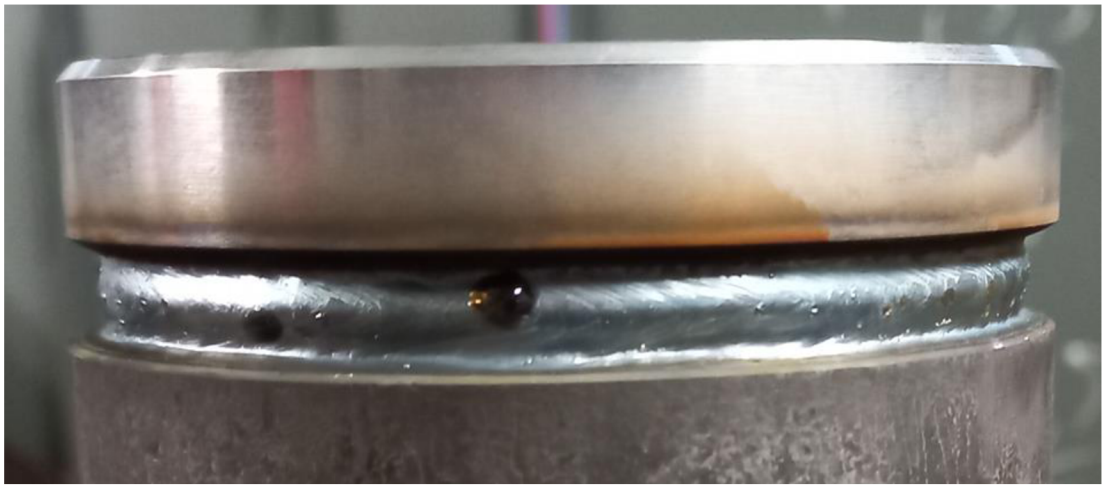
Stupně kvality dle ISO 5817 nebo ISO 10042	Techniky a třídy zkoušení dle ISO 3452-1	Stupně přípustnosti dle ISO 23277
B	Třída není stanovena	2 X
C	Třída není stanovena	2 X
D	Třída není stanovena	3 X

Vzhledem k tomu, že víko je nalisováno na trubce, zde vznikne neprovařený zámek. Tento zámek by poté při rentgenovém nebo ultrazvukovém zkoušení vystupoval jako vada a není proto možné tyto zkoušky úspěšně provést. Z tohoto důvodu bylo rozhodnuto o použití DT makrostrukturního výbrusu.

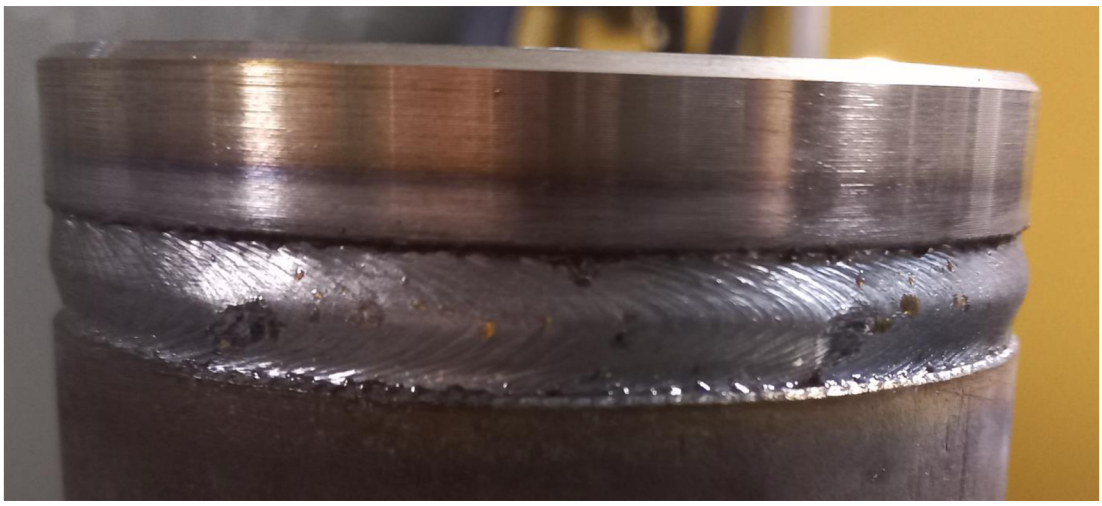
3.5 Vizuální zkouška

- Vzorek č. 1 – G3Si1

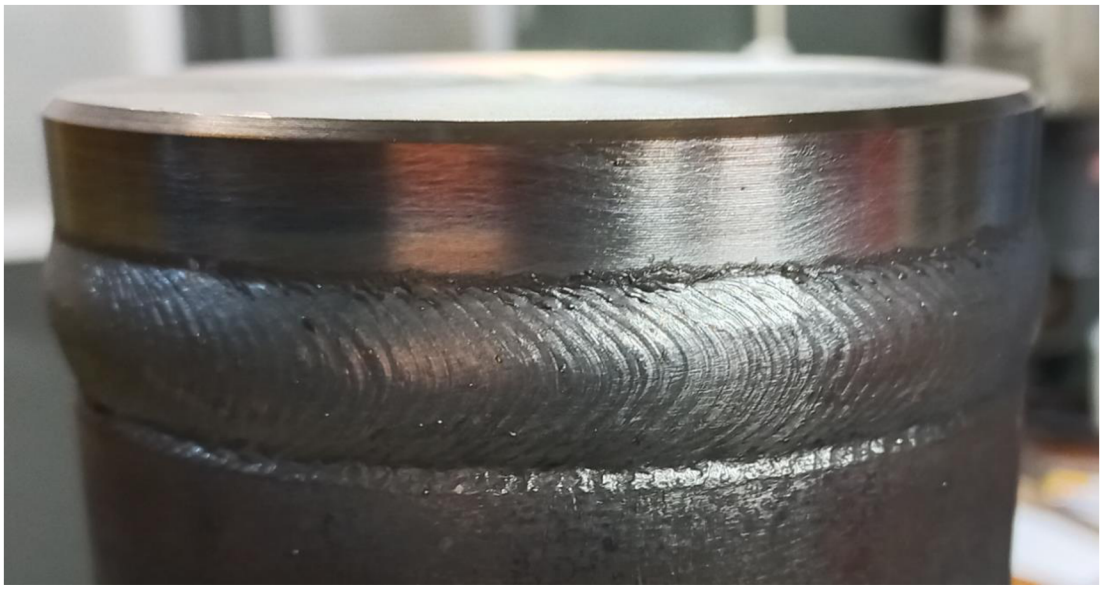




Obr. 45 Vzorek č. 1, Vrstva č. 1



Obr. 46 Vzorek č. 1, Vrstva č. 2



Obr. 47 Vzorek č. 1, Vrstva č. 3

Obr. 47 Vzorek č. 1, Vrstva č. 3

Tab. 22 Hodnocení vizuální zkoušky vzorku č. 1.

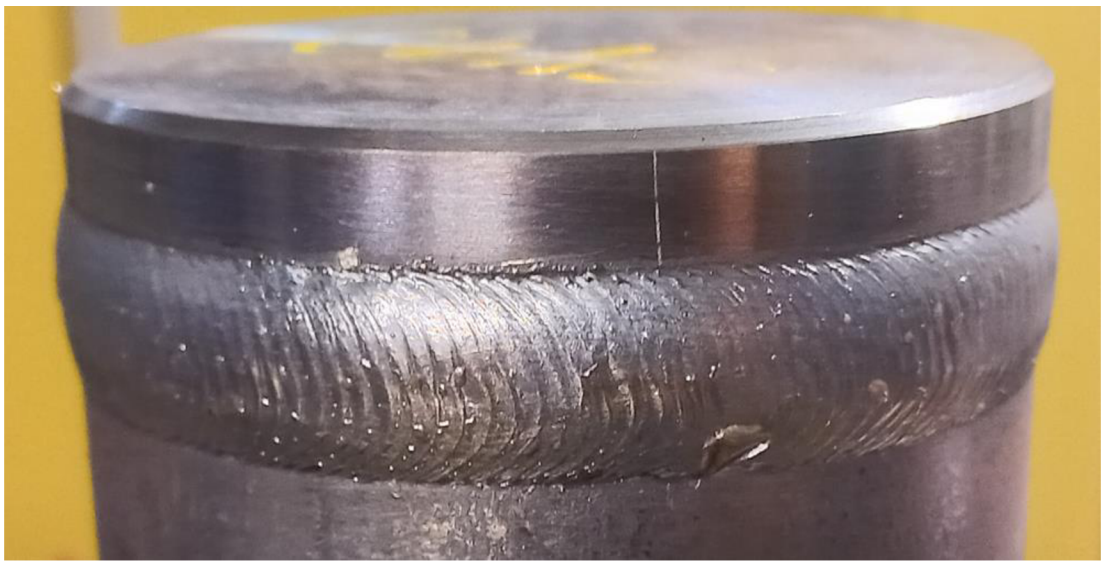
Vrstva č. 1	Nesouvislý zápal (5012), zbytek OK
Vrstva č. 2	OK
Vrstva č. 3	Povrchový pór (100), souvislý zápal (5011) - špatně zvolené parametry rozkyvu

Vizuální zkouška odhalila pór a zápal. Ihned můžeme konstatovat, že souvislý zápal je nepřípustný pro vizuální kontrolu B dle ČSN EN ISO 5817, svar je tedy nevyhovující. Pro přesnější odhalení chyb a prozkoumání hloubky póru, bylo rozhodnuto i přes nevyhovující svar provést kapilární zkoušku a makroskopický výbrus.[43]

- Vzorek č. 2 – G3Si1

Obr. 48 Vzorek č. 2, Vrstva č. 1

Obr. 49 Vzorek č. 2, Vrstva č. 2

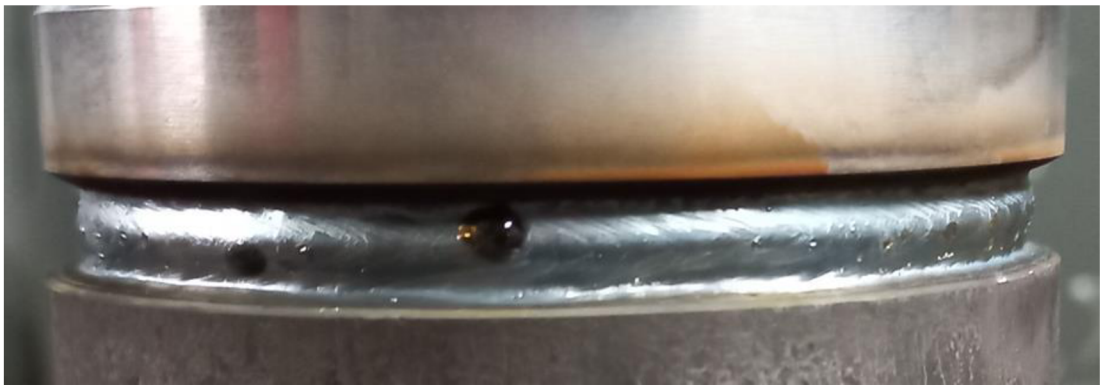


Obr. 50 Vzorek č. 2, Vrstva č. 3

Tab. 23 Hodnocení vizuální zkoušky vzorku č. 2.

Vrstva č. 1	OK
Vrstva č. 2	OK
Vrstva č. 3	OK

- Vzorek č. 3 – G3Si1



Obr. 51 Vzorek č. 3, Vrstva č. 1

Obr. 52 Vzorek č. 3, Vrstva č. 2

Obr. 53 Vzorek č. 3, Vrstva č. 3

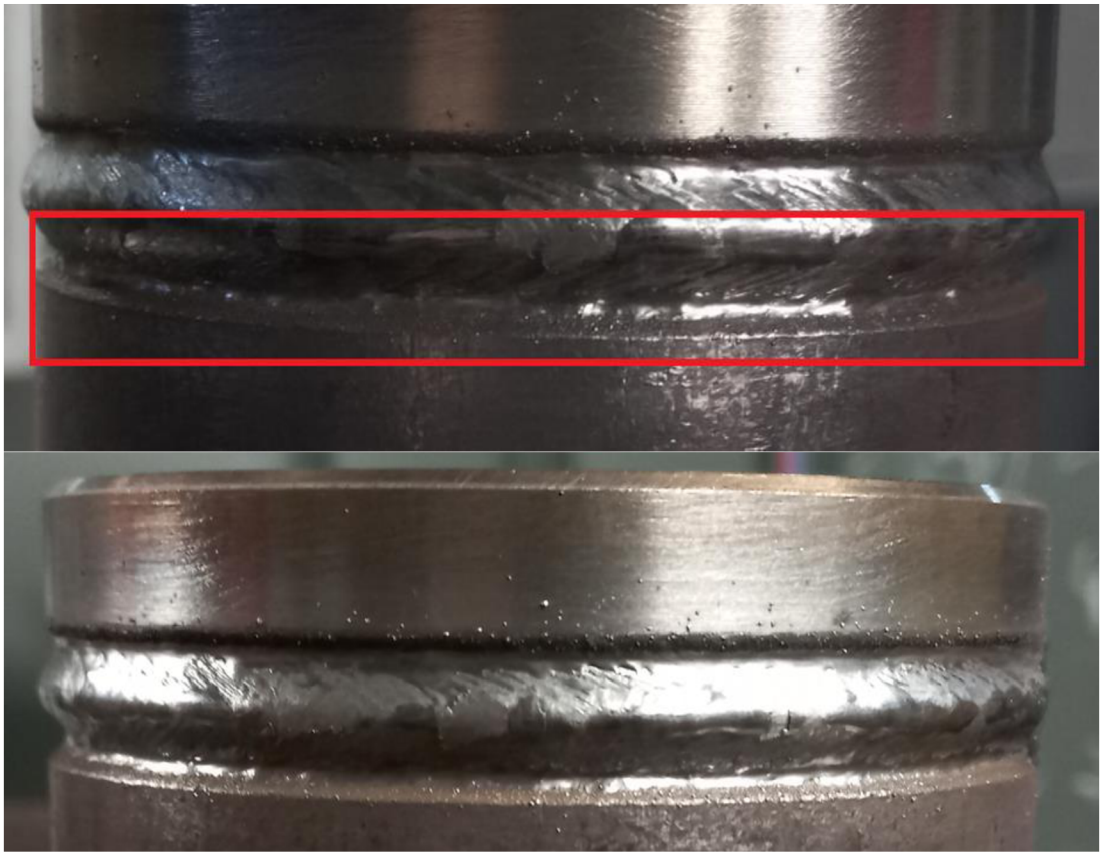
Tab. 24 Hodnocení vizuální zkoušky vzorku č. 3.

Vrstva č. 1	OK
Vrstva č. 2	OK
Vrstva č. 3	OK

Vizuální zkouška neodhalila u vzorků č. 2 a č. 3 žádné závady a můžeme u nich přistoupit ke zkoušce kapilární. Je totiž možné, že se zde nachází vady neodhalitelné pouhým okem. Pokud vzorky úspěšně projdou i kapilární zkouškou přistoupíme na závěr k výbrusu a makroskopické zkoušce.

- Vzorek č. 4 – MEGAFIL 710

Obr. 54 Vzorek č. 4, Vrstva č. 1



Obr. 55 Vzorek č. 4, Vrstva č. 2

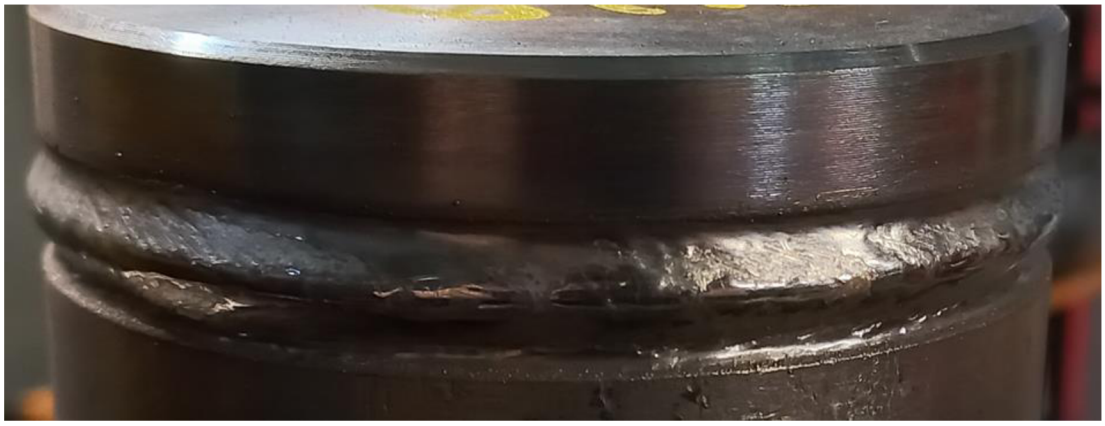
Obr. 56 Vzorek č. 4, Vrstva č. 3

Tab. 25 Hodnocení vizuální zkoušky vzorku č. 4.

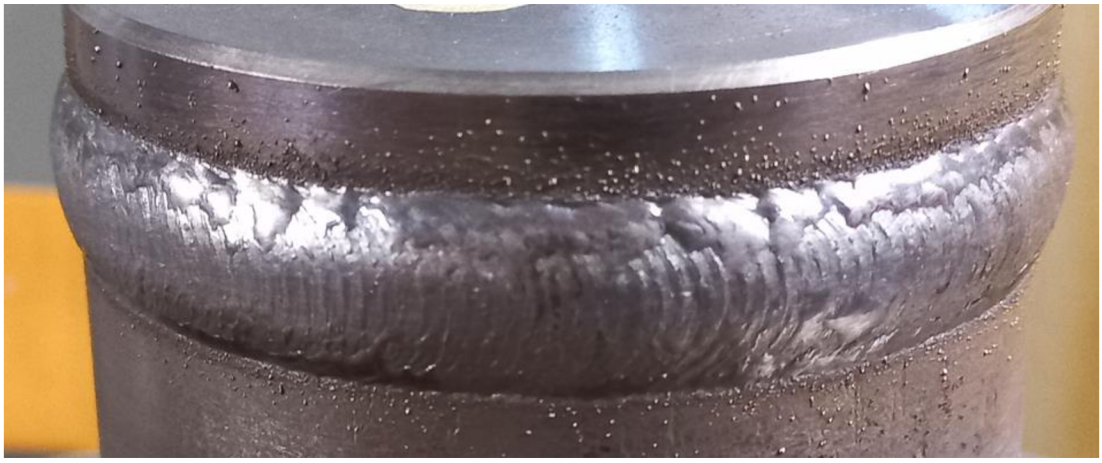
Vrstva č. 1	OK
Vrstva č. 2	Souvislý zápal (5011) – špatně zvolené parametry rozkyvu, velké převýšení svaru (502)
Vrstva č. 3	Rozstřik (602) – nedokonale nastavený svařovací postup

- Vzorek č. 5 – MEGAFIL 710

Obr. 57 Vzorek č. 5, Vrstva č. 1



Obr. 58 Vzorek č. 5, Vrstva č. 2



Obr. 59 Vzorek č. 5, Vrstva č. 3

Tab. 26 Hodnocení vizuální zkoušky vzorku č. 5.

Vrstva č. 1	OK
Vrstva č. 2	OK
Vrstva č. 3	Rozstřik (602) - nedokonale nastavený svařovací postup

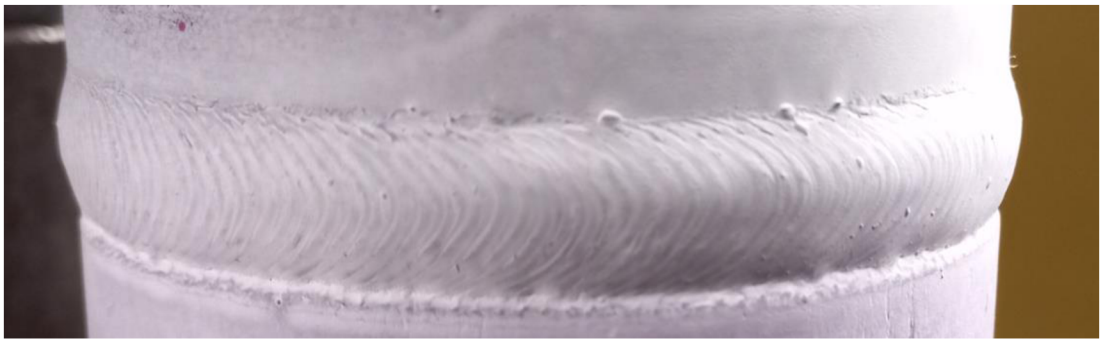
Vizuální zkouška odhalila u vzorků č. 4 i č. 5 poměrně velký rozstřik, který není podle vizuální kontroly stupně B dle ČSN EN ISO 5817 zásadní vadou vzhledem k následné úpravě svaru pomocí obrábění. U vzorku č. 4 byl však indikován souvislý zápal, označený červeně, který je podle kontroly stupně nepřípustný. Vzhledem k tomu že vzorek č. 4 neobsahuje další vizuálně indikovatelné chyby, kromě již zmíněného nepřípustného zápalu, není nutné jej podrobit dalším testům.[43]

3.6 Penetrační zkouška

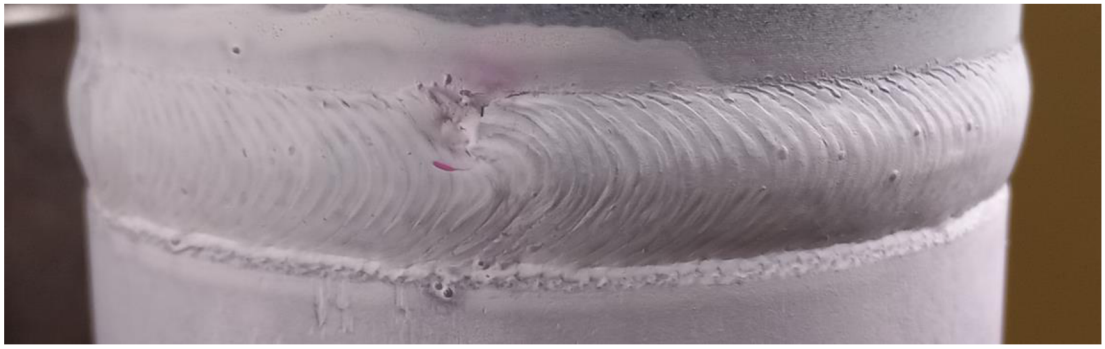
Pro účel provedení penetrační zkoušky svaru byla zvolena metoda barevné indikace. Svar byl nejprve očištěn pomocí spreje Crick 110, následně byl nanesen červený penetrant Diffu-therm. Po uběhnutí penetračního času předepsaného normou byla nanesena vývojka pro indikaci vad Diffu-term. Obecné zásady kapilární zkoušky, včetně zkušebních prostředků a postupu definuje norma ČSN EN ISO 3452-1.[55]

Obr. 60 Prostředky použité pro penetrační zkoušku vzorků [56; 57].

- Vzorek č. 1

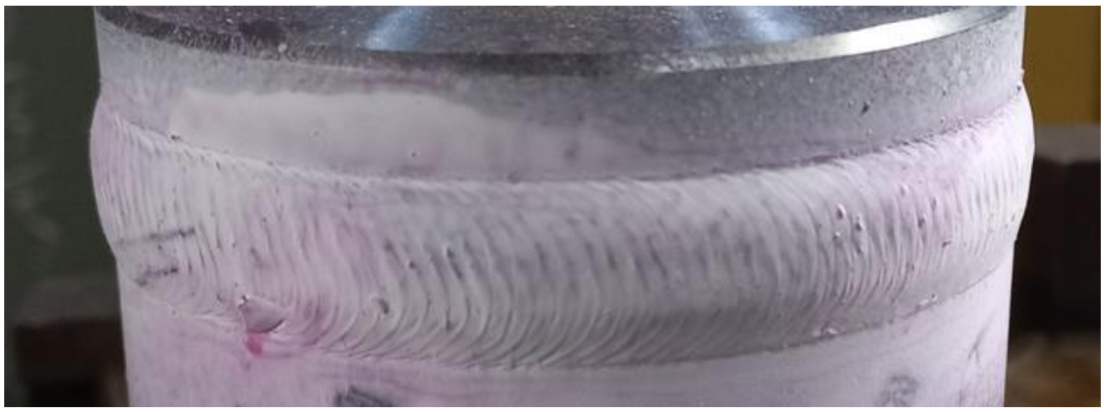


Obr. 61 Penetrační zkouška - vzorek č. 1



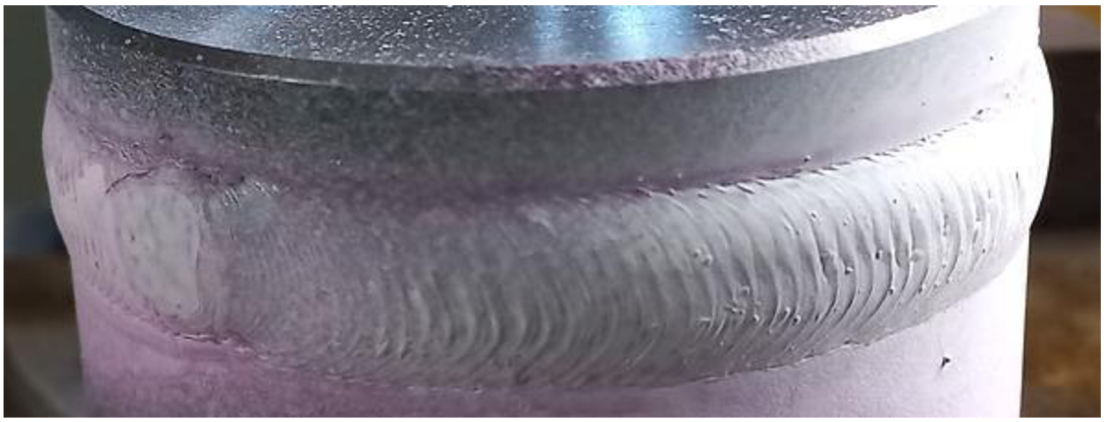
Obr. 62 Penetrační zkouška - vzorek č. 1, pór

- Vzorek č. 2



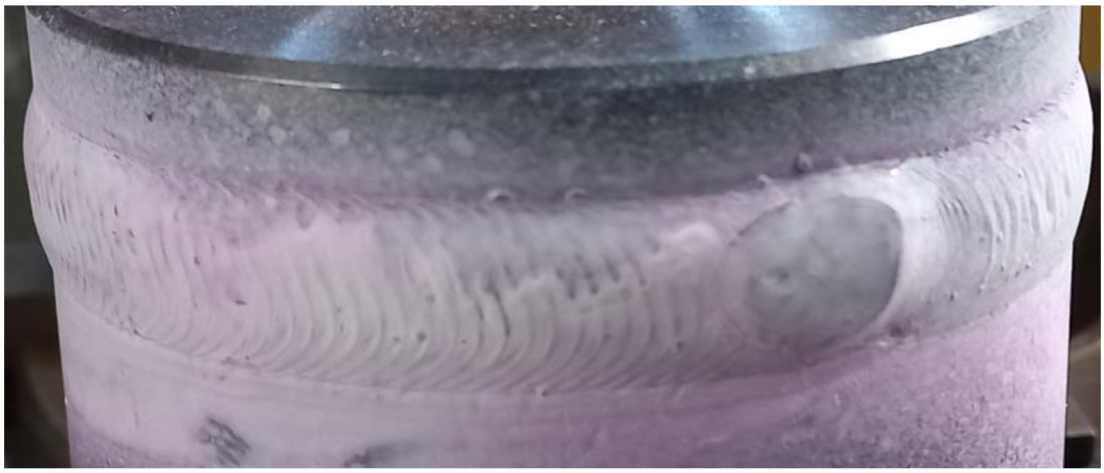
Obr. 63 Penetrační zkouška - vzorek č. 2

- Vzorek č. 3



Obr. 64 Penetrační zkouška - vzorek č. 3

- Vzorek č. 4
  - Pro vzork č. 4 nebyla provedena penetrační zkouška z důvodu nevyhovujícího svaru
- Vzorek č. 5



Obr. 65 Penetrační zkouška - vzorek č. 5

Tab. 27 Stupně přípustnosti pro indikace vad penetrační metodou. [51]

Typ indikace	Stupeň přípustnosti		
	1	2	3
Lineární indikace l = délka indikace	$l \leq 2$	$l \leq 4$	$l \leq 8$
Nelineární indikace d = rozměr hlavní osy	$d \leq 4$	$d \leq 6$	$d \leq 8$
Poznámka 1 : Stupně přípustnosti 2 a 3 mohou být označeny znakem „X“ což znamená, že všechny zjištěné lineární indikace musí být hodnoceny podle stupně 1. Avšak pravděpodobnost detekce menších indikací, než jsou uvedené v tabulce pro původní stupně přípustnosti, může být nízká.			

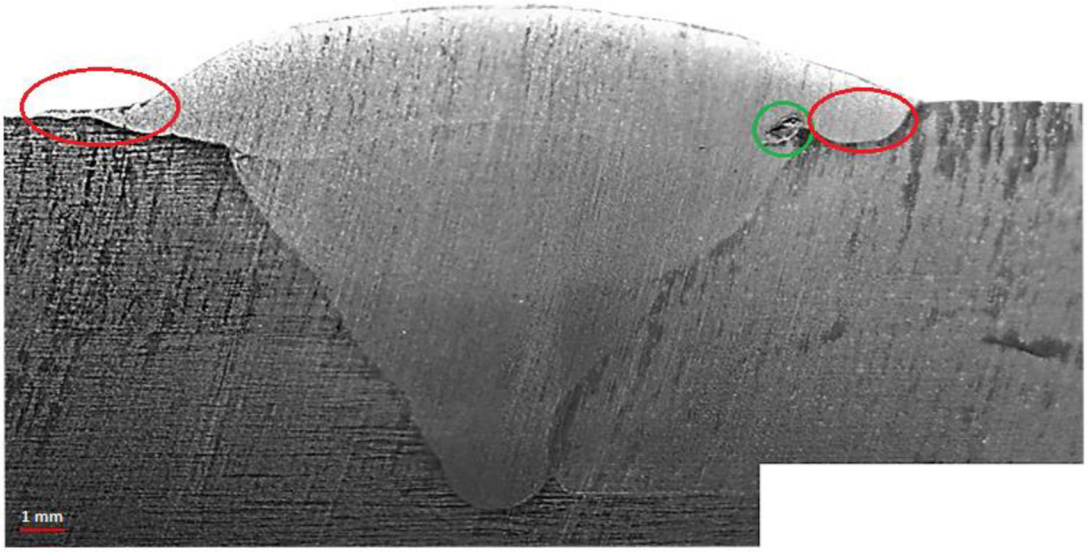
Tab. 28 Hodnocení penetrační zkoušky.

Vzorek č. 1	(G3Si1)	Zápal nebyl zkouškou indikován jako vada. Pór můžeme hodnotit jako ne příliš hluboký vzhledem k tomu, že penetrant nezatekl hluboko a vada tak nebyla odhalena vývojkou.
Vzorek č. 2	(G3Si1)	Nebyla indikována žádná vada.
Vzorek č. 3	(G3Si1)	Nebyla indikována žádná vada.
Vzorek č. 4	(MEGAFIL 710)	Nebyl hodnocen.
Vzorek č. 5	(MEGAFIL 710)	Nebyla indikována žádná vada.

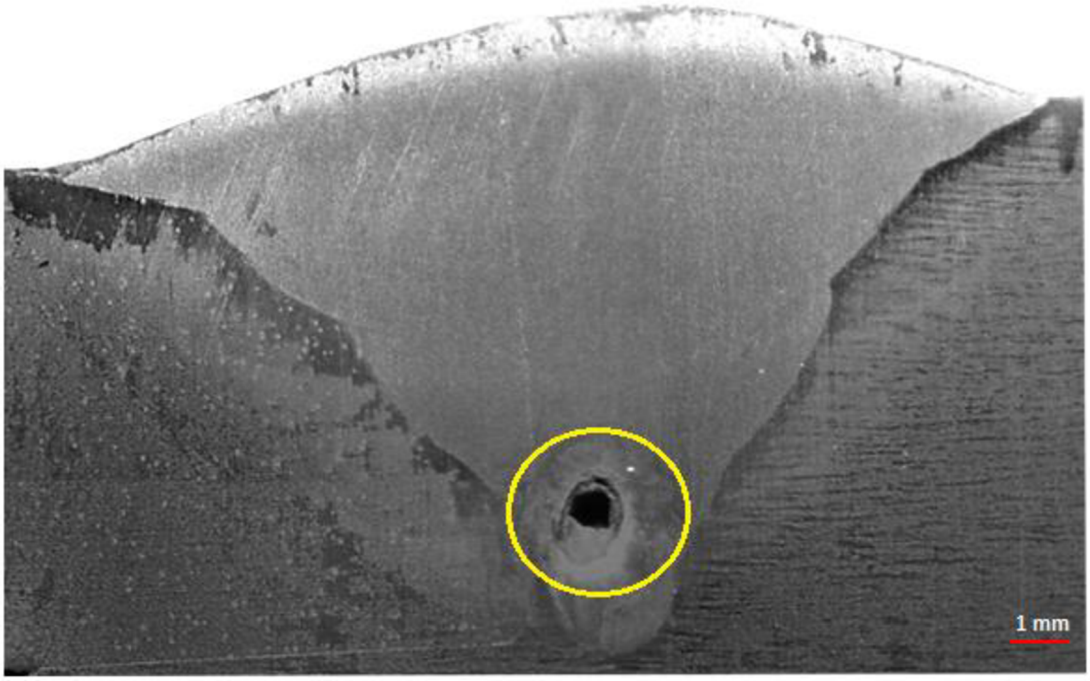
Norma ČSN EN ISO 17635 stanovuje stupeň přípustnosti vad B jako stupeň 2 X pro vyhodnocení penetrační zkoušky dle ČSN EN ISO 23277. Je tedy nutné všechny indikované vady hodnotit dle stupně přípustnosti 1, jak vysvětluje poznámka v tabulce č. 27. Po provedení kontroly však nebyly zjištěny vady na žádném ze zkoušených vzorků a to i přes to že vzorek č. 1 vykazoval vady v provedené vizuální zkoušce.[53; 54]

3.7 Makroskopická zkouška

- Vzorek č. 1

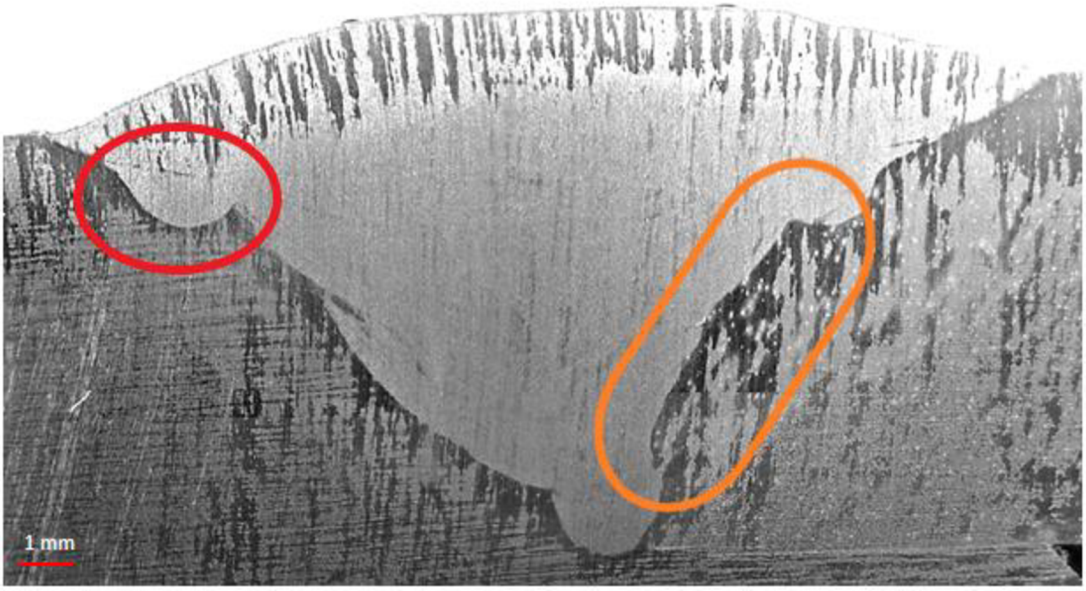


Obr. 66 Makrostruktura, vzorek č. 1, Místo dokončení 3. housenky



Obr. 67 Makrostruktura, vzorek č. 1, Místo dokončení 1. Housenky

- Vzorek č. 2

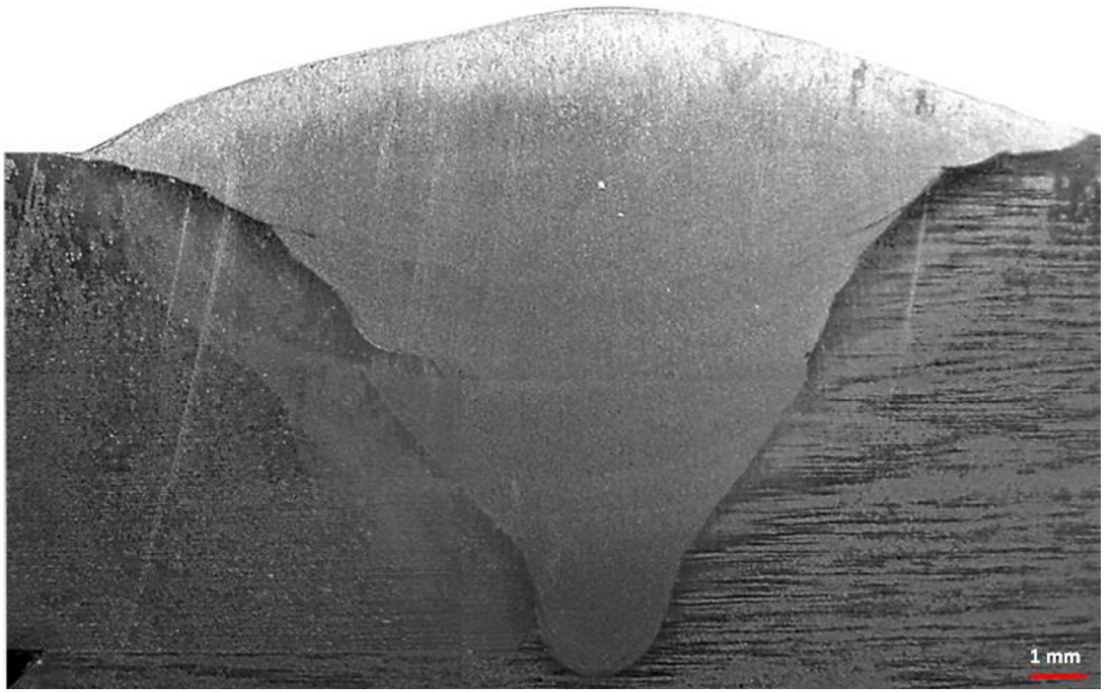


Obr. 68 Makrostruktura, vzorek č. 2

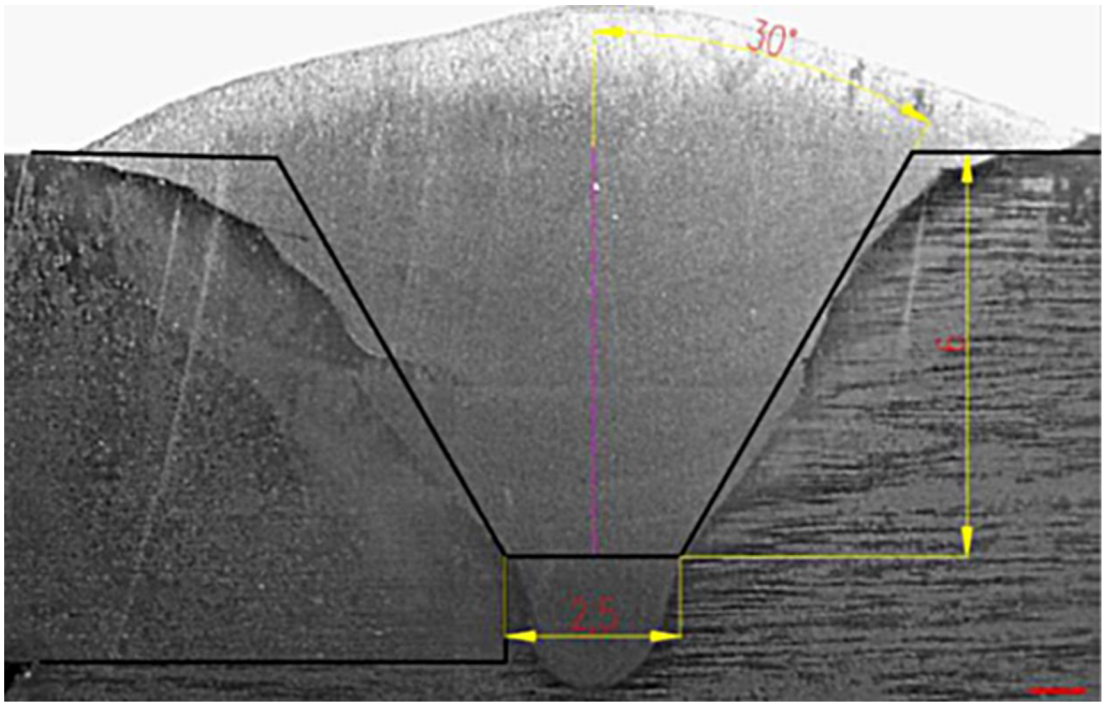
Tab. 29 Hodnocení vad pro vzorky č. 1 a č. 2.

Vzorek č. 1	Červená	Přetečení (506) - špatné nastavení rozkyvu
	Zelená	Pór (2011) – špatné doladění dojezdu
	Žlutá	Pór v kořenové vrstvě (2011) – špatné doladění dojezdu
Vzorek č. 2	Oranžová	Studený spoj (401) – špatné nastavení rozkyvu
	Červená	Přetečení (506) – špatné nastavení rozkyvu

- Vzorek č. 3

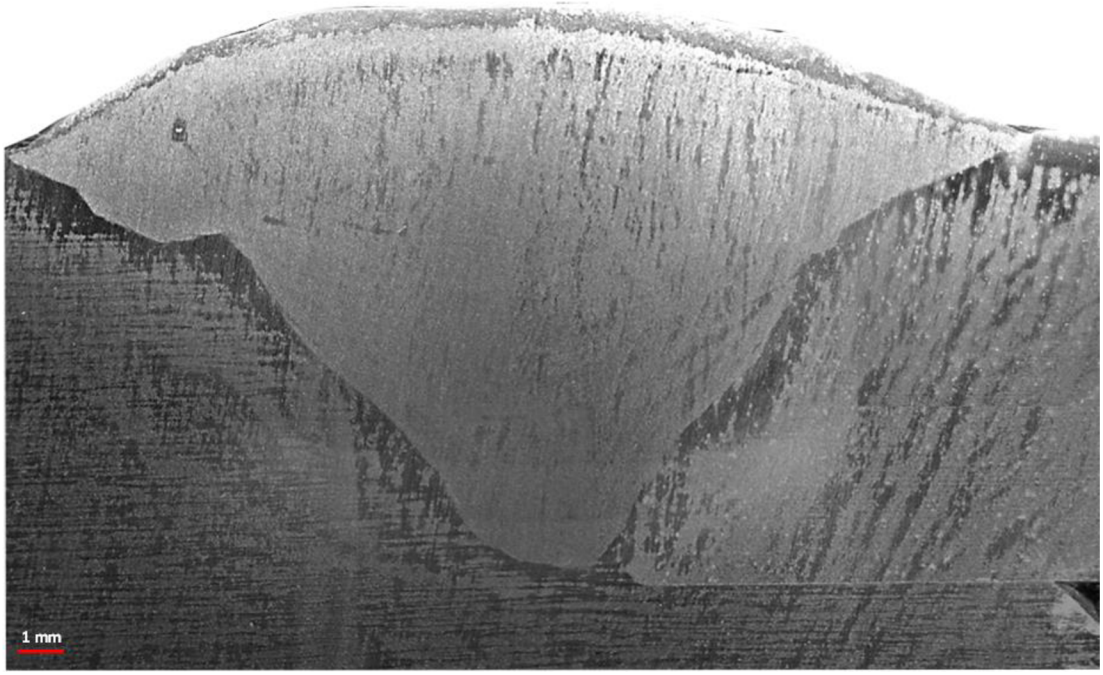


Obr. 69 Makrostruktura, vzorek č. 3

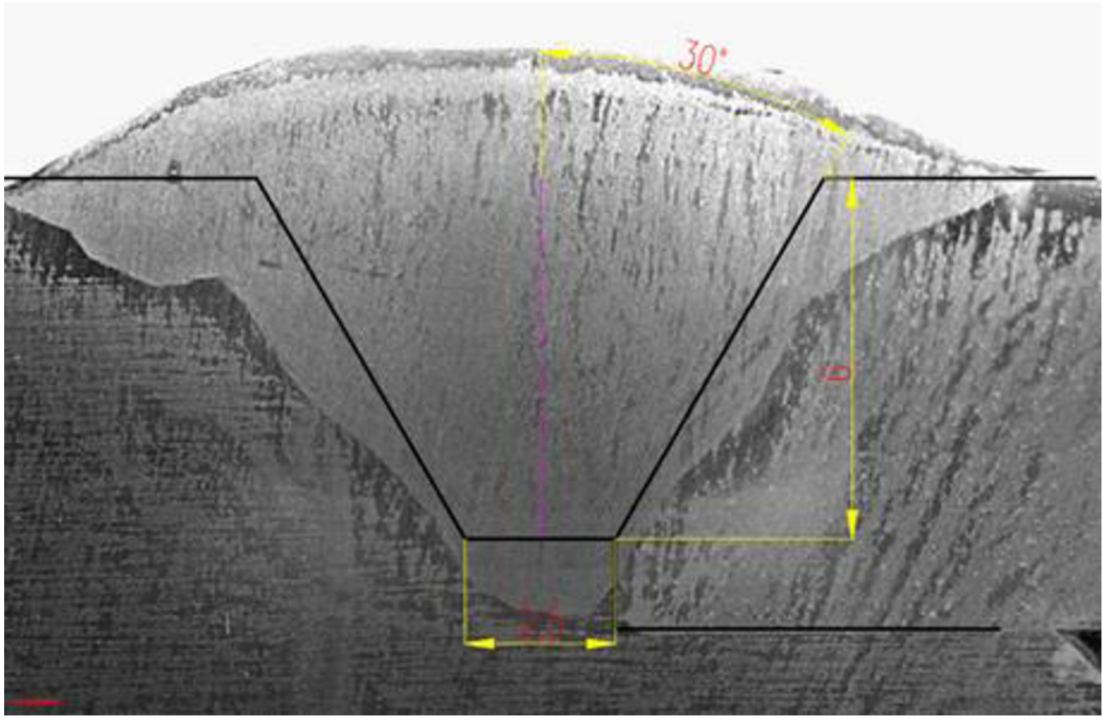


Obr. 70 Makrostruktura s geometrií, vzorek č. 3

- Vzorek č. 4
  - Vzorek č. 4 nebyl podroben zkoušce makrostruktury, vzhledem k nevyhovujícímu svaru.
- Vzorek č. 5



Obr. 71 Makrostruktura, vzorek č. 5



Obr. 72 Makrostruktura s geometrií, Vzorek č. 5

Vzhledem k faktu že pro náš případ není možné použít ultrazvukovou ani rentgenovou zkoušku bylo rozhodnuto o použití makroskopické kontroly svaru. Obecná pravidla pro makroskopickou zkoušku uvádí norma ČSN EN ISO 17639. Norma ČSN EN ISO 5817 pak poskytuje vztahy mezi velikostí jednotlivých vad a jejich přípustností dle stupně kvality. [43,53]

Na obrázcích č. 69 a 71 lze pozorovat, že svar je bez vad. Pro kontrolu byly do makrostruktury na obrázcích č. 70 a 72 doplněny původní rozměry úkosu včetně úhlu, rozevření v kořeni a výšky. Můžeme zde také sledovat zvýraznění zámku, který znemožní použití rentgenového a ultrazvukového zkoušení. Vidíme, že i symetrie svarů je dobrá

a můžeme tedy prohlásit, že vzorky jsou z hlediska makroskopické zkoušky vyhovující normě.

3.8 Finální zhodnocení svarů

Tab. 30 Finální hodnocení zkoušek svaru.

Vzorek č.	VT	PT	Makrostruktura	Vyhovuje / Nevyhovuje
1	X	✓	X	NEVYHOVUJE
2	✓	✓	X	NEVYHOVUJE
3	✓	✓	✓	VYHOVUJE
4	X	---	---	NEVYHOVUJE
5	✓	✓	✓	VYHOVUJE

První vzorky, které neuspěli v testování, byly vzorek č. 1 a vzorek č. 4. U těchto vzorků byla odhalena normou nepřípustná vada již během vizuálního zkoušení a to souvislý zápal. U vzorku č. 4 bylo rozhodnuto, i přes nepřípustnou vadu, provést penetrační i makroskopickou zkoušku za účelem zhodnocení povrchové bubliny a celkového stavu svaru.

Při penetrační zkoušce se všechny testované vzorky ukázali jako vyhovující. Zde je ovšem nutné poukázat na fakt, že penetrační zkouška neodhalila zápal ani pór, které byly viditelné již při vizuální zkoušce.

Makroskopická zkouška odhalila některé závažné vady spoje, které nebylo možné zkoumat vizuální ani penetrační zkouškou. U vzorku č. 1 jsme mohli pozorovat podpovrchové bubliny a to jak v místě dojezdu kořenové housenky, tak v místě dojezdu krycí housenky. Dále jsme u vzorku č. 1 odhalili přetečení svarového kovu. Důležitost makroskopické zkoušky ukázal vzorek č. 2. Zde jsme totiž oproti předešlým vyhovujícím zkouškám objevily závažné vady, především nepřípustný studený spoj, ale také nevyhovující geometrii svaru a přetečení.

V konečném důsledku zkoušení vyhověly dva vzorky a to vzorek č. 3 a č. 5. Parametry použité u těchto vzorků byly dále využity k sestavení WPS pro dané typy robotického svařování. Tyto svařovací postupy můžeme vidět v přílohách 1 a 2. Před finálním uzavřením projektu je ovšem žádoucí další testování a podrobení vzorků i dalším typům NDT a DT zkoušení, stejně jako nutné tlakové zkoušce.

4 TECHNOLOGICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Hlavním aspektem technologicko-ekonomického zhodnocení je v našem případě úspora svařovacího času využitím robotického svařování. Při současném stavu svařování ruční metodou MAG je přípravný čas určen na 23 min a svařovací čas na 18 min. K porovnání byly změřeny svařovací časy pro každou, robotem položenou, housenku u vzorků, které vyhověli požadovaným zkouškám, tedy vzorky č. 3 a č. 5. Tyto data vidíme v tabulkách č. 24 a č. 25. Prodleva mezi svařováním jednotlivých housenek byla stanovena na 30 s pro zajištění poklesu teploty. Přípravné časy svařování nejsou v našem případě směrodatné vzhledem k tomu, že v testovací fázi bylo nutné provést zhodnocení každé svarové housenky po svařování včetně pořízení fotografií. Záleží také na využitém přípravku a dalších okolnostech.

Tab. 31 Určení času svařování pro vzorek č. 3.

Vzorek č. 3	Rychlost svařování [m/min]	Čas svařování [s]
Vrstva č. 1	0,8	24
Vrstva č. 2	0,4	49
Vrstva č. 3	0,18	109
Prodleva	90 s = 1 min 30 s	
Celkový čas svařování	272 s = 4 min 32 s	

Tab. 32 Určení času svařování pro vzorek č. 5.

Vzorek č. 5	Rychlost svařování [m/min]	Čas svařování [s]
Vrstva č. 1	0,12	163
Vrstva č. 2	0,12	164
Vrstva č. 3	0,18	109
Prodleva	90 s = 1 min 30 s	
Celkový čas svařování	526 s = 8 min 46 s	

Z dat výše vyplývá poměrně vysoká úspora svařovacího času pro obě zvolené metody svařování. Jmenovitě 13,5 minuty pro metodu MAG a 8,5 minuty pro metodu MCAW. Jedná se tak o časovou úsporu až 75 % pro metodu MAG a 53 % pro metodu MCAW. Robotizace svařování sebou však přináší i další pozitiva jako například:

- Nižší provozní náklady.
- Vysokou přesnost a opakovatelnost po odlazení svařovacích parametrů.
- Možnost další automatizace dílčích úkonů.

ZÁVĚR

V první části práce byla vypracována rešerše zaměřující se na robotizaci svařování, konkrétně její možnosti a výhody. Dále byla určena specifika obloukového svařování tavnou elektrodou v ochranném plynu, včetně použitého materiálu a jeho svařitelnosti. Byly zde zdůrazněny parametry a specifika svařování, které mohou ovlivnit svařovací proces jako je přenos kovu v oblouku, funkce a vlastnosti ochranných plynů, techniky svařování a rozkyv. Dále byly definovány potřebné výpočetní vzorce pro stanovení některých svařovacích parametrů. Ve finální části byly uvedeny potřebné zkoušky svarového spoje, také zde byl uveden rozbor současného technologického postupu používaného firmou.

V experimentální části byly nejprve provedeny potřebné výpočty a definovány parametry zařízení použitých pro svaření zkušebních vzorků. Dále proběhlo zhodnocení dodaných vzorků a bylo rozhodnuto o nahrazení stehování víka vzorku jeho nalisováním. Byl zde také určen způsob kladení housenek a parametry použitého rozkyvu. Následně jsou definovány svařovací parametry použité pro svařované vzorky. Konkrétně se jedná o tři vzorky svařené metodou MAG a dva vzorky svařené metodou MCAW. Tyto vzorky byly po svaření podrobeny vizuální, penetrační a makroskopické zkoušce pro určení jejich přípustnosti a kvality. Tímto zkoušením prošly dva vzorky a to vzorek č. 3 svařen metodou MAG a vzorek č. 5 svařen metodou MCAW. Vzhledem k tomu, že požadavek firmy byl na studium proveditelnosti a i přes omezený počet vzorků bylo dosaženo požadovaných výsledků, můžeme svařování těchto dílců na robotu hodnotit jako proveditelné. Na základě dat získaných ze dvou úspěšně svařených vzorků byly následně sestaveny svařovací postupy, které byly doporučeny pro kvalifikaci firmě.

V poslední části práce bylo provedeno technologicko-ekonomické zhodnocení svařování na robotu vůči současnému ručnímu svařování. Toto hodnocení bylo zaměřeno hlavně na časové hledisko svařování, kde oproti současnému stavu vidíme až 75% úsporu času pro MAG svařování a 53% úsporu pro MCAW svařování. Vzhledem k výsledku experimentu a dalším výhodám, které robotizace svařování přináší, můžeme firmě doporučit zavedení robotického svařování do výroby. Samotné rozhodnutí firmy o zavedení svařovacího robotu pak ovšem záleží na mnoha dalších faktorech, jako jsou cenová nabídka externího dodavatele robotické buňky, roční počet vyrobených aktuátorů, či zavedení robotizace i dalších vyráběných dílců.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. DVOŘÁK, Milan. Technologie II. Vyd. 3., dopl., v Akademickém nakl. CERM 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2683-7
2. AMBROŽ, Oldřich. Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. Ostrava: ZEROSS, 2001. ISBN 80-85771-81-0.
3. Zhotovenie spoja medzi hliníkom a titánom. In: Engineering [online]. Slovensko: CB Media [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://www.engineering.sk/strojarstvo-extra/25017-zhotovenie-spoja-medzi-hlinikom-a-titanom
4. Welding Experts Solve the Challenges of Jobsite Productivity and Pipeline Integrity. In: North America energy pipelines [online]. USA: North American Energy Pipelines, c2023 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://www.napipelines.com/prime-connections/
5. Technologie svařování a zařízení: učební texty pro mezinárodní/europské svářečské inženýry a technology (I/EWE, I/EWT). Brno: Odbor svařování, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, 2016, 272 stran : ilustrace.
6. Robot: Jak funguje?. In: Kuka [online]. Kuka, c2023 [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: https://www.kuka.com/cs-cz/produkty,-slu%C5%BEby/robotick%C3%A9-syst%C3%A9my/robot-clanek
7. PALÁT, Hynek. Hydromotory a hydrogenerátory. In: SŠPU Opava [online]. Opava, 2011 [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: https://www.sspu-opava.cz/static/UserFiles/File/_sablony/SPS_III/VY_32_INOVACE_C-08-19.pdf
8. Přehled vlastností oceli S355J2. Bbolzano [online]. Kladno: Bolzano, 2020 [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: https://bbolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/tycove-oceli-uhlikove-konstrukcni-a-legovane/nelegovane-konstrukcni-oceli-podle-en-10025/prehled-vlastnosti-oceli-s355j2drive-s355j2g3
9. HYDRAULICS S.R.O. VÝROBNÍ KATALOG PŘÍMOČARÝCH HYDROMOTORŮ. Hydraulics [online]. Česko: Hydraulics, 2017 [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: https://www.hydraulics.cz/wcd/pdf/vyrobni_katalog_cz2017.pdf
10. Sub.cz: Oficiální webové stránky Slovácké strojírny, a.s. [online]. Uherský Brod [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: http://www.sub.cz/
11. Technické požadavky na konstrukce, výrobky, technická i technologická zařízení a stavby: technická konference 2018, 20. a 21. března 2018. 1. Brno: TESYDO, 2018. ISBN 978-80-87102-19-0.
12. MORAVEC, Jaromír. Svařování tavící se elektrodou v ochranném plynu –metody MIG/MAG. Docplayer [online]. Česko, 2017 [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: https://docplayer.cz/41120960-Svarovani-tavici-se-elektrodou-v-ochrannem-plynu-metody-mig-mag.html
13. HAVELKA, Pavel. MIG /MAG svařování. Automig [online]. Česko: Migatronic CZ [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: https://automig.cz/o-svarovani/metody/migmag-co2/
14. Návod k obsluze Invertorová svářečka PM-IMG-230T. In: Hobynaradi [online]. Zawiercie: POWERMAT, 2018 [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: https://www.hobynaradi.cz/downloader/?hash=ura9wwl87z
15. Obloukové svařování plněnou (trubičkovou) elektrodou. Schinkmann [online]. Česko, c2023 [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: https://www.schinkmann.cz/obloukove-svarovani-plnenou-trubickovou-elektrodou

16. SHARMA, Ramakant. 12 Different Types of Welding Processes. Cruxweld [online]. Indie, 2020 [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: https://www.cruxweld.com/blog/types-of-welding-processes/
17. Metal-cored Arc Welding Overview. Weldinginfo [online]. c2023 [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: https://www.weldinginfo.org/welding-processes/metal-cored-arc-welding-overview/
18. MIG/MAG svařovací drát G3Si1 1,0mm 5kg. Pantermax [online]. Česko, c2023 [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: https://www.pantermax.cz/MIG-MAG-svarovaci-drat-G3Si1-1-0mm-5kg-d60.htm
19. Svařovací drát Trubičkový samokrycí E71T-GS 0,9mm, 0,5kg/D100. Pantermax [online]. Česko, c2023 [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: https://www.pantermax.cz/Svarovaci-drat-Trubickovy-samokryci-E71T-GS-0-9mm-0-5kg-D100-d137.htm
20. BÖHM, Jiří. Svařovací roboty a manipulátory pro obloukové svařování pod ochrannými plyny. Praha: ČÚV komitétu pro svařování ČSVTS, 1981.
21. ELCOM, A.S. Infračervené kamery pro průmysl, vědu a výzkum. Elektroprumysl [online]. Česko, 2015 [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: https://www.elektroprumysl.cz/automatizace/infracervene-kamery-pro-prumysl-vedu-a-vyzkum
22. MÜLLER, Christopher, Werner KRAUS a Marina BILL. Presentation of World Robotics 2022: Prezentace. 1. Frankfurt: International federation of robotics, 2022.
23. TAPIOLA, Jaakko. Cold Metal Transfer cladding of wear and corrosion resistant coatings in engine applications. 2017/02/08. Dostupné z: doi:10.13140/RG.2.2.15573.52963
24. PIKUŁA, Janusz, Tomasz PFEIFER a Jerzy MENDAKIEWICZ. Influence of the shielding gas on the properties of VP MIG/MAG braze-welded joints in zinc coated steel sheets. 2014/01/01.
25. Na volbě ochranného plynu závisí kvalita svaru. Strojirenstvi.cz [online]. Česko: Messer Technogas, c2014-2023 [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: https://www.strojirenstvi.cz/na-volbe-ochranneho-plynu-zavisi-kvalita-svaru
26. Ceník Fronius z roku 2014. Pdfcoffee [online]. Rakousko: Fronius, 2014 [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: https://pdfcoffee.com/download/fronius-pricelist-2014-pdf-free.html
27. SRINIVASAN, D., P. SEVVEL, I. JOHN SOLOMON a P. TANUSHKUMAAR. A review on Cold Metal Transfer (CMT) technology of welding. Materials Today: Proceedings. 2022, 64, 108-115. ISSN 2214-7853. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.016Kolektiv autorů. Nové přístupy a aplikace EU směrnic, eurokódů I EN, ISO norem pro konstrukce stanovených výrobků a technických zařízení. 1. Brno: TDS Brno – SMS, 2010. ISBN 978-80-87102-05-3.
28. DEKKER, Cameron. What is Cold Metal Transfer Welding? Understanding It Thoroughly. Waterwelders [online]. USA, 2023 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://waterwelders.com/cold-metal-transfer-welding/
29. Submerged arc welding and fluxes. In: Ylflux [online]. Čína, c2015-2017 [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: http://www.ylflux.com/news/submerged-arc-welding-and-fluxes%20.html
30. SIGMUND, Marián. 4 Elektrický oblouk, zdroje, svařování ruční obalovanou elektrodou: Prezentace k přednášce z předěmtu Technologie svařování [online]. Brno [cit. 2023-05-25].
31. https://stavba.tzb-info.cz/ocelove-konstrukce/13744-ocel-pro-stavebni-ocelove-konstrukce

32. Značení ocelí. Ferona [online]. Česko, c2017 [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: https://online.ferona.cz/znaceni-oceli/?typ=4
33. FOLDYNA, Václav. Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. 2., upr. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001. ISBN 80-85771-85-3.
34. BARTÁK, Jiří. Výroba a aplikované inženýrství ve svařování: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. Ostrava: ZEROSS, 2000. ISBN 80-85771-72-1.
35. ČSN EN 1011-1. Svařování - Doporučení pro svařování kovových materiálů - Část 1: Všeobecná směrnice pro obloukové svařování. 1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
36. SIGMUND, Marián. 4 Teplotně-deformační cyklus, možnosti jeho ovlivňování, teplotní výpočty: Prezentace k přednášce z předmětu Teorie a technologie svařování [online]. Brno [cit. 2023-05-25].
37. ČSN EN 1011-2. Svařování - Doporučení pro svařování kovových materiálů - Část 2: Obloukové svařování feritických ocelí. 1 Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2002.
38. HLAVATÝ, Ivo a jií HRUBÝ. Technologičnost konstrukcí [online]. Ostrava, 2012 [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: https://projekty.fs.vsb.cz/459/ucebniopory/Technologicnost_konstrukci.pdf. Učební text. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.
39. SIGMUND, Marián. 8 Svařitelnost kovových materiálů. Svařitelnost C a C-Mn ocelí: Prezentace k přednášce z předmětu Teorie a technologie svařování [online]. Brno [cit. 2023-05-25].
40. SIGMUND, Marián 9 Svařitelnost mikrolegovaných, nízko avysoko legovaných ocelí: Prezentace k přednášce z předmětu Teorie a technologie svařování [online]. Brno [cit. 2023-05-25].
41. Úvod do problematiky svařování kvovů: Rafinace svarového kovu. In: Erasmus + [online]. Česko: sos-tremosnice, s. 9-19 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: http://moodle.sos-tremosnice.cz/pluginfile.php/8836/mod_resource/content/1/MODUL%20A%201%20%C3%9Avod%20do%20problematiky%20sva%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD%20kov%C5%AF_1%2011_Rafinace%20svarov%C3%A9ho%20kovu.pdf
42. ČSN EN ISO 5817. Svařování - Svarové spoje oceli, niklu, titanu a jejich slitin zhotovené tavným svařováním (kromě elektronového a laserového svařování) - Určování stupňů kvality. 1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
43. MÍŠEK, Bohumil. Metody nedestruktivního zkoušení kovových materiálů a výrobků. Brno: TESYDO, s.r.o, 2014, ISBN 978-80-87102-09-1.
44. ŠTORKÁN, Zdeněk. Problematika hodnocení svarových spojů. Konstrukce [online]. 2014 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: http://old.konstrukce.cz/clanek/problematika-hodnoceni-svarovych-spoju/
45. Visual And Optical Testing Service. In: Indiamart [online]. Indie, c2018-2023 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://www.indiamart.com/proddetail/visual-and-optical-testing-service-20003713012.html
46. KAPILÁRNÍ ZKOUŠENÍ. Weldinspect [online]. Česko, c2020 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://www.weldinspect.cz/kapilarni-zkouseni
47. TransPuls Synergic 3200 CMT. HBT WELD [online]. České Budějovice: HBT WELD, c2023 [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: https://hbt-weld.cz/produkty/transpuls-synergic-3200-cmt/

48. Návod k obsluze: VR 7000-CMT. Fronius [online]. Rakousko: Fronius [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: https://www.fronius.com/~/downloads/Perfect%20Welding/Operating%20Instructions/42%2C0426%2C0015%2CEN.pdf
49. Specifikace KR 5 arc HW. Kuka [online]. Německo: Kuka [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: https://www.kuka.com/-/media/kuka-downloads/imported/8350ff3ca11642998dbdc81dcc2ed44c/pf0012_kr_5_arc_hw_en.pdf
50. Weld G3Si1. ESAB [online]. Česko, c2023 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://esab.com/cz/eur_cs/products-solutions/product/filler-metals/mig-mag-wires-gmaw/mild-steel-wires/weld-g3si1/
51. Materiálový list: Megafil ® 710 M. Wirpo [online]. Brno, c2023 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://www.wirpo.cz/pridavne-materialy/produkty/176/
52. ČSN EN ISO 17635. Nedestruktivní zkoušení svarů - Obecná pravidla pro kovové materiály. 1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
53. ČSN EN ISO 23277. Nedestruktivní zkoušení svarů - Zkoušení kapilární metodou - Stupně přípustnosti. 1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
54. ČSN EN ISO 3452-1. Nedestruktivní zkoušení - Zkoušení kapilární metodou - Část 1: Obecné zásady. 1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021.
55. CRC Crick 110. In: Weldpoint [online]. Česko, c2023 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://www.weldpoint.cz/crc-crick-110/?gclid=Cj0KCQjwjryjBhD0ARIsAMLvnF_SnBYNP3ziCIKQssh4zlDYCPvRBUaJdub6Vl3rAvugYKTDqmqhDFcaAmxgEALw_wcB
56. Diffu-Therm BRE-2 Reiniger, halogenfrei. In: Reca [online]. Německo [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://www.reca.co.at/shop/en/products/Risspruefmittel-vyo0wf/Diffu-Therm-BRE-2-Reiniger-halogenfrei-2697000500000-1

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
k	Koeficient tepelné účinnosti použité metody svařování	[-]
T_{pCET}	Vliv chemického složení na teplotu předehřevu	[°C]
T_{pd}	Vliv tloušťky materiálu na teplotu předehřevu	[°C]
T_{pHD}	Vliv difuzního vodíku na teplotu předehřevu	[°C]
T_{pQ}	Vliv tepelného příkonu na teplotu předehřevuv	[°C]
T_p	Teplota předehřevu	[°C]
d	Tloušťka materiálu	[mm]
H_D	Obsah difuzního vodíku	[ml·100g^{-1}]
Q	Množství tepla přivedeného do svaru na jednotku délky	[kJ · mm^{-1}]
v	Rychlost svařování	[mm· s^{-1}]
σ_{sv}	Napět působící ve svaru	[MPa]
σ_d	Dovolené napětí	[MPa]
α	převodní součinitel typu svařování	[-]

Označení	Legenda
CMT	Cold metal transfer
CET	Uhlíkový ekvivalent dle varantního výpočtu
CE	Uhlíkový ekvivalent dle varantního výpočtu
NDT	Nedestruktivvní zkoušení
DT	Destruktivní zkoušení
TOO	Tepelně ovlivněná oblast svaru
CO_2	Oxid uhličitý
Ar	Argon
O2	Kyslík
C	Uhlík
Mn	Mangan
Cr	Chrom
Mo	Molybden
Ni	Nikl
Cu	měď
MAG	Obloukové svařování tavící se elektrodou v aktivním plynu
MIG	Obloukové svařování tavící se elektrodou inertním plynu
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci
FCAW	Svařování plněnou elektrodou
MCAW	Svařování elektrodou plněnou kovovým práškem
ČSN	Česká státní norma
EN	Evropská norma

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 WPS pro metodu MAG (135)
Příloha 2 WPS pro metodu MCAW (138)

SEZNAM VÝKRESŮ

Svařovací výkres pro řešený svar. 23-DP-201608-01

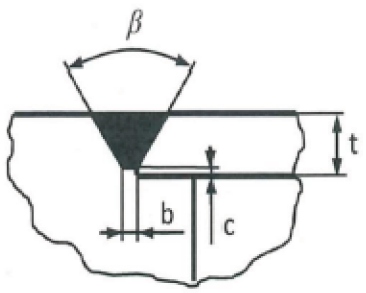
Specifikace postupu svařování "pWPS" dle ČSN EN ISO 15609-1

Strana	1
Celkem	1
Revize číslo:	-

1. Výrobce: **Slovácké strojírny, a. s., Nivnická 1763, 68801 Uherský Brod**

2.	Místo:	SUB	10.	Způsob přípravy sv. ploch:	opracování, broušení	
3.	Číslo WPS:	1.2_1.2_135a	11.	Způsob čištění sv. ploch:	odmaštění, kartáčování	
4.	Číslo WPQR:	-	12.	Základní materiál:	materiál 1	materiál 2
5.	Číslo výkresu:	680291		ČSN EN 10027-1	S355J2N	S355J2N
6.	Kvalifikace svářeče:	-		CEN ISO/TR 15608	sk. 1.2	sk. 1.2
7.	Metoda svařování:	135	13.	Tloušťka [mm]:	t1 = 40,0	t2 = 8,0
8.	Typ spoje:	BW	14.	Vnější průměr [mm]:	-	
9.	Příprava svarových ploch:	ISO 9692-1	15.	Poloha svařování:	PA	

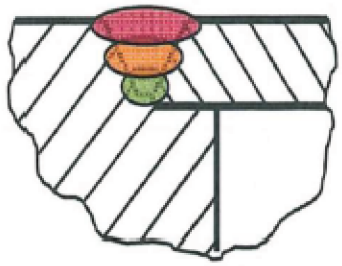
16. Tvar spoje



17. Rozměry

h [mm]	-
a [mm]	-
b [mm]	2-3
c [mm]	1-2
β [°]	60

18. Postup svařování



19. Parametry svařování

20.	Číslo svarové housenky:	1	2	3			
21.	Metoda svařování:	135	135	135			
22.	Průměr příd. materiálu [mm]-ø:	1,0	1,0	1,0			
23.	Svařovací proud [A]:	210-220	170-180	110-120			
24.	Svařovací napětí [V]:	26-27	24-25	21-22			
25.	Typ proudu a polarita:	DC [+]	DC [+]	DC [+]			
26.	Přenos kovu:	Impulzní	Impulzní	Impulzní			
27.	Rychlost posuvu drátu [$m.min^{-1}$]:	14,5-15	14-14,5	13,5-14			
28.	Rychlost svařování [$mm.s^{-1}$]:	7,5-8,3	6,7-7,5	5,8-6,7			
29.	Vnesené teplo [$J.cm^{-1}$]:	2,2	2,5	2,4			

30.	Přídavný materiál - třída a označení:	ČSN EN ISO 14341-A: G 3Si1			
31.	Způsob sušení:	-	40.	Typ podložky:	-
32.	Ochrana/Tavidlo:	ISO 14175 M21	41.	Výlet drátu [mm:	15
	Ochranný plyn [$l.min^{-1}$]:	12-17		Oscilace: aplituda, frekvence, prodleva:	
	Ochrana kořene [$l.min^{-1}$]:	-		Rozkyv [mm]:	10-12
33.	Wolframová elektroda:	- -	42.	Informace o pulsním svařování:	2 takt
34.	Broušení/Podložení kořene:		43.	Podrobnosti plasmového svařování:	-
35.	Teplota předehřevu [°C]:	-	44.	Úhel sklonu hořáku:	12°
36.	Teplota interpass [°C]:	max. 350	45.	Mechanické a automatické svařování: ANO	
37.	Tepelné zpracování/Stárnutí:	-			
38.	Čas, teplota, proces:	-	46.	Drážkování svaru:	-
39.	Rychlost ohřevu/Ochlazování:	-	47.	Poznámky:	

48. Zpracoval: Ing. Marian Sigmund, IWE 21.4.2022	49. Zkontroloval: -
50. Datum, Jméno, Podpis a Razítko svářečského dozoru	50. Datum, Jméno, Podpis a Razítko svářečského dozoru

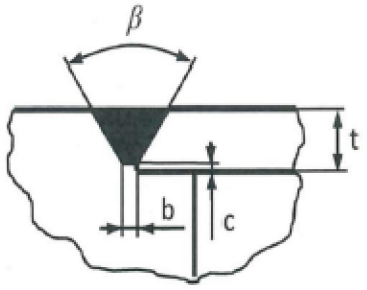
Specifikace postupu svařování "pWPS" dle ČSN EN ISO 15609-1

Strana	1
Celkem	1
Revize číslo:	-

1. Výrobce: **Slovácké strojírny, a. s., Nivnická 1763, 68801 Uherský Brod**

2.	Místo:	SUB	10.	Způsob přípravy sv. ploch:	opracování, broušení	
3.	Číslo WPS:	1.2_1.2_138a	11.	Způsob čištění sv. ploch:	odmaštění, kartáčování	
4.	Číslo WPQR:	-	12.	Základní materiál:	materiál 1	materiál 2
5.	Číslo výkresu:	680291		ČSN EN 10027-1	S355J2N	S355J2N
6.	Kvalifikace svářeče:	-		CEN ISO/TR 15608	sk. 1.2	sk. 1.2
7.	Metoda svařování:	138	13.	Tloušťka [mm]:	t1 = 40,0	t2 = 8,0
8.	Typ spoje:	BW	14.	Vnější průměr [mm]:	-	
9.	Příprava svarových ploch:	ISO 9692-1	15.	Poloha svařování:	PA	

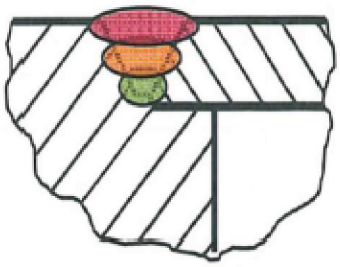
16. Tvar spoje



17. Rozměry

h [mm]	-
a [mm]	-
b [mm]	2-3
c [mm]	1-2
β [°]	60

18. Postup svařování



19. Parametry svařování

20.	Číslo svarové housenky:	1	2	3			
21.	Metoda svařování:	138	138	138			
22.	Průměr příd. materiálu [mm]-ø:	1,0	1,0	1,0			
23.	Svařovací proud [A]:	190-200	180-190	110-120			
24.	Svařovací napětí [V]:	24-25	23-24	21-22			
25.	Typ proudu a polarita:	DC [+]	DC [+]	DC [+]			
26.	Přenos kovu:	Impulzní	Impulzní	Impulzní			
27.	Rychlost posuvu drátu [$m.min^{-1}$]:	9,5-10	9-9,5	8,5-9			
28.	Rychlost svařování [$mm.s^{-1}$]:	5,8-6,7	5,0-5,8	1,8-2,4			
29.	Vnesené teplo [$J.cm^{-1}$]:	0,57	0,52	0,67			

30.	Přídavný materiál - třída a označení:	ČSN EN ISO 17632-A: T46 6 M M21 1 H5			
31.	Způsob sušení:	-	40.	Typ podložky:	-
32.	Ochrana/Tavidlo:	ISO 14175 M21	41.	Výlet drátu [mm:	17
	Ochranný plyn [$l.min^{-1}$]:	15-20		Oscilace: aplituda, frekvence, prodleva:	
	Ochrana kořene [$l.min^{-1}$]:	-		Rozkyv [mm]:	12-15
33.	Wolframová elektroda:	- -	42.	Informace o pulsním svařování:	2 takt
34.	Broušení/Podložení kořene:		43.	Podrobnosti plasmového svařování:	-
35.	Teplota předehřevu [°C]:	-	44.	Úhel sklonu hořáku:	12°
36.	Teplota interpass [°C]:	max. 350	45.	Mechanické a automatické svařování: ANO	
37.	Tepelné zpracování/Stárnutí:	-			
38.	Čas, teplota, proces:	-	46.	Drážkování svaru:	-
39.	Rychlost ohřevu/Ochlazování:	-	47.	Poznámky:	

48. Zpracoval: Ing. Marian Sigmund, IWE 28.4.2022	49. Zkontroloval: -
50. Datum, Jméno, Podpis a Razítko svářečského dozoru	50. Datum, Jméno, Podpis a Razítko svářečského dozoru