



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav strojírenské technologie

Návrh svařovacího procesu metodou MAG pro výrobu podvozkového dílu automobilu

Manufacturing process proposal of MAG welding for the production of chassis part

Diplomová práce

Studijní program: Strojní inženýrství

Studijní obor: Výrobní a materiálové inženýrství

Vedoucí práce: Ing. Karel Kovanda, Ph.D., IWE

2020

Bc. Zdeněk Horák

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Horák** Jméno: **Zdeněk** Osobní číslo: **438627**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Návrh svařovacího procesu metodou MAG pro výrobu podvozkového dílu automobilu

Název diplomové práce anglicky:

Manufacturing process proposal of MAG welding for the production of chassis part

Pokyny pro vypracování:

1. Popis technologie svařování se zaměřením na metodu MAG.
2. Problematika automatizovaného svařování a okrajových podmínek, které na svařovací proces mají vliv.
3. Popis a analýza stávajícího procesu svařování daného dílu (materiál, technologické parametry atd.).
4. Návrh možných variant zvýšení produktivity za účelem dosažení požadavků pro díl při dodržení daných norem současně se zachováním/zkrácením času výroby.
5. Výběr a doporučení vhodného řešení.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svařečských inženýrů a technologů. Ostrava, 2001. ISBN 80-85771-85-3.
[2] MUSIL, Miloslav a Jaromír MORAVEC. Výroba a aplikované inženýrství ve svařování: výukové materiály pro kurzy IWE,IWT Česká Třebová: DOM-ZO 13, 2017. ISBN 978-80-906720-0-0
[3] KOUKAL, Jaroslav. Svařování ocelových konstrukcí. Ostrava: Česká asociace ocelových konstrukcí, 2010. ISBN 978-80-904535-4-8.
[4] MESSLER, Robert W. A practical guide to welding solutions: overcoming technical and material-specific issues. Weinheim: Wiley-VCH, 2019. ISBN 978-3-527-34543-4.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

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

Datum zadání diplomové práce: **30.12.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **31.07.2020**

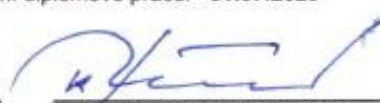
Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2020**



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



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



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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

16. 6. 2020

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Čestné prohlášení:

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci na téma **Návrh svařovacího procesu metodou MAG pro výrobu podvozkového dílu automobilu** vypracoval samostatně a veškeré literární prameny a zdroje informací, které jsem použil, cituji a uvádím v seznamu použité literatury a zdrojů informací.

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

V Praze dne

.....

Podpis

Poděkování:

Tímto děkuji Ing. Karlovi Kovandovi, Ph.D., IWE za cenné rady a konzultace při vypracovávání této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat společnosti Mubea, spol. s.r.o., a to především oddělení systémových komponentů ve výrobním závodu Žebrák v čele s Petrem Jelínkem za poskytnuté materiály a konzultace. Mé poděkování patří také rodině a blízkým za podporu při psaní práce.

ANOTACE

Diplomová práce se zabývá úpravou svařovacího procesu metodou MAG robotizovaného svařování Panhardovy tyče. Na základě popisu a analýzy stávajícího procesu svařování daného dílu navrhuje možné varianty zvýšení kvality svarových spojů. V práci jsou zároveň popsány základy a principy technologie obloukového svařování v ochranné atmosféře aktivního plynu MAG. Podrobně je zpracována i problematika zajištění svařovacího procesu včetně okrajových podmínek, které na automatizované svařování mají vliv. Výsledkem práce jsou doporučení vedoucí ke zvýšení produktivity výroby daného dílu.

ANOTATION

This master's thesis deals with the modification of the robotized MAG (GMAW) welding process for the production of Panhard rod. Based on the description and analysis of the existing welding process of the part, it proposes possible variants to increase the quality of welded joints. The thesis also describes the basics and principles of gas metal arc welding MAG (GMAW). The issue of ensuring the welding process, including the boundary conditions that affect automated welding, is also elaborated in detail. The result of the work are recommendations to increase productivity of production of the part.

KLÍČOVÁ SLOVA

Obloukové svařování, MAG svařování, svařovací proces, robotizované svařování.

KEY WORDS

Arc welding, MAG welding, welding process, welding automation.

Obsah

1 ÚVOD.....	8
TEORETICKÁ ČÁST	9
2 SVAŘOVÁNÍ	9
2.1 TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ	9
2.1.1 Z HISTORIE AŽ PO SOUČASNOST	10
2.1.2 SOUČASNÉ TRENDY	11
2.1.3 ZÁKLADNÍ POJMY	11
2.1.4 OZNAČOVÁNÍ SVARŮ NA VÝKRESE	13
2.2 SVAŘOVÁNÍ ELEKTRICKÝM OBLOUKEM	14
2.2.1 ELEKTRICKÝ OBLOUK A JEHO VLASTNOSTI	14
2.2.2 ZDROJE PRO SVAŘOVÁNÍ ELEKTRICKÝM OBLOUKEM	20
2.3 SVAŘOVÁNÍ METODOU MAG	21
2.3.1 OCHRANNÉ PLYNY.....	22
2.3.2 MODERNÍ FUNKCE SVAŘOVACÍCH ZDROJŮ	23
2.3.3 PRACOVNÍ CYKLUS SVAŘOVACÍHO ZDROJE	25
3 ZAJIŠTĚNÍ SVAŘOVACÍHO PROCESU	27
3.1 ÚVOD.....	27
3.1.1 PROBLÉMY VE SVAŘOVACÍM PROCESU	27
3.1.2 SVAŘITELNOST	29
3.1.3 LOGICKÉ TRŽDĚNÍ PROBLÉMŮ	31
3.2 AUTOMATIZOVANÉ SVAŘOVÁNÍ	33
3.3 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ KVALITU SVARU	35
3.3.1 VLIV CHEMICKÉHO SLOŽENÍ OCELÍ NA JEJICH SVAŘITELNOST	35
3.3.2 PŘÍDAVNÝ MATERIÁL	36
3.3.3 OCHRANNÝ PLYN	37
3.4 OKRAJOVÉ PODMÍNKY VSTUPUJÍCÍ DO PROCESU SVAŘOVÁNÍ.....	38
3.5 ZAJIŠTĚNÍ KVALITY PROCESU SVAŘOVÁNÍ	40

3.6	ŘÍZENÍ KVALITY V PRŮBĚHU VÝROBY	42
	PRAKTICKÁ ČÁST.....	44
4	VÝROBEK A JEHO TECHNOLOGIE VÝROBY.....	44
4.1	MUBEA, SPOL. S.R.O.	45
4.1.1	SVAŘOVÁNÍ VE VÝROBNÍM PROCESU FIRMY MUBEA.....	47
4.1.2	VÝROBEK – PANHARDOVA TYČ.....	48
4.2	ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU VÝROBY DANÉHO DÍLU	49
4.2.1	POLOTOVAR	49
4.2.2	VÝROBNÍ ZAŘÍZENÍ	52
4.2.3	TECHNOLOGICKÉ FAKTORY.....	57
4.2.4	TECHNOLOGICKÝ POSTUP OPERACE SVAŘOVÁNÍ	59
5	NÁVRH ŘEŠENÍ	64
5.1	ZKOUŠKY	64
5.1.1	NORMY.....	64
5.1.2	METALOGRAFICKÉ VZORKY	67
5.2	OVĚŘENÍ VHODNÉHO NASTAVENÍ TECHNOLOGICKÉHO PROCESU	71
5.2.1	NASTAVENÍ POLOHY SVAŘOVACÍHO HOŘÁKU	73
6	VYHODNOCENÍ.....	75
6.1	NÁVRHY MOŽNÝCH VARIANT	76
7	ZÁVĚR.....	78
	CITOVANÁ LITERATURA	79
	SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A PŘÍLOH.....	83

1 Úvod

Předmětem této diplomové práce je svařovací proces využívající metodu obloukového svařování v ochranné atmosféře aktivního plynu MAG. Zmíněný proces užívá firma **Mubea, spol. s.r.o.** (dále jen Mubea) pro výrobu podvozkového dílu s názvem Panhardova tyč. Na základě problémů s konečným výrobkem bylo ze strany firmy Mubea stanoveno v tomto konkrétním svařovacím procesu několik nedostatků vhodných pro řešení v rámci diplomové práce. Díl se nacházel ve stavu předsériové výroby s plánovaným objemem výroby přibližně 100 kusů. Zamýšlená sériová výroba předpokládala vyrobit 170 000 kusů ročně.

Obloukové svařování v ochranné atmosféře aktivního plynu MAG je dnes (společně s metodou MIG využívající plynu inertního) nejčastěji používanou metodou svařování pro spojování běžných druhů materiálů (uhlíková ocel apod.) v rámci běžné výroby, např. v automobilovém průmyslu. Ačkoliv jde o známou a často aplikovanou metodu svařování, může celý svařovací proces využívající této metody vykazovat řadu nedostatků způsobujících problémy ve výrobním procesu, nebo problémy s konečným výrobkem. Takové problémy zpravidla souvisí se stavem konkrétního svaru, přesněji jeho nevyhovující nebo nepřijatelnou podobou. Že je svar nevyhovující, se zjistí provedením destruktivních zkoušek svaru (někdy postačí i nedestruktivní zkoušky) a následným vyhodnocením výsledků dle norem, které mají dané svary splňovat.

Cílem diplomové práce je na základě popisu a analýzy stávajícího procesu svařování daného dílu navrhnout možné varianty zvýšení produktivity za účelem dosažení požadavků pro díl při dodržení daných norem současně se zachováním/zkrácením času výroby. V rámci rešeršní části je dílčím cílem popsat samotnou metodu obloukového svařování se zaměřením na metodu využívající ochranné atmosféry aktivního plynu a zároveň nastínit problematiku automatizovaného svařování včetně okrajových podmínek, které na svařovací proces mají vliv. Výsledkem se předpokládá výběr a doporučení vhodného řešení.

Teoretická část

2 Svařování

2.1 Technologie svařování

Svařování je spojování jednotlivých součástí a dílů v nerozebíratelný celek. Jde tedy o nerozebíratelnou metodu spojování materiálů. Jeho podstatou je vytvoření *metalurgického spojení*, tj. spojení založené na působení meziatomárních vazebných sil, které jsou příčinou soudržnosti a pevnosti kovů. Vytvoření svarového spoje je podmíněné vynaložením určité energie, která může být mechanická, tepelná nebo mechanicko-tepelná. Zásadním předpokladem pro vytvoření kvalitního spoje požadovaných vlastností je použití svařitelných materiálů a vhodná volba způsobu a postupu svařování. [1], [2]

„Cílem svařování je vytvořit spojení určitých částí povrchů dvou nebo více dílů, tak, aby vzniklý spoj vykazoval vlastnosti, které jsou požadovány nebo vyhovují provozním podmínkám.“ [2]

Svařování rozdělujeme z hlediska způsobu vynaložené energie na [1]:

- Svařování **tlakem** - dochází ke spojení základního materiálu vyvoláním plastické deformace obou stykových ploch tlakem nebo rázem tak, aby byly uplatněny vzájemné vazebné meziatomové síly. Tento postup lze u měkkých kovů provést za studena.
- Svařování **tavné** - dochází ke spojení kovových částí místním roztavením svarových ploch, jejich slitím a ztuhnutím.

Technologie svařování zdaleka nezaujímá největší zastoupení mezi všemi strojírenskými technologiemi, rozhodně však zpracovává téměř největší objem kovových materiálů, a to jak materiálů tvářených, tak i materiálů litých. Celkově zpracovává více jak 26 % kovových materiálů. O svařování lze říct, že má interdisciplinární charakter, protože pro jeho zvládnutí je zapotřebí znalostí z celé řady vědních oborů, jako jsou například matematika, fyzika, chemie, fyzikální chemie a metalurgie, nauka o materiálech atd. [3]

Vzhledem k neustálému vývoji technologií svařování, existuje dnes k výběru více než 75 typů svařovacích procesů. Důvodem, proč jich je tolik, jsou výhody a nevýhody každého jednotlivého typu svařovacího procesu pro danou aplikaci. Úvodem je vhodné zmínit například, že výhody obloukového svařování tkví ve vcelku jednoduché manipulovatelnosti a nízkých nákladech, na druhou stranu je zase relativně pomalé a závislé na značném množství přísunu tepla k vytvoření svaru. Oproti tomu procesy využívající vysoké koncentrované energie, kam patří laserové svařování, produkují nízké přísuny tepla současně s vysokou rychlostí svařování. Jeho nevýhodou je zase finanční nákladnost vybavení, které společně s nastavením celého procesu musí být téměř dokonalé. [4]

2.1.1 Z historie až po současnost

Ačkoliv bylo svařování slitin železa objeveno kolem roku 1000 př.n.l., první případy použití této technologie sahají až do doby bronzové, kdy se ale jednalo pouze o svařování kovářské. Jednalo se o jedinou metodu svařování až do začátku 19. století. Šlo o spojování materiálu „v ohni“ tlakem, kterým se vyráběly drátěné košile, zbraně, šperky a různé užité předměty. V 19. století se pak objevilo svařování ve formě, ve které ho známe z dnešní doby. První používanou metodou bylo svařování a řezání plynem, jehož rozvoj byl podmíněn objevem acetylénu (1836). [1], [2]

Svařování elektrickým obloukem bylo použito později (1881). Roku 1885 patentovali Benardos a Olewsky svařování uhlíkovými elektrodami. Slavjanov (1888) a Coffin (1890) zase nezávisle na sobě patentovali svařování elektrickým obloukem za použití kovové elektrody. První obalované elektrody vznikly roku 1890 ve Velké Británii, avšak ty podobné těm dnešním se objevily přibližně o dvacet let později. Obaly byly tvořené směsí oxidů a křemičitanů. Odporové svařování (bodové, švové, výstupkové a na tupo) bylo patentováno Thompsonem (1885-1890). [1]

Roku 1920 vynalezl Nobel automatické svařování a navařování. Zároveň se začínalo experimentovat se svařováním v různých plynech, kdy se např. patentovalo svařování v ochranné atmosféře argonu a helia. Tento svařovací postup byl dále vyvíjen, až se v roce 1948 začal místo elektrod používat drát. Ljubavskij a Novošilov (1953) vyvinuli technologii svařování v atmosféře CO₂, která byla dále zlepšována koncem padesátých let. V roce 1957 bylo Gagem vynalezeno plazmové svařování a Stohrem předvedeno svařování elektronovým paprskem ve vakuu. [1]

2.1.2 Současné trendy

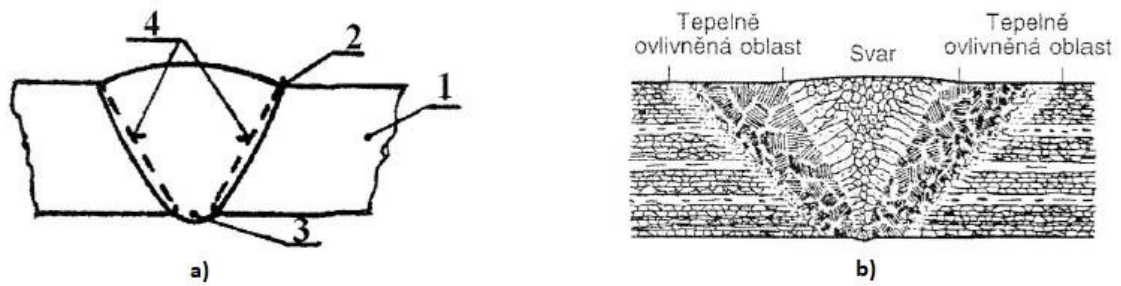
Celý technický a technologický pokrok ve svařování, obdobně jako u dalších technologií, souvisí s pokrokem ve svých příbuzných vědních a průmyslových oborech. Dnes jde hlavně o nové poznatky v oblasti automatizace, robotiky a sensoriky. Aktuální trendy ve svařování spočívají především v digitalizaci technologických procesů, což i každoročně potvrzují ty největší mezinárodní veletrhy svařování. Jedním z nich je například německý „Schweissen & Schneiden“ konající se v Düsseldorfu. Je třeba podotknout, že velký kus cesty urazil také vývoj zařízení a pomůcek ke zlepšení pracovního prostředí a bezpečnosti práce. To je u svařování obzvlášť důležité. [5]

Vedle speciálních metod spojování, jako je třecí svařování s promíšením, laserové svařování aj., nabývá dnes stále většího významu technologie lepení, a to i navzdory tomu, že jde o úplně jiný druh spojení materiálů. Jeho velká výhoda spočívá v možnosti spojení různých druhů materiálů. Další hojně se rozvíjející oblastí průmyslu je 3D tisk kovových materiálů, kde se používá alternativa navařování samonosných 3D struktur, např. metodou WAAM (Wire+Arc Additive Manufacturing). Přesto jsou celosvětově nejvíce rozšířeny a používány konvenční technologie svařování elektrickým obloukem v ochranných atmosférách, zejména metody MIG/MAG, které se staly dominantními už koncem 90. let. [5]

2.1.3 Základní pojmy

Výběr ze základních pojmů důležitých pro teorii svařování [1], [2]:

- **Základní materiál** – materiál, který je svařován. Je charakteristický chemickým složením, stavem struktury a tloušťkou svařovaného materiálu.
- **Přídavný materiál** – materiál, který se přidává do svarové lázně během svařovacího procesu (elektrody, dráty, tyčinky, pásky, tavidla).
- **Svarová lázeň** – okamžitý objem roztaveného základního kovu (a přídavného materiálu) v místě svařování, který postupně tuhne a chladne, až svarový kov vytváří **svar – svarovou housenku**.
- **Svarové plochy** – části plochy základního materiálu, které jsou při svařování nataveny až po hranici závaru (při tlakovém svařování se jedná o plochy stykové).
- **Svarový spoj** - tvořen vlastním svarem a *tepelně ovlivněnou oblastí* (Obr. 2.1).



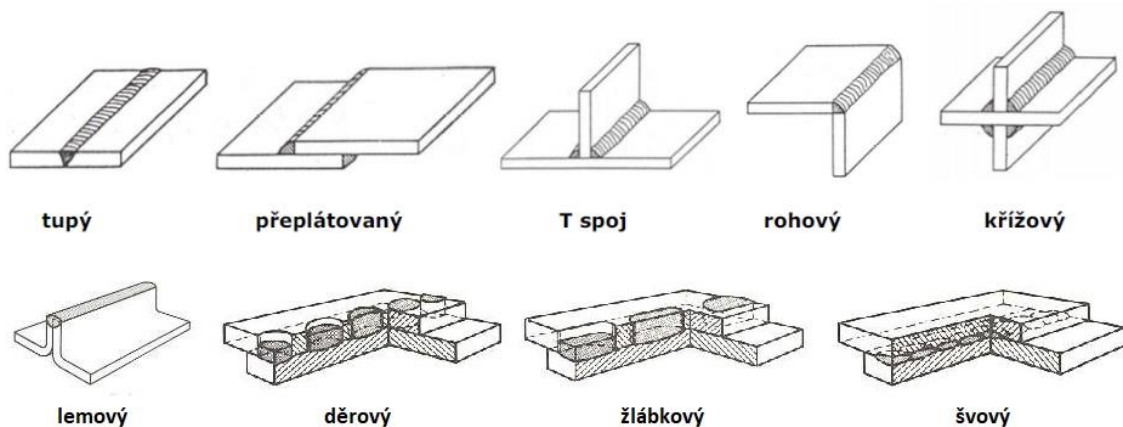
Obr. 2.1 a) Schéma V svaru (1-svařovaný materiál, 2-hranice závaru, 3-kořen svaru, 4-svarové plochy), b) Svar a tepelně ovlivněná oblast [1]

- **Svarové spoje se dělí podle:**

- polohy průřezu svaru vzhledem k zátěžným silám - čelní, boční a šikmé;
- účelu použití - stehové, těsnící, nosné a kombinované;
- tvaru svaru - tupé (I, V, X, U...), koutové (T, rohové, přeplátované), lemové, děrové, žlábkové, bodové, švové atd.

- **Svařitelnost** – schopnost materiálu vytvořit zdravý svarový spoj požadovaných vlastností. Jde o komplexní charakteristiku materiálu určující za daných podmínek vhodnost pro vytvoření spoje předepsané kvality.

- **Technologičnost** – souhrn požadavků, kterým musí svařovaná konstrukce vyhovět, aby se dala hospodárně vyrobit a měla požadovanou způsobilost a životnost. Vychází se z konstrukčního, technologického a ekonomického hlediska.

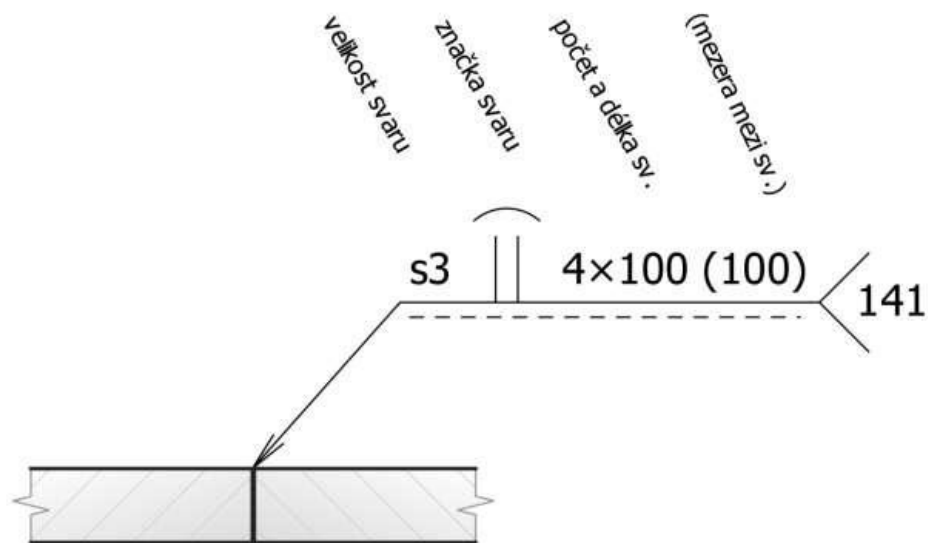


Obr. 2.2 Druhy svarů [2]

2.1.4 Označování svarů na výkrese

Zobrazování svarových a pájených spojů na výkresech popisuje norma ČSN EN ISO 2553. Značení svarů na výkrese tvoří [2]:

- základní značka svaru,
- doplňková značka svaru,
- údaj o rozměru spoje,
- doplňující údaje (metoda, druh elektrody, ochranný plyn, stupeň kvality spoje, apod.).



Obr. 2.3 Způsob označování svarů [2]

Svar	Zobrazení	Značka	Svar	Zobrazení	Značka	Svar	Zobrazení	Značka
I			W		W	švový		
V		V	U		Y	bodový		
1/2 V		∨	1/2 U		∩	děrový		
Y		Y	lemový		JL	oblý V		
1/2 Y		Y	koutový		△	oblý 1/2 V		

Obr. 2.4 Základní značky svarů [6]

2.2 Svařování elektrickým obloukem

2.2.1 Elektrický oblouk a jeho vlastnosti

Elektrický oblouk prvně popsal v roce 1801 Angličan Humphry Davy, který jeho plnohodnotnou ukázkou demonstroval roku 1808. [7] Elektrický oblouk využitelný ve svařování je nízkonapěťový elektrický vysokotlaký výboj, který hoří v prostředí ionizovaného plynu. Jedná se o výboj kruhového průřezu o průměru přibližně 0,1 až 1 cm a o délce asi 2 až 7 mm. Stabilně hoří, pokud je napětí dostatečné pro ionizaci daného prostředí a proudu udržujícího plazma oblouku v ionizovaném stavu. Tento oblouk je charakteristický malým anodovým úbytkem napětí, malým potenciálem na elektrodách, proudem v řádech jednotek až tisíce ampér, velkou proudovou hustotou katodové skvrny a intenzivním vyzařováním světelného záření z elektrod i sloupce oblouku společně s intenzivním vyzařováním UV záření. Fyzikální a metalurgické děje probíhají v oblouku velmi rychle a za vysokých teplot. [3], [8]

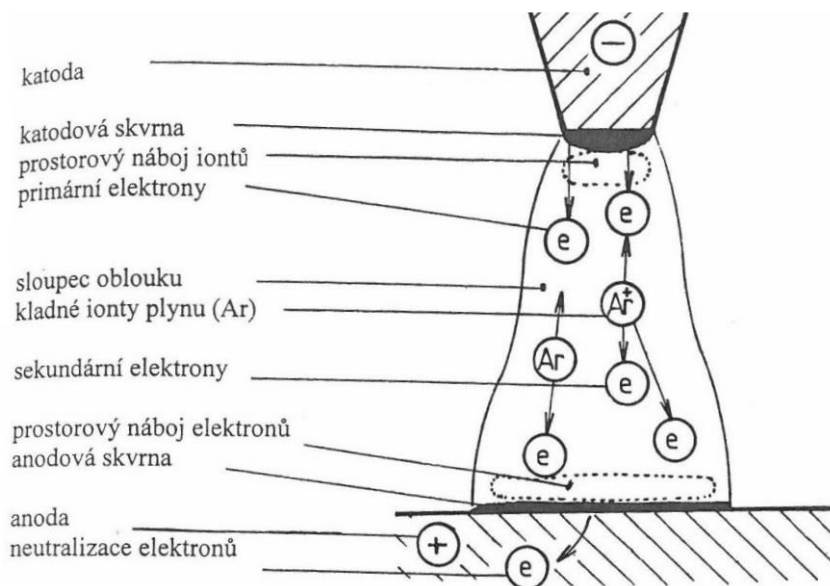
Zapálení oblouku

K zapálení oblouku dochází při napětí zdroje naprázdno a pro běžné metody svařování je charakteristická hodnota $U = 10 \div 50$ V na oblouku. Svařovací proud v rozmezí $I = 10 \div 2000$ A. Zapálení oblouku se provádí několika způsoby [3]:

- 1) Krátkodobým dotykem elektrody a základního materiálu při nastaveném svařovacím proudu. (MMA, SAW, MIG/MAG)
- 2) Vysokonapěťovým vysokofrekvenčním ionizátorem se zapálí na vzdálenost několika milimetrů elektrická jiskra, která ionizuje plynné prostředí výbojem. (WIG)
- 3) Dotykovým zapalováním tzv. startovacím proudem. (TIG, MMA)

Základní oblasti elektrického oblouku

Oblouk lze rozdělit na základní oblasti (Obr. 2.5), které se nejlépe popisují na stejnosměrném oblouku hořícím mezi wolframovou elektrodou a základním materiálem v ochranném prostředí argonu (stabilní bez změny napětí i proudu). Pozn.: Při střídavém proudu oblouk zhasíná při každém průchodu nulou a je znovu zapalován při opačné polaritě elektrod. [3]



Obr. 2.5 Části elektrického oblouku [3]

Hlavními a základními oblastmi elektrického oblouku jsou [3]:

- a) **Katodová skvrna** je ostře ohraničená oblast emitující prvotní elektrony důležité pro zapálení oblouku a ionizaci plynného prostředí. Její teplota není stálá a pohybuje se v rozmezí 2400 až 3000 °C (zvyšuje se s růstem proudu). Proudová hustota je velmi vysoká a dosahuje 1000 až 1500 A.mm⁻².
- b) **Sloupec oblouku** znamená zářivě svítící oblast disociovaného a ionizovaného plynu ve formě plazmy mezi elektrodami, která dosahuje vysokých teplot. Elektrická vodivost sloupce je zapříčiněna přítomností elektronů a aniontů, které vznikají v důsledku termodynamických jevů ve sloupci:
 - *disociace* – molekuly, které jsou při normální teplotě dvouatomové (nebo složitější), se rozpadají na jednotlivé atomy,
 - *ionizace* – atom se rozpadá na záporný elektron a kladný zbytek atomu (kladný iont),
 - *excitace* – zvýšení kinetické energie elektronu a jeho přejítí na vyšší energetickou hladinu (nestabilní jev), po čase přejde zpět na původní hladinu (orbit) a vyzáří kvantum energie (se stoupající teplotou roste podíl UV záření),
 - *rekombinace* – kladné ionty a záporné elektrony se opět spojí v neutrální atomy a ty pak v molekuly.

Maximální teplota závisí především na počtu srážek částic v oblouku (dáno intenzitou proudu a hodnotou napětí) a na prostředí oblouku, které určuje stupeň disociace a ionizace v závislosti na teplotě (např. 90% disociace se dosáhne u CO₂

při 3800 K). Disociační a ionizační energie složek plazmatu se v okrajových částech oblouku uvolňuje a technologicky se tak využívá ke svařování.

- c) **Anodová skvrna** neutralizuje a odvádí dopadající záporné částice. Kinetická energie částic se mění na tepelnou a z části i na elektromagnetické záření. Její teplota se pohybuje v rozmezí 2700 až 3600 °C a většinou dosahuje teploty varu svařovaných materiálů. Uvolňuje se v ní větší tepelný výkon než v katodové oblasti a má větší plochu než katodová skvrna.

Celý proces hoření elektrického oblouku probíhá tak, že termicky emitované elektrony (z katody) získají v oblasti katodového úbytku napětí velkou energii, díky které jsou schopny při srážkách ionizovat neutrální atomy na kladné ionty a sekundární elektrony. Na anodě se pak mění kinetická energie dopadajících částic na energii tepelnou a z části i na elektromagnetické záření. Na katodovou skvrnu dopadají kladné ionty, které se na povrchu neutralizují a předávají svoji ionizační energii přispívající k termoemisi elektronů. [8]

Teplota elektrického oblouku

Elektrický oblouk je při svařování intenzivním zdrojem tepla, který je koncentrován na poměrně malou plochu a účinnost přenosu tepla do svaru je dobrá. Úpravou parametrů svařování lze měnit tepelné i mechanické účinky oblouku a řídit tím charakter a rozměry svarové lázně, tepelné ovlivnění základního materiálu, zbytková napětí i deformace svaru. [3]

Jak už bylo řečeno, maximální teplota oblouku závisí na počtu srážek částic v oblouku a na prostředí oblouku. Maximum proudové hustoty, teploty a tlaku ve sloupci oblouku se nachází v ose elektrody. Maximální teploty se dosahuje pod katodovou skvrnou až 15000 °C. V důsledku velké proudové hustoty může mít plazmový oblouk až 30000 °C. Teploty elektrického oblouku u dalších metod jsou [8]:

- ruční svařování obalenou elektrodou 4200 ÷ 6400 °C
- svařování pod tavidlem 6200 ÷ 7800 °C

V ochranných atmosférách:

- metodou TIG (WIG) 6500 ÷ 9000 °C
- metodou MIG/MAG 8000 ÷ 15000 °C

Celkový výkon oblouku lze vyjádřit jako jeho energetický příkon, tj. [3]:

$$P = k \cdot U \cdot I \quad [\text{J}] \quad (2.1)$$

kde k je součinitel vlivu napětí a proudu (pro stejnosměrný proud = 1).

Tavení kovu elektrody závisí výhradně na hodnotě svarového proudu a probíhá především těmito mechanismy [3]:

a) odporovým teplem podle Joule-Lenzova zákona:

$$Q = R \cdot I^2 \cdot t \quad [\text{J}] \quad (2.2)$$

závisející na hustotě proudu a délce volného konce elektrody (tento druh ohřevu je dominantní především u metody MIG/MAG a SAW při vysokých proudech a velké délce volného konce),

b) teplem oblouku vybaveným na katodě nebo anodě,

c) pohlcením sálavého účinku záření oblouku,

d) teplem uvolněným přeměnou z kinetické energie dopadajících elektronů nebo iontů.

Z hlediska **mechanických účinků oblouku** má největší vliv u všech metod svařování tlak proudu plazmatu, který silně závisí na prostředí ochranného plynu (především na jeho měrné hmotnosti). Plazma je soubor částic nabitých kladně a částic nabitých záporně, celkově je elektricky neutrální. Na rozdíl od plynů je elektricky vodivá, má velkou tepelnou kapacitu i vodivost a podléhá účinkům elektrického a magnetického pole. Nejvyššího tlaku se dosahuje u svařování v CO_2 a nejnižšího v He. V elektrickém výboji slouží plazma k vytvoření vodivé dráhy v prostředí, ve kterém původně nebylo. [3], [8]

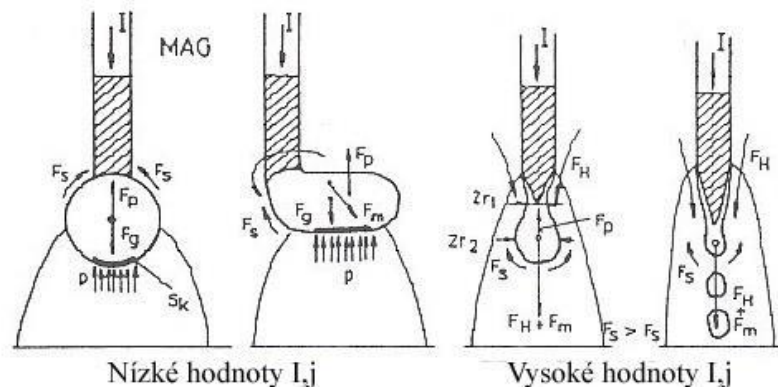
Přenos svarového kovu elektrickým obloukem

Při přenosu nataveného materiálu elektrody do svarové lázně se uplatňuje složitý systém působení sil na kapky roztaveného kovu. Velikost, tvar a frekvenci kapek při hoření oblouku a tavení elektrody ovlivňují tyto faktory [3]:

- fyzikální vlastnosti roztaveného kovu (povrchové napětí, viskozita, bod varu a T_1),
- vlastnosti okolního prostředí (teplota, chemické interakce, tepelná vodivost),
- technologické parametry (proud, napětí, proudová hustota).

Na tvořící se kapku působí následující typy sil (Obr. 2.6) [3]:

- síla povrchového napětí (F_s),
- síla vyvolaná tlakem kovových par (F_p),
- gravitační síla (F_g),
- elektromagnetická síla (F_m),
- hydrodynamická síla (F_h).



Obr. 2.6 Síly působící na kapku tavicí se elektrody při různých proudových hustotách [3]

Celkové působení uvedených sil zajišťuje oddělování kapek v závislosti na podmínkách svařování. Působením elektromagnetické síly, která převyšuje sílu gravitační, dochází k zaškrcování kapky (zmenšení průřezu), které způsobí náhlé zvýšení odtrhující síly, a pokud je mezi kapkou a kovovou lázní dostatečná vzdálenost, dojde k odtržení kapky a jejímu vystřelení v osovém směru, jde o tzv. **PINCH EFEKT**. Pinch efekt (radiální tlak magnetického pole oblouku) umožňuje svařování i v nucených (montážních) polohách. [8]

Hlavními faktory pro přenos kovu jsou svařovací proud a proudová hustota, které když jsou vysoké, dominuje pak síla hydrodynamická a elektromagnetická. Zároveň roste i teplota katodové skvrny a klesá hodnota povrchového napětí. Výsledkem je zmenšování průměru kapek. V opačném případě dominuje povrchové napětí a tvoří se velká kapka, která se vlivem síly vyvolané tlakem kovových par může mimoose vychýlit a vlivem elektromagnetické síly dochází k rotaci kapky. [3]

Charakter přechodu svarového kovu v oblouku určují hlavně tyto faktory: metoda svařování, proudová hustota, obal/materiál elektrody, napětí (délka oblouku), polarita a atmosféra (ve které oblouk hoří). [2]

Pro svařování MIG/MAG je typická vysoká hustota proudu v elektricky zatíženém konci svařovacího drátu. Běžně se pohybuje mezi 100 až 250 A.mm⁻² (u vysokovýkonových metod až 650 A.mm⁻²). Vlivem elektrických a magnetických podmínek je možné realizovat řadu typů přenosu kovu v závislosti na charakteru svařování. Těmi základními jsou [3]:

- a) zkratový přenos krátkým obloukem,
- b) zrychlený zkratový přenos,
- c) přechodový kapkový přenos dlouhým obloukem,
- d) sprchový přenos dlouhým obloukem,
- e) impulsní přenos s řízenou frekvencí kapek,
- f) moderovaný kapkový přenos dlouhým vysokotlakým obloukem,
- g) vysokovýkonový přenos rotujícím obloukem.

Statická voltampérová charakteristika oblouku

Vyjadřuje závislost proudu na napětí oblouku při konstantní délce oblouku. U jednotlivých technologií svařování mají na vlastní tvar a polohu charakteristiky oblouku vliv parametry prostředí, ve kterém oblouk hoří tj. chemické složení elektrody, geometrie hrotu elektrod, složení plazmy oblouku, průměr elektrody. [3]

Její tvar lze odvodit z rovnice napěťových úbytků na oblouku [8]:

$$U_{eo} = U_k + R \cdot I + U_a \quad [\text{V}] \quad (2.3)$$

kde U_{eo} je napětí oblouku, U_k značí napětí na katodové oblasti, $U_s = R \cdot I$ znamená napětí sloupce oblouku a U_a je napětí na anodové oblasti.

Často se používá tzv. normalizované napětí, a to především pro vyšetřování vlastností zdrojů proudu pro obloukové svařování. Pro svařování elektrickým obloukem odtavující se kovovou elektrodou v ochranném plynu (MIG, MAG) se uvádí [3]:

$$U = 14 + 0,05 \cdot I \quad [\text{V}] \quad (2.4)$$

Vztah 2.4 platí pro hodnoty proudu do 600 A (dále zůstává $U_2 = \text{konst.} = 44 \text{ V}$).

2.2.2 Zdroje pro svařování elektrickým obloukem

Zdroje svařovacího proudu slouží k dodávání elektrické energie potřebné pro zapálení a hoření elektrického oblouku. Dodávají do uzavřeného svařovacího obvodu elektrický proud požadovaných vlastností pro danou metodu svařování. [3]

Po zdrojích elektrického proudu je požadováno udržení konstantního napětí svařovacího proudu (a to i přes změny ve svařovacím oblouku), odolnost proti krátkodobým zkratům, spolehlivost, dobré zapalování oblouku atd. Ve zkratce lze říct, že obloukové svařovací zdroje musí vyhovovat požadavkům technologie svařování a bezpečnostním předpisům. [9]

Svařovací zdroje pro obloukové svařování se dělí podle [3]:

- a) způsobu přeměny energie na zdroje - rotační (svařovací dynama) a statické/netočivé (svařovací transformátory, usměrňovače, měniče),
- b) druhu dodávaného proudu na zdroje proudu – stejnosměrného, usměrněného a střídavého.

Vstupní údaje neboli veličiny, které se u svařovacích zdrojů uvádí, jsou [9]:

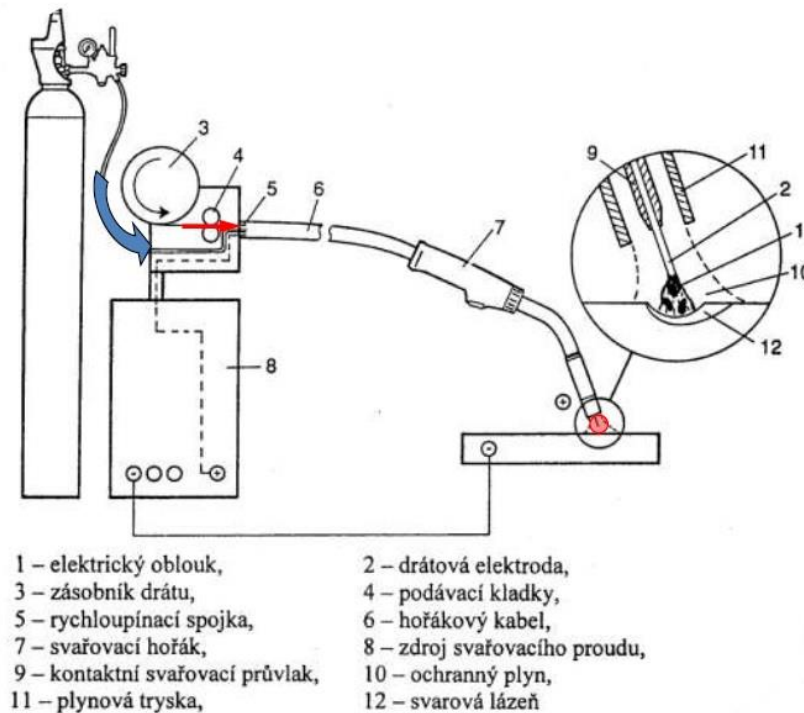
- jmenovité vstupní (napájecí) napětí – fázové, sdružené nebo třífázové,
- jmenovitý kmitočet (frekvence) – obvykle 50 Hz,
- jmenovitý příkon zdroje,
- maximální příkon zdroje,
- jištění sítě – hodnota a druh síťových pojistek,
- účinník $\cos \varphi$ – fázový posuv mezi napětím a proudem.

Oproti těmto veličinám stojí výstupní údaje (veličiny) svařovacích zdrojů [9]:

- napětí naprázdno,
- pracovní napětí,
- svařovací proud,
- jmenovitý svařovací proud,
- trvalý svařovací proud,
- maximální svařovací proud,
- jmenovitý svařovací výkon,
- účinnost zdroje.

2.3 Svařování metodou MAG

Obloukové svařování tavící se elektrodou v ochranné atmosféře aktivního plynu **MAG – Metal Active Gas** je metoda svařování, kdy se elektroda v podobě drátu (přídavný materiál) odvíjeného z cívky a dodávaného do svařovacího hořáku taví v prostředí plynu, který se aktivně účastní procesů v elektrickém oblouku. [1]



Obr. 2.7 Základní schéma svařování metodou MIG/MAG [3]

Metoda svařování MAG se používá pro všechny polohy svařování a je vhodná pro svařování nelegovaných, nízkolegovaných a vysokolegovaných ocelí. Tloušťka základního materiálu může být 0,8 až 40 mm. Využívá se stejnosměrného svařovacího proudu v nepřímé polaritě, tj. elektroda na kladném pólu svařovacího zdroje. Průměry svařovacích drátů se pohybují od 0,6 do 1,6 mm. Statická charakteristika zdroje je plochá (zdroj konstantního napětí). [2]

Druh přenosu kovu (oblouku) je závislý na velikosti proudu. V nízké oblasti výkonu je oblouk náchylný ke zkratům, ve vyšší oblasti výkonu je bez zkratů [8]:

- zkratový: $I_s = 40 - 190 \text{ A}$, $U_{eo} = 16 - 21 \text{ V}$
- sprchový: $I_s = 120 - 500 \text{ A}$, $U_{eo} = 20 - 36 \text{ V}$

Další druhy oblouku jsou: krátký, přechodový, pulzní, rotující a kombinovaný (pulzní a krátký).

Tabulka 2.1 Výhody a nevýhody svařování metodou MAG [10], [11]

Výhody svařování metodou MAG	snadno se naučí
	vysoká rychlost svařování
	vysoký výkon odtavení
	nízké náklady na přídavný materiál
	vhodné pro automatizované svařování
	vhodné pro všechny svařovací polohy
	snadné zapálení oblouku
Nevýhody svařování metodou MAG	možné problémy s udržení ochranného plynu ve volném prostoru nebo v halách s průvanem
	citlivé na rez a vlhkost
	relativně vysoké vyzářené teplo

2.3.1 Ochranné plyny

Ochranný plyn je nedílnou součástí této metody svařování a jeho základním úkolem je chránit tavnou lázeň před vlivy okolní atmosféry, kde přítomnost vzduchu způsobuje oxidaci a nitridaci svarového kovu (výrazné zhoršení mechanických vlastností). Dále ovlivňuje tyto svařovací charakteristiky [3]:

- způsob přenosu svarového kovu obloukem,
- hloubka závaru a profil svaru,
- množství rozstříku,
- rychlost svařování,
- stabilita elektrického oblouku.

U metody MAG se nejčastěji používají směsi na základě argonu (**Ar + CO₂**; **Ar + O₂**; **Ar + CO₂ + O₂**; **Ar + He + CO₂ + O₂**). [3]

Oxid uhličitý (CO₂) se řadí mezi aktivní plyny a je silně oxidační, avšak až při teplotách nad 700 °C. Používá se s čistotou min. 99,5 %. Ačkoliv svařování s tímto plynem není nejideálnější (mechanické vlastnosti materiálu nemusí být tak dobré jako při použití plynu inertního, omezená oblast optimálních parametrů a velký rozstřík), disponuje jednou obrovskou výhodou: je snadno dostupný a velmi levný (jde o stejný plyn, kterým se sytí sycené nápoje). Kyslík (O₂) je oxidační plyn (vyšší oxidační účinek než CO₂) a používá se pouze jako příměs. Argon (Ar) je inertní (netečný) plyn, který nevytváří s žádným prvkem chemické sloučeniny a je základem pro směsné plyny. [4]

V dnešní době se často používají směsi plynů na bázi argonu. Použití směsných plynů má řadu výhod – zvyšuje se stabilita procesu svařování, snižuje se rozstřík kovu, zlepšuje se formování svarové housenky a zvyšuje se produktivita svařování. Univerzálním plynem pro svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí je směsný plyn **Ar + 18 % CO₂**, který se vyznačuje velmi dobrými svařovacími vlastnostmi, stabilním elektrickým obloukem a hlubokým závarem. Umožňuje svařování se zkratovým i sprchovým přenosem kovu. Optimálním směsným plynem pro impulsní a sprchový přenos je **Ar + 8 % CO₂**. Zároveň se doporučuje pro vysokovýkonné metody svařování při vysokých proudech. Směsný plyn **Ar + 5 až 13 % CO₂ + 5 % O₂** zase poskytuje klidný svařovací proces s měkkým elektrickým obloukem pro hladké a čisté tvary. Je vhodný pro malé a střední tloušťky. [3]

2.3.2 Moderní funkce svařovacích zdrojů

Za účelem zlepšení svařovacího procesu se neustále vyvíjí i funkce moderních svařovacích zdrojů. V reálném čase je tak možné ovládat, sledovat a řídit veškeré svařovací parametry. Mezi už běžné funkce zdrojů patří **horký start** (zajištění natavení začátku svaru u materiálů s vysokou tepelnou vodivostí), **data báze svařovacích programů** pro velkou většinu přídavných materiálů a **synergické řízení** svařovacího procesu (všechny ostatní svařovací parametry jsou ovládány jedním manuálně nastaveným parametrem – tloušťka materiálu, proud nebo rychlost podávání drátu). Další funkce jsou [3]:

- řízení zapalovací cyklus,
- udržování konstantní délky oblouku,
- ukončení svařovacího cyklu proudovým impulzem.

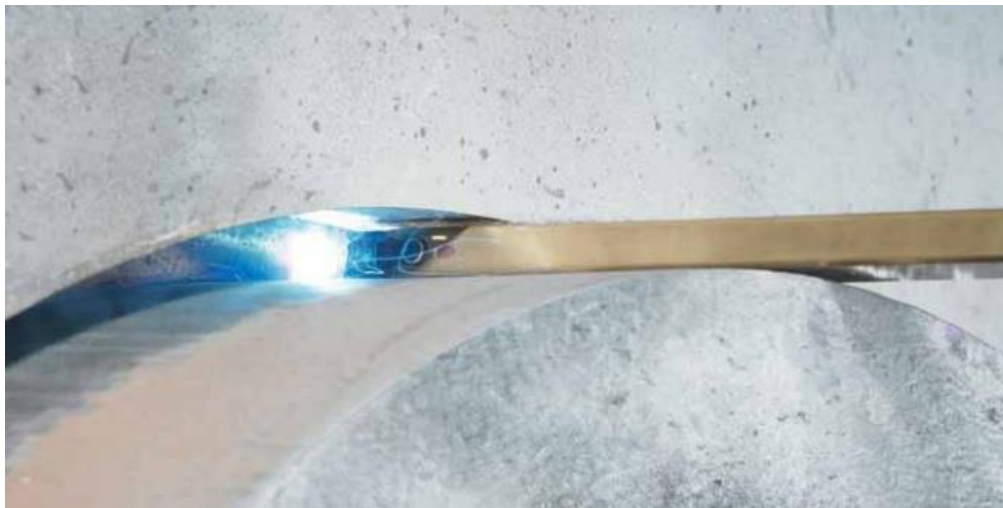
Každý výrobce dnes nabízí různé svařovací procesy a s nimi i funkce svých svařovacích zdrojů. Například firma Fronius Česká republika, s.r.o. (dále jen Fronius) nabízí tři procesy pro svařování v ochranné atmosféře odtavující se elektrodou [10]:

- **Low spatter control – LSC:** Modifikovaný svarový oblouk s vysokou stabilitou. Ke zkratu dochází na nízké úrovni proudu, což má za následek měkké opětovné zapálení a stabilní svařovací proces. Dále systém disponuje dodatečnou regulací drátu při změně vzdálenosti svařovacího hořáku, kdy drží konstantní proud a průvar.

- **Cold metal transfer – CMT:** Digitální regulace procesu rozpozná zkrat a zpětným potažením drátu podpoří uvolnění kapky. Tím je zkrat pod kontrolou a proud se udržuje na nízké úrovni. Výsledkem je bezrozstříkový přechod mezi materiály. Metoda je vhodná pro všechny svařovací polohy. Výhodou této metody je velmi malé vnesené teplo do materiálu a stabilní oblouk. Tento postup je vhodný zejména pro spojování plechů z oceli s hliníkem, kdy se ocelový pozinkovaný plech smáčí a hliník natavuje.
- **Pulse multi control – PMC:** Jde o svařování modifikovaným pulsním obloukem vhodným pro svařování oceli, hliníku a slitin chromu s niklem. Tento proces využívá stabilizátory průvaru (regulace drátu) a stabilizátor délky oblouku (regulace svařovacího napětí).

Naproti tomu firma Cloos Praha, spol. s r.o. (dále jen Cloos) nabízí celou řadu svařovacích procesů, z nichž ty nejzajímavější jsou [12]:

- **Control Weld:** Stabilní přechod materiálu od zkratového elektrického oblouku až po sprchový elektrický oblouk. Využívá se především při svařování tenkých a silných plechů, speciálních svarů.



Obr. 2.8 Svařování procesem Narrow Gap Weld od firmy CLOOS

- **Narrow Gap Weld:** Proces využívající speciálního hořáku pro svařování v úzké mezeře pro svařování plechů o tloušťkách nad 35 mm. Hořák se může zanořit do mezer hlubokých až 300 mm a širokých jen 20 mm. Přivádí drát, ochranný plyn a chladicí kapalinu.

- **Tandem Weld:** Dva elektrické oblouky hoří ve společné tavné lázni. Jde o dva elektricky oddělené procesy, které vynikají svým sladěním. Proces dosahuje vysokého výkonu odtavení a vysoké rychlosti svařování.

2.3.3 Pracovní cyklus svařovacího zdroje

Takzvaný zatěžovací cyklus (z angl. „duty cycle“) obloukového svařovacího zdroje je jedním z důležitých kritérií. Začal být sledován na základě skutečnosti, že ruční a poloautomatické svařování není proces kontinuální, ale přerušovaný. Svařovací zdroj se tedy výkonově dimenzuje za účelem efektivního využití použitých materiálů. Definovány jsou tyto pracovní cykly [4], [9]:

- normalizovaný cyklus pro ruční svařování (NRS),
- normalizovaný cyklus pro poloautomatické svařování (NPS).

Normalizovaný pracovní cyklus trvá celkem 10 minut, ze kterého určitou dobu hoří elektrický oblouk (svařovací zdroj je zatížen) a zbývající dobu potom nehoří (zdroj běží naprázdno). Jde tedy o rozdělení pracovního cyklu na přesný čas, kdy se vytváří daný svar, a na čas, kdy zařízení a svářeč musí „odpočívat“. Jako charakteristická veličina se zde zavádí zatěžovatel DZ (označován také jako X), který je definován jako poměrná doba zatížení. Jde o poměr doby zatížení zdroje svařovacího proudu k celkové délce pracovního cyklu a zahrnuje svařování, výměnu elektrod a oklepávání strusky. Jeho tvar je [9]:

$$DZ = \frac{t_s}{(t_s + t_o)} \cdot 100 [\%] \quad (2.5)$$

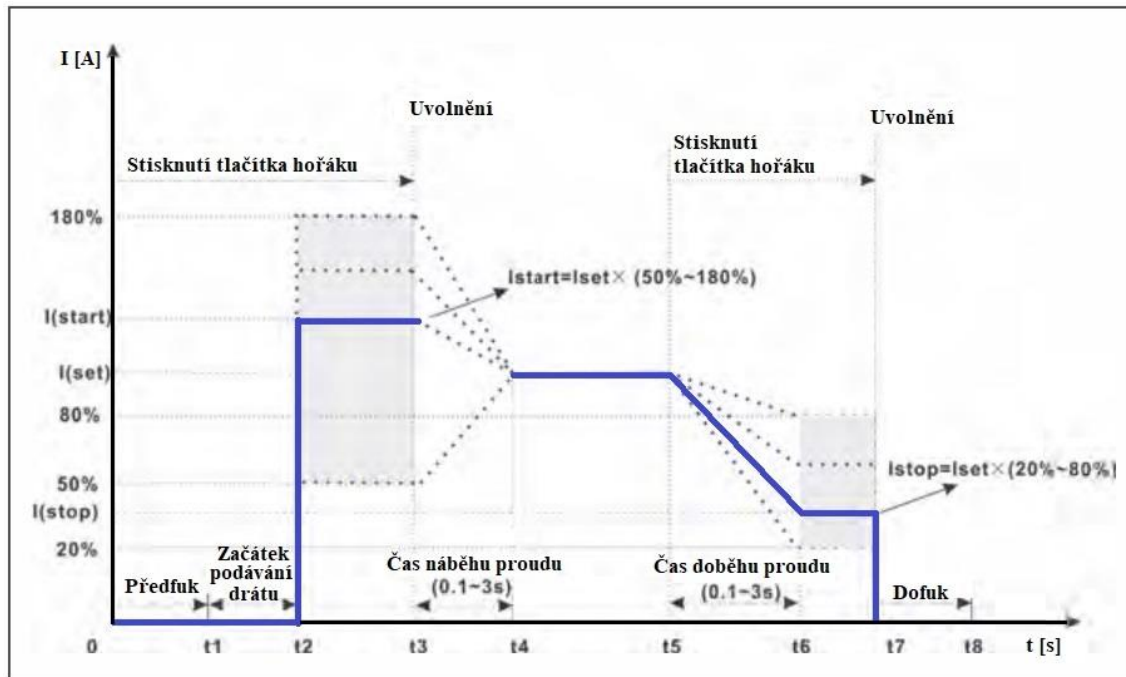
kde t_s je doba zatížení a t_o je doba odstávky.

Pracovní cyklus je stanoven v evropské normě EN 60974-1. Americká národní asociace výrobců elektrických zařízení NEMA (The National Electrical Manufacturers Association) zase například ustanovuje tři kategorie zdrojů dle hodnoty jejich zatěžovatele [4]:

- skupinu I – $DZ = 60$ až 100 %; automatizované svařování, vysoká produkce,
- skupinu II – $DZ = 30$ až 50 %; ruční svařování – nekontinuální,
- skupinu III – $DZ \approx 20$ %; procesy s velmi přerušovaným svařováním.

Např. svařovací zdroje pro mechanizované svařování tavící se elektrodou v ochranné atmosféře se konstruují pro zatěživost $DZ = 100 \%$, protože zde odpadají časté přestávky svařování. [9]

Příklad konkrétního pracovního svařovacího cyklu je znázorněn na Obr. 2.9. Graf zobrazuje závislost svařovacího proudu na čase pro 4S cykly určené k dlouhému ručnímu svařování za použití zdroje iWELD 6503S od firmy Welco. [13]



Obr. 2.9 Graf pracovního svařovacího cyklu – závislost proudu I na čase t [13]

Detailní popis cyklu [13]:

- **0 ~ t_1 :** po stisknutí tlačítka hořáku se spustí předfuk ochranného plynu,
- **t_1 ~ t_2 :** stroj začne podávat drát,
- **t_2 ~ t_3 :** stroj začne svařovat při startovacím proudu (náběh proudu pro zapálení),
- **t_3 ~ t_4 :** po uvolnění tlačítka hořáku proud přejde na jmenovitý svařovací proud (s nastavitelným náběhem), ustálení svařovacího proudu,
- **t_5 ~ t_7 :** po stisknutí tlačítka hořáku proud přejde na koncový proud (s nastavitelným doběhem), dochází k poklesu proudu a vyplnění koncového kráteru,
- **t_7 ~ t_8 :** po uvolnění tlačítka hořáku dojde k zastavení svařovacího procesu, proud klesne na nulu a spustí se dofuk ochranného plynu.

Nastavitelné parametry v tomto režimu jsou: předfuk a dofuk, počáteční a koncový proud, doba náběhu a doba doběhu. [13]

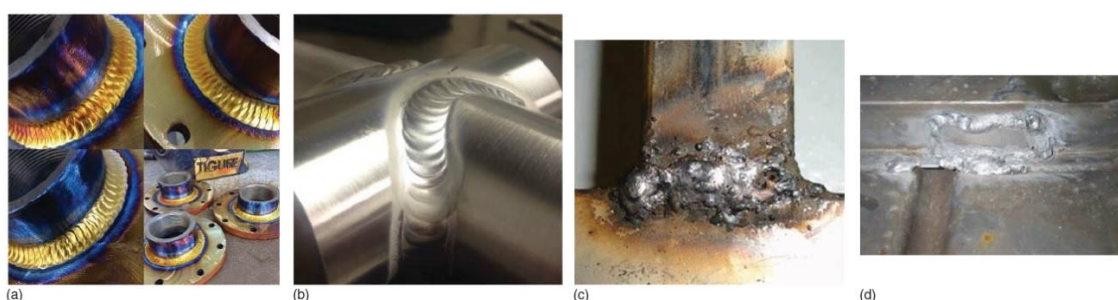
3 Zajištění svařovacího procesu

3.1 Úvod

Svařování jakožto proces zajišťující spojování materiálů, zejména pokud se jedná o ty kovové, má svůj rub i líc. Na jednu stranu jde o jednu z nejlepších metod, kterou je možné vytvořit spoj s pevností srovnatelnou nebo i vyšší, než má základní (spojovaný) materiál a následovat by mohl výčet dalších superlativů vyzdvihujících tuto metodu. Na stranu druhou je nutné si uvědomit, že aplikace svařovacích metod vyžaduje promyšlenou konstrukci a návrhy svarových spojů, náležité vybavení a spotřební materiál (ochranné plyny, přídavný materiál apod.), zkušenou obsluhu i příslušné zajištění splnění požadavků kvality svarového spoje. Ze všeho nejdůležitější je porozumět tomu, co je zapotřebí k vytvoření *zdravého svaru*¹. A to je podle některých zdrojů požadavek, který vytváří problémy ve svařování nejčastěji. [14]

3.1.1 Problémy ve svařovacím procesu

Problémy se svařováním se z pravidla týkají nepřijatelného svaru, tj. svar, který neobstojí už při nedestruktivním zkoušení bezprostředně po jeho výrobě nebo není schopen zajistit plánovanou funkci v provozu. Můžeme se tedy setkat se svařovanými sestavami s nevyhovujícími geometrickými a rozměrovými kritérii, se svary obsahujícími závady nebo defekty neslučující se s požadavky kvality (trhliny, porozita), nebo se svary, které znehodnotily základní materiál (trhliny, oxidace, ztráta tvrdosti, zkřehnutí). [14]



Obr. 3.1 Dva příklady výborně zvládnutého svařování metodou WIG:

a) ocelové součásti, b) hliníkové slitiny rámu jízdního kola.

Dva příklady špatného svařování:

c) oprava ocelové součásti automobilu, b) špatně zvládnutá oprava na lodi z hliníkové slitiny.

[14]

¹ Doslovný překlad z používaného anglického spojení „a sound weld“.

Při hledání zdroje problémů ve svařování (myšleno obecně) by se měly vyjasnit další ze základních pojmů. Z následujícího výroku: *“Problémy, které má člověk při svařování, spočívají v tom, co člověk považuje za přijatelný svar nebo svařenec.”*, vyplývá hned několik pojmů [14]:

- **svar** (pojem definován v kapitole 2.1.3 Základní pojmy) - individuální spoj nebo nános vytvořený procesem svařování,
- **svařenec** - celá sestava komponentů využívající mnoha svarů k vytvoření určitého dílu (tlaková nádrž, ostří radlice buldozeru), části určitého zařízení (odmontovatelný sněžný pluh pro vozidla), konečného produktu (automobil), konstrukčního prvku (nosník), či celé konstrukce (most, loď),
- **přijatelným** – jedná se o dodržení patřičných konstrukčních požadavků daných výrobcem, konečným zákazníkem nebo uložených normou, zákonem, či nějakou odbornou sbírkou (kód, kodex).

Co tedy z výše zmíněného konstatování plyne? To, co klasifikuje svar nebo svařenec nepřijatelným je skutečnost, která ho činí nezpůsobilým k zajištění potřebného výkonu. Taková skutečnost může vyplývat z obecných požadavků (geometrická a rozměrová přesnost, nepřítomnost defektů), odborného inženýrského posouzení nebo ze závěrů předchozích analýz, či testování. Problém tedy můžeme definovat jako cokoliv, co zabrání svaru nebo svařenci správnému sestavení nebo funkci. U problému s nesprávným sestavením se setkáváme s obtížnou, až nemožnou následnou sestavou komponentů ve finální celek. Mnohem závažnější problém zabraňující správné funkci svaru nebo svařence může vést ke ztrátě zákazníka, žalobě kvůli zranění a v nejhorším případě až ke smrti. [14]

Věnuje-li se pozornost zdrojům těchto problémů, aby se předešlo výše zmíněným následkům, lze je logicky kategorizovat v pořadí, v jakém postupně vzniká svar a svařenec [14]:

- a) příprava spojovaných součástí před svařováním,
- b) sestavení součástí před svařováním,
- c) provedení vybraného svařovacího procesu,
- d) zvolení a kontrola klíčových svařovacích parametrů,
- e) sestavení výrobního postupu, kontrola klíčových svařovacích kroků,
- f) nedbalé nebo nepatřičné zacházení po operaci svařování,

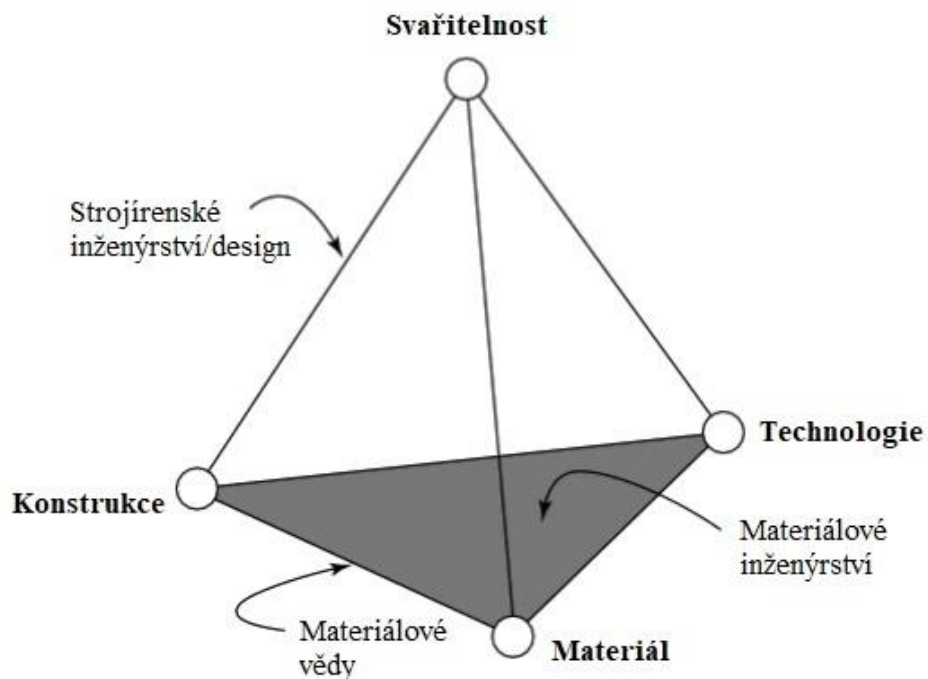
- g) nedbalá nebo nepatřičná kontrola po operaci svařování, a to jak interní, tak externí,
- h) problémy vycházející z vlastností konkrétního materiálu,
- i) problémy související s konkrétní šarží nebo tepelným ovlivněním materiálu (např. obsah nadbytečných nečistot).

Vzhledem k tomu, že zmíněné body se bezprostředně týkají svařitelnosti, je nutné si znovu zavést pojem svařitelnost a definovat vše, co do něj vstupuje. Jedná se totiž o komplexní charakteristiku (viz 2.1.3 Základní pojmy), které je třeba věnovat pozornost nejen ze strany technologií, ale i ze strany projektantů a konstruktérů.

3.1.2 Svařitelnost

Pojem **svařitelnost** je zcela účelová definice, která zahrnuje vliv materiálu, použité technologie a konstrukce (viz Obr. 3.2). Jeho kritériem jsou podle definice ISO vyhovující vlastnosti svarových spojů pro danou konstrukci. [15]

„Kovový materiál se považuje za svařitelný do určitého stupně při daném způsobu svařování a pro daný účel, lze-li odpovídajícím technologickým postupem svařování dosahovat kovové celistvosti svarových spojů tak, že tyto spoje vyhovují technickým požadavkům, jež se týkají jak vlastností samotných spojů, tak i vlivu těchto spojů na konstrukční celek, jehož součástí tyto spoje jsou.“ [15]



Obr. 3.2 Schématická ilustrace neoddělitelného vztahu mezi konstrukční, technologickou a materiálovou stránkou mající vliv na svařitelnost [14]

- **Materiálová svařitelnost**

Vyjadřuje vhodnost kovu ke svařování a charakterizuje jeho změnu vlastností v tepelně ovlivněné oblasti, která vzniká důsledkem působení teplotního cyklu svařování. Faktory vyjadřující vhodnost kovu ke svařování jsou chemické složení, metalurgický způsob výroby materiálu a provedené tepelné zpracování. [16]

- **Technologická svařitelnost**

Představuje vliv použité metody a technologie svařování na konečné vlastnosti svarového spoje. Záleží zde na volbě metody svařování (velikost tepelného příkonu), přídavného materiálu a parametrů svařování. Důležitý je také postup kladení jednotlivých vrstev svaru, tepelný režim svařování nebo výběr tepelného zpracování svarového spoje. [16]

- **Konstrukční svařitelnost**

Zabývá se vlivem konstrukčního řešení svarového spoje pro dané provozní podmínky. Nevstupuje sem pouze hodnota tloušťky materiálu, ale také tvar, velikost, uspořádání a počet spojů, tvar a příprava svarových ploch, tuhost spoje ve svařenci, nebo rozložení svarů v závislosti na namáhání. [16]

Svařitelnost má za cíl zabezpečit metalurgické funkce (spojení bez vytvoření nežádoucích složek a slitin), mechanické podmínky (spoj bez vad, strusky, smršťení a deformací) a užité vlastnosti (svar musí plnit svou funkci při různých provozních podmínkách). V Česku byla v minulosti svařitelnost definována v normě ČSN 05 1309, což byl podle některých zdrojů velmi vhodný způsob. Dnes se současné evropské normy tomuto termínu spíše vyhýbají. Z toho vyplývá, že v případě současné hutní produkce polotovarů již není zajišťován stupeň svařitelnosti tak, jak byl dříve řadou ČSN definován. [17]

Původní související norma ČSN 05 1310 rozdělovala svařitelnost hutních materiálů zejména v závislosti od chemického složení a tloušťky materiálu na [16]:

- a) Zaručenou – stupeň 1a,
- b) Zaručenou podmíněnou – stupeň 1b,
- c) Dobrou – stupeň 2,
- d) Obtížnou – stupeň 3.

Od roku 1991 vychází toto hodnocení (dle aktualizované normy ČSN 05 1309) ze dvou skupin ukazatelů [16]:

- **ukazatele celistvosti svarových spojů** – charakterizují odolnost proti vzniku trhlin a jiných nepřipustných vad,
- **ukazatele mechanických vlastností svarových spojů** – charakterizují změny jednotlivých vlastností v oblasti spoje v důsledku svařování.

3.1.3 Logické třídění problémů

Při hledání problémů ve svařovacím procesu, je na místě začít s hledáním jejich příčin. Jak už bylo naznačeno v předchozích kapitolách, jen tímto způsobem bude možné zabránit vzniku takového problému v budoucnosti nebo ho vyřešit, pokud již ve výrobě nastal a mohl by se logicky dále opakovat. Logické třídění všech možných problémů, které mohou nastat u svarů nebo svařenců, vede k položení následujících základních otázek [14]:

- 1) **Jakým způsobem se problém sám od sebe projevil u svaru nebo svařence?**
- 2) **Kde se problém ve svaru nachází?**
- 3) **V jaké materiálu se problém objevil?**

Následný detailnější výčet typických potíží je rozdělen do tří skupin dle projevu problémů spojených [14]:

a) se svarem či svařencem:

- problém se sestavou místa spojení nebo spojů,
- geometrické deformace, rozměrové smrštění, nestabilita svařence,
- póry ve svaru,
- nekovové a kovové vměstky ve svaru,
- trhliny ve svaru nebo svařenci,
- vzhled svaru;

b) se svarem - klíčovým faktorem je lokace problému v mikrostruktuře viz Obr. 2.1 b):

- tavné svařování:
 - natavená oblast,
 - částečně natavená oblast,
 - tepelně ovlivněná oblast,
- netavné svařování;

c) s vlastnostmi materiálu:

- křehnutí v uhlíkových, nízkouhlíkových a středně uhlíkových ocelích,
- mezikystalová koroze u nerezových ocelí,
- praskání vlivem ohřevu precipitačně vytvrzených slitin,
- dlouhodobé křehnutí spojené s vysokými obsahy chromu,
- oslabení svaru a segregace ve svaru,
- spojení odlišných kovových materiálů.

Jiné zdroje zase neuvádějí přímo výčet typických problémů a jejich příčin. Objevují se ale například aspekty, které mají vliv na svařitelnost (viz Tabulka 3.1). Zde se uplatňuje rozdělení všech možných vlivů do tří skupin souvisejících s materiálovou, konstrukční a technologickou svařitelností (viz definice v kap. 3.1.2).

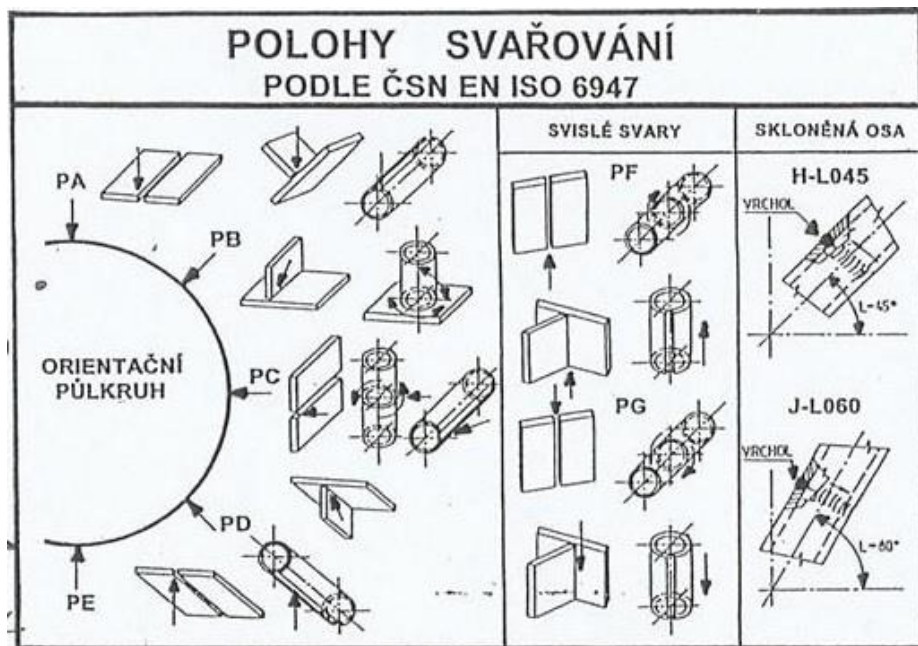
Tabulka 3.1 Aspekty ovlivňující svařitelnost [15]

Vlastnosti materiálů (základní a přídatný)	Metoda svařování a výrobní podmínky	Konstrukce svařence
chemické složení	tavné nebo tlakové svařování	počet svarů na konstrukci
mechanické vlastnosti	vnesené množství tepla	typy použitých svarů
mikrostruktura	parametry svařování	umístění svarů na konstrukci
absorpce plynů	příprava a čistota svarových ploch	kumulace svarových spojů na konstrukci
oxidační schopnost	dokonalost ochrany místa svaru	tloušťka svarových spojů
vlastnosti a chování za vysokých teplot	průměry použitých přídatných materiálů	tuhost svařované konstrukce
chování při rychlém ohřevu	přístup ke svaru	zbytková napětí
chování při rychlém ochlazování (kalitelnost)	předehřev svaru	deformace svařence
transformace struktury	teplota Interpass	konstrukční vruby v blízkosti svarů
precipitační vytvrzování	tepelné zpracování	náhlé přechody tlouštěk v blízkosti svarů
náchylnost na vznik trhlin	pořadí provádění svarů	
reakce mezi svarovým kovem, struskou a ochrannou atmosférou	prokovávání a způsob kladení svarových housenek	

3.2 Automatizované svařování

V rámci dnešní celosvětové tendence využívat v co největším měřítku automatizaci a robotizaci výrobních procesů už není pochyb o jejich výhodách. Jde vlastně o důležité téma, a to nejen v rámci průmyslu 4.0. Automatizace výrobních procesů je třeba zavádět všude, kde se jedná o monotónní práci, nebo práci ve škodlivém prostředí, kam se svařování řadí nejen kvůli všude přítomným plynům a výparům, ale i lidskému oku nebezpečnému ultrafialovému záření. Zároveň lze zvýšit produktivitu práce, zaručit plynulý chod výroby a optimální využití výrobních zařízení, surovin a energie. [3], [18]

Obloukové svařování je charakteristické tím, že svarová lázeň je tekutá. Nejjednodušším a nejproduktivnějším způsobem je tedy svařování v základní poloze PA, případně v poloze PB (svařovací polohy viz Obr. 3.3). Ostatní polohy jsou méně produktivní, vyžadují speciální přípravu a podmínky. Lze je použít pouze, pokud je polohování svařence nemožné nebo neekonomické. [18]



Obr. 3.3 Polohy svařování dle ČSN EN ISO 6947 [3]

Mezi základní prvky automatizace patří [18]:

a) pro svařování v polohách (montážní):

- lineární automat,
- svařovací traktor,
- orbitální hlava (pro dílenské i montážní svařování);

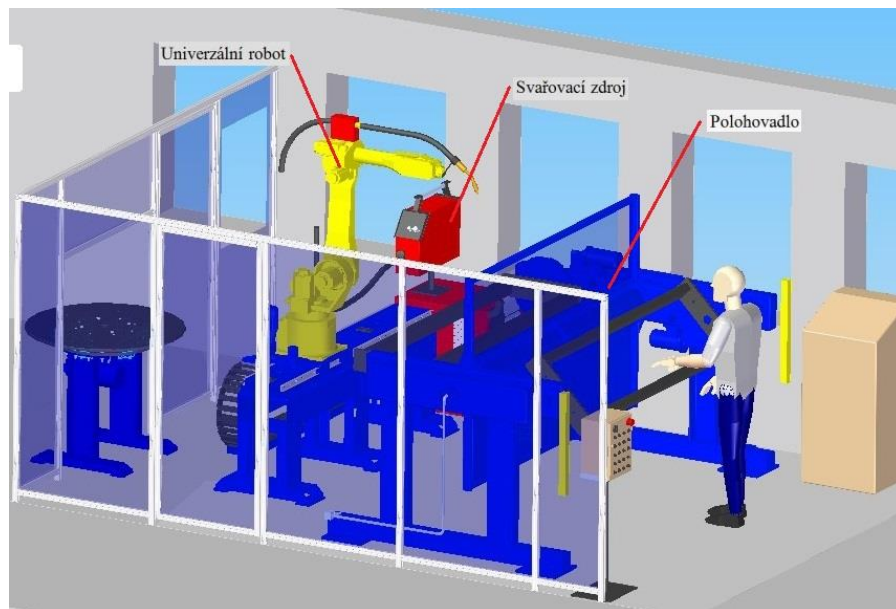
b) pro svařování v základní poloze (díleenské):

- jednoúčelové automaty,
- manipulátory – manipulace svařovací hlavou (2 až 3 stupně volnosti),
- polohovadla – nastavování svařence do základní polohy pro svařování, slouží k uchycení upínačů nebo k upevnění přípravku:
 - kladkové jednostupňové,
 - horizontální jednostupňové (pro navařování),
 - stolové (sklopné otočné),
 - kolébkové (otočné s náklonem);

c) polohovadla pro aplikace robotického svařování:

- stolové,
- čepové,
- čepové se sníženou deskou.

Dalším prvkem automatizace je systém **robot – polohovadlo**, který tvoří univerzální programovatelný systém. Jeho součástí je robot se šesti stupni volnosti a polohovadlo s jedním až třemi stupni volnosti (viz Obr. 3.4). [18]



Obr. 3.4 Univerzální robotizované svařovací pracoviště [19]

Prvky vybavení takového robotizovaného univerzálního pracoviště jsou robot s řídicím systémem, podavačem drátu, svařovací hlavicí a přesuvnou robota, polohovadlo, otočný polohovací stůl, svařovací zdroj, ochranné zábrany a odstínění pracoviště, odsávání zplodin, světelná závora (ochrana obsluhy). [19]

3.3 Faktory ovlivňující kvalitu svaru

3.3.1 Vliv chemického složení ocelí na jejich svařitelnost

Na svařitelnost (obzvláště u uhlíkových ocelí) má v první řadě vliv chemické složení základního svařovaného materiálu. Výrobci zpravidla garantují u uhlíkových ocelí pouze obsahy C, Mn, Si, P a S, z nichž má největší vliv právě obsah uhlíku. Obecně pak každý prvek působí odlišně samostatně a ve spojení s dalšími prvky. Úvodem lze rozdělit doprovodné prvky, jejichž obsah je závislý na jakosti použitých surovin v hutní výrobě, na [16]:

- **prvky škodlivé** – síra, fosfor, kyslík, dusík, vodík,
- **prvky prospěšné** – mangan, křemík, hliník aj.,
- **prvky speciální** – bór, zirkon aj. (pouze malá množství).

Doplnění potřebných prvků do svarového kovu je možné provést pomocí základního nebo přídavného materiálu (příp. obalu elektrod, tavidel atd.). Výrazně se tak dají ovlivňovat metalurgické pochody při svařování, jako jsou dezoxidace (odstranění kyslíku) a rafinace (odstranění síry, fosforu). [20]

Uhlík ovlivňuje především mechanické vlastnosti ocelí. S jeho zvyšujícím se obsahem se sice zvyšuje mez pevnosti, mez kluzu a tvrdost, naopak ale plastické vlastnosti klesají. Vyšší obsah uhlíku také znamená vyšší náchylnost k zakalení při svařování a vyšší tvrdost vznikajícího martenzitu. Zároveň se zvyšuje i náchylnost na vznik studených trhlin, především v TOO svarového spoje. Ze závislosti tvrdosti a procenta martenzitu ve struktuře TOO svarového spoje na obsahu uhlíku v oceli bylo stanoveno kritérium maximální přípustné tvrdosti v TOO, z čehož vyplynula hraniční hodnota obsahu uhlíku 0,25 %. Ve zkratce řečeno, obsah uhlíku je omezován $C \leq 0,25 \%$, do tohoto obsahu uhlíku není nutné obvyklé svarové spoje menších tlouštěk předehřívat. Svařování s vysokým tepelným výkonem má podobný účinek jako teplota předehřevu, protože více ohřívá okolí svaru, a tím dochází k jeho pomalejšímu chladnutí. [15]

Křemík zvyšuje v nelegovaných ocelích pevnost feritu, působí silně dezoxidačně a jeho nedostatek vede k tomu, že je ocel neuklidněná (pod 0,1 hm. % Si). Horní hranice je vymezena hodnotou 0,45 hm. % Si. [15]

Mangan zvyšuje mez kluzu i mez pevnosti, aniž by byla do určitého obsahu snížena plasticita. Nelegované uhlíkové oceli obsahují obvykle 0,3 až 1,7 hm. % manganu. Působí jako dezoxidační prvek a společně s křemíkem se používají k výrobě uklidněných ocelí. Pomocí manganu je možné snížit obsah síry, protože při tvorbě MnS se váže síra na mangan. [15]

Fosfor zvyšuje mez kluzu i mez pevnosti. Především ve spojení s mědí zvyšuje odolnost proti atmosférické korozi. Snižuje plasticitu oceli a způsobuje zkřehnutí za studena. Fosfor tvoří ve svarovém kovu nečistoty, které za přítomnosti síry zvyšují praskavost. Zároveň vytváří s Fe eutektikum, ve svarech se odměšuje a těžko se odstraňuje. U nelegovaných ocelí se proto vymezuje obsah na max. 0,05 hm. % P. [15]

Síra u nelegovaných konstrukčních ocelí zlepšuje obrobiteľnosť (automatová ocel). Má sklon k odměšování a zaviňuje lámavost a trhliny za tepla, protože se slučuje s Fe na nebezpečný sulfid železnatý tvořící nízkotavitelné eutektikum. Při tváření za tepla a svařování dochází k natavení eutektika na hranicích zrn, a tím nastává porušení materiálu. U nelegovaných ocelí má být v současné době max. obsah síry do 0,05 hm. %. Vysoký obsah síry zapříčiňuje vznik lamelárních trhlín. [15]

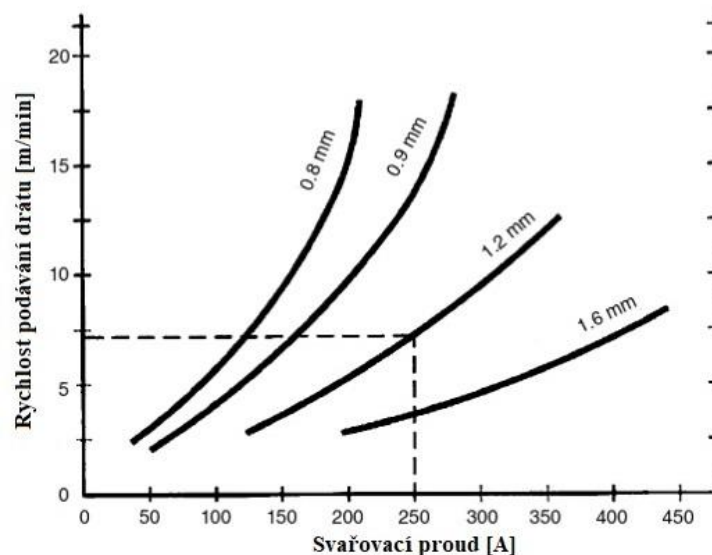
Svařitelnost uhlíkových ocelí ovlivňují také další legující prvky a nečistoty, které obsahují. Nejčastěji jsou to dusík, vodík, hliník a měď. Přídavné materiály pro svařování se volí dle požadovaných mechanických vlastností svarového kovu s ohledem na vlastnosti dané konstrukce. [15]

3.3.2 Přídavný materiál

Přídavným materiálem u svařování metodou MAG je drát, který je zároveň elektroda a do místa svaru je přiváděn prostřednictvím podavače. Podavač drátu by měl být umístěn co nejblíže k oblouku. Z důvodů plynulosti posuvu drátu vysokou rychlostí lze použít další podavač umístěný přímo v hořáku (push-pull systém). Dráty jsou navinuté na plastových nebo drátěných cívkách o standardní hmotnosti 15 kg. Vyrábějí se však v různých variantách rozměrů a hmotností od 5 do 30 kg, případně se dodávají pro robotizovaná pracoviště ve svitku o hmotnosti až 200 kg. Při přepravě a skladování je velmi důležité, aby byl drát chráněn proti oxidaci a znečištění (teplota nad 10°C, relativní vlhkost nad 50 %). Běžně jsou však dráty chráněné zabalením do polyethylenové fólie. [3]

Průměr drátu pro tuto metodu svařování se volí 1,0 mm pro tenké plechy a 1,2 mm pro ostatní. V nabídce existují i trubičkové dráty (plněné elektrody), které se hodí pro robotické svařování v základní poloze (dráty s náplní kovového prášku). Ty se nejčastěji používají o průměrech 0,8 až 1,6 mm. [18]

Plněné elektrody se dělí na bezešvé a tvarově uzavřené. Zároveň jsou na trhu i plněné dráty, které disponují vlastní ochranou (možnost svařování bez použití ochranného plynu). Náplň tvoří bazické, kyselé, rutilové nebo fluoridové struskotvorné přísady, případně jejich kombinace, tvořící na povrchu svaru tenkou vrstvu strusky, která ovlivňuje formování svaru a kvalitu povrchu. Účelem použití těchto drátů je zlepšení mechanických vlastností svaru, zvýšení výkonu odtavení, bezpečné natavení svarových ploch, dobrá smáčivost, hladký povrch, bezrozstříkový přenos apod. [3]



Obr. 3.5 Závislost rychlosti podávání drátu na svařovacím proudu pro různé průměry drátu [4]

Parametrem vyplývajícím ze strany přídavného materiálu je **rychlost podávání drátu**. Řadí se tak vedle napětí, proudu a rychlosti svařování mezi důležité parametry obloukového svařování. Rychlost podávání drátu ovlivňuje rychlost tvorby svarové housenky a proud (viz Obr. 3.5). Zajímavostí je, že při nižších proudech je závislost téměř lineární, naproti tomu při vyšších proudech zvýšení rychlosti podávání drátu vyžaduje mnohem menší nárůsty hodnot proudu (obzvláště pak u drátů menších průměrů). [4]

3.3.3 Ochranný plyn

Jako ochranný plyn se v současnosti používá převážně dvousložkový, případně tříložkový plyn s minimálním podílem 75 % argonu. Ve spojení s invertorovým zdrojem

zajišťuje tato směs vysokou kvalitu přenosu kovu, s tím i kvalitu povrchu svaru a okolí. Podíl argonu a ostatních plynů se může měnit v závislosti na tloušťce svařovaného materiálu. Třísložková kombinace s heliem se využívá například pro tlusté plechy, pro tenké plechy zase plyn s podílem až 95 % argonu. Nižší podíl aktivního plynu znamená menší vnesené teplo a menší vyplavování oxidu křemičitého. [18]

Různými studii je například popsán vliv kombinací a množství složek ochranných plynů na svařování uhlíkové oceli. Při použití třísložkového ochranného plynu ($\text{Ar} + \text{CO}_2 + \text{O}_2$) oproti dvousložkovému ($\text{Ar} + \text{CO}_2$), je možné docílit menšího rozstříku, stabilnějšího přenosu kovu a stabilnějšího hoření oblouku. Stabilního pulzního oblouku je možné docílit s poměrem ochranného plynu $\text{Ar} + 4 \% \text{CO}_2 + 3 \% \text{O}_2$. Vyšší koncentrace CO_2 má evidentní stlačující efekt na strukturu oblouku, zároveň je oblast oblouku jasnější a jeho délka se zmenšuje. Při zvyšujícím se podílu CO_2 v třísložkovém ochranném plynu se svar stává širším a zvyšuje se trochu penetrace svaru kvůli větší síle oblouku. [21] Pro srovnání, při použití třísložkového ochranného plynu $\text{Ar} + \text{CO}_2 + \text{He}$, zvýšením obsahu He se rozpíná jádro oblouku a mění se (zvyšuje se) parametr napětí oblouku při konstantním proudu a délce oblouku. Ochranný plyn má také vliv na konstantní odtavování přídavného materiálu (drátu). Při konstantním napětí a rychlosti podávání drátu klesá svařovací proud s rostoucím obsahem He nebo CO_2 . Pokud se změní složení ochranného plynu, oblouk pracuje v nové rovnováze pro udržení stálé hodnoty odtavování drátu v porovnání s rychlostí podávání drátu. Například při poměru $80 \% \text{Ar} + 10 \% \text{CO}_2 + 10 \% \text{He}$ je kvalita procesu svařování dobrá. [22]

Hlavním faktorem pro vytvoření kvalitního svaru však nemusí být jen správně zvolený plyn, ale i jeho dostatečný průtok k ochraně svarové lázně, správný sklon a vzdálenost svařovací hubice, nebo použití vhodné čistící stanice svařovacího hořáku. Všechny tyto faktory zabraňují nežádoucímu jevu – **rozstříku**.

3.4 Okrajové podmínky vstupující do procesu svařování

Hlavní okrajovou podmínkou, která ovlivňuje proces svařování a má vliv na konečný stav svaru či svařence, je jednoznačně příprava výroby. V tomto kontextu se přípravou výroby myslí zejména úprava materiálu (čištění, dělení, opracování, kontroly atd.), příprava polotovarů (rozměrová a geometrická tolerance) a konstrukce svařovacích a upínacích přípravků. [18]

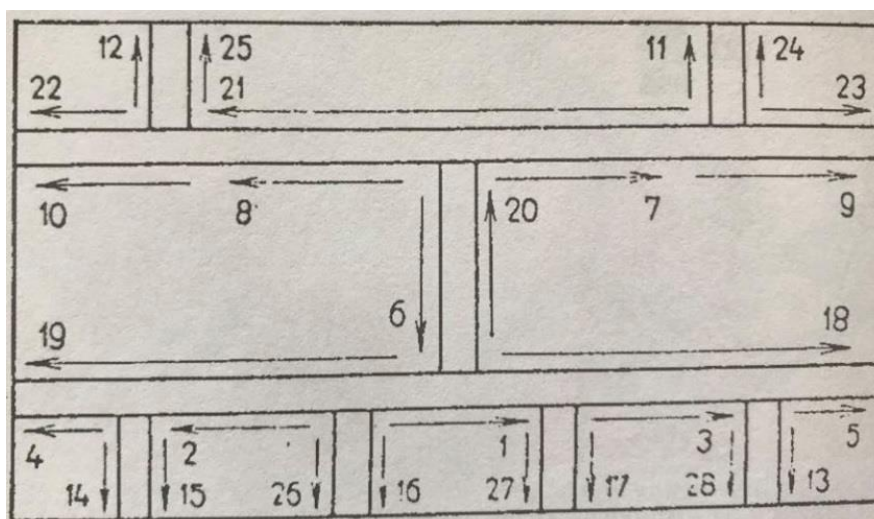
Základními polotovary pro nejběžnější technologie svařování jsou plech, trubka, válcovaný nebo tažený profil, méně pak odlitek nebo výkovek. Nejdůležitější technologií přípravy těchto polotovarů je tedy **tváření**. Následuje **tepelné nebo mechanické dělení**, které je zpravidla voleno dle tloušťky materiálu, druhu materiálu, požadované přesnosti, ceny a produktivity. Vesměs se volí mezi mechanickým dělením (řezání pilou) nebo řezáním kyslíkem, plasmou a laserem. **Úkosování** bývá řešeno během tepelného dělení, případně se následně používá mechanické obrobení, což ale zvyšuje náklady. [18]

Čištění materiálu před svařováním může být provedeno mechanickými způsoby pomocí kartáčů, nejlepším způsobem je ale tryskání abrazivem (korund, litinová drť, balotina). Kromě očištění povrchu od rzi, mastnoty a okují, vytváří tryskání i pozitivní povrchové pnutí v materiálu. [18]

Svařovací přípravky jsou základem přípravy výroby, a to jak při manuálním, tak při automatickém svařování. Je možné je dělit z hlediska [18]:

- objemu výroby na:
 - **speciální (jednoučelové)** – přesné rychlé upnutí a uvolnění, vhodné pro hromadnou výrobu, navrženo a zhotoveno pro specifickou sestavu,
 - **modulární (rozebíratelné)** – polohování a fixace s univerzálními upínacími prvky: rámy, svěrky, upínky, dorazy, opěrky, magnetické upínky, čepy, rychloupínky apod.,
- technologického na **stehovací, svařovací a upevňovací**.

Rozdíl v těchto přípravcích je hlavně v tuhosti. Stehovacího přípravku se využívá pro nastehování rozměrově větších a složitějších svařenců. Na rozdíl od svařovacího a upevňovacího přípravku, které jsou dostatečně tuhé za účelem eliminace deformací při svařování, jsou stehovací přípravky lehké konstrukce a důraz je zde kladen na co nejpřesnější sestavení a přístupnost ke spojům. Z důvodu tuhosti existuje pravidlo stehovat od obvodu směrem ke středu. Zároveň by měl být v přípravku proveden dostatečný počet svarů pro dosažení dostatečné tuhosti, aby se sestava poté nedeformovala při volném svařování v upevňovacím přípravku. Při svařování sestehovaného dílu platí naopak pravidlo balancovaného vnášení tepla od středu k okrajům svařence. V rámci eliminace deformací je vhodné pro každý svařenec vytvořit plán sekvencí svařování (viz Obr. 3.6). [18]



Obr. 3.6 Plán sekvence svařování pro omezení deformace [18]

Přípravky by měly z konstrukčního hlediska splňovat následující podmínky [18]:

- **funkční spolehlivost a jednoduchost** - vyloučení omylu při sestavování,
- **přesnost a opakovatelnost** – eliminace dílů mimo výrobní toleranci,
- **dobrou přístupnost svarů pro stehování, svařování, čištění,**
- **tuhost (> tuhost svařence)** – eliminace smršťující síly vznikající při svařování,
- **zajištění chlazení nebo naopak předehřevu,**
- **rychlost upínání a uvolnění,**
- **ochrana funkčních ploch před rozstříkem,**
- **vedení zemního proudu** – důležitá podmínka pro stabilitu oblouku,
- **životnost a minimální náklady na seřízení, údržbu a servis,**
- **speciální požadavky** – požadavky závislé na metodě svařování a druhu materiálu.

Mezi ostatní pomůcky a příslušenství pro svařování se řadí pomůcky pro ochranu a formování kořene svaru, pomůcky pro předehřev, ohřev, dohřev a tepelné zpracování, různé technologické pomůcky, klimatické příslušenství a pomůcky pro dopravu a manipulaci. [18]

3.5 Zajištění kvality procesu svařování

Dosažení požadované kvality při procesu svařování vyžaduje přesné nastavení a kontrolu parametrů. V tomto ohledu jsou nenahraditelným pomocníkem různé monitorovací systémy, jejich příslušenství a kontrola kvality. Obzvláště důležité je to u sériové výroby, kde je vhodné za pomoci externího zařízení monitorovat rychlost

svařování, průtok plynu, rychlost podávání drátu, velikost proudu a napětí na oblouku. Součástí řídicích systémů může být také laserový snímač povrchu úkosu nebo svaru, či termokamera pro kontrolu svarové lázně. Samotnou kapitolu pak tvoří měřky a defektoskopické pomůcky. Častým vybavením automatizovaných linek bývají měřicí rámy, pomocí kterých se kontrolují rozměrové tolerance svařence dle požadavků výroby. [18]

V této oblasti například nabízí již zmiňovaná firma Fronius celkové zastřešení a správu dat svařecích procesů, a to v rámci malých i velkých podniků. Jejich systém WeldCube ukládá svařovací data propojených systémů centrálně do jedné databáze. Se softwarem WeldCube Premium lze vedle TPS/i (Trans Process Solution and interaction) použít také digitální systémy, jako je DeltaSpot. [23]

Před několika lety Fronius představil na trhu MIG/MAG svařovací systémy TPS/i, které se vyznačují individuálně upravitelnými a dodatečně rozšiřitelnými svařovacími systémy. Tento systém disponuje modularizací hardwaru a svařovacích programů, což umožňuje sestavit svařovací systém dle potřeby. Významným prvkem je sběrnice dat SpeedNet spojující všechny komponenty svařovacího systému (svařovací hořák, zdroj atd.). Možné je zaznamenat, zpracovat a interpretovat více informací o oblouku. Celkově tento systém zabraňuje tvorbě nežádoucího rozstříku a u robotického svařování zvyšuje stabilitu procesu. [24]



Obr. 3.7 WireSense (Fronius ČR) – drátová elektroda jako senzor [25]

Názorným příkladem vývoje monitorovacích systémů je poslední novinka Fronius WireSense (viz Obr. 3.7). Drátová elektroda zde funguje jako senzor a je schopná před každým svařováním zkontrolovat polohu dílu. Jde o systém zaručující vyrovnání

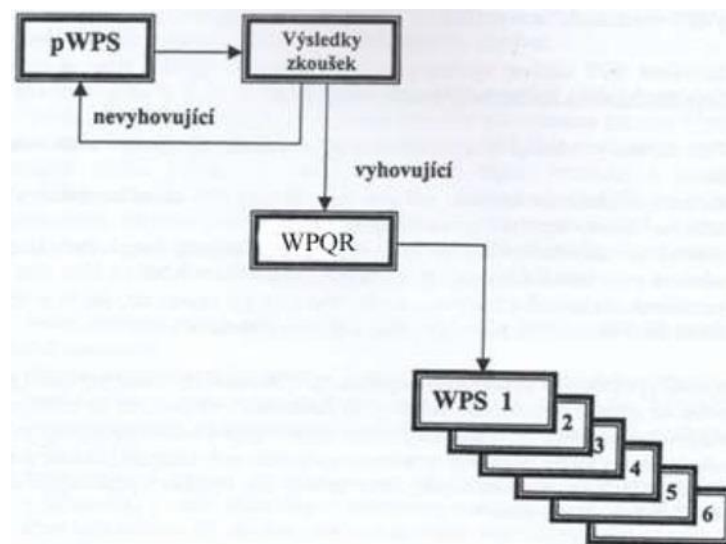
výrobních nepřesností polotovarů a téměř odpadají dokončovací práce. Zároveň jde o jednodušší, robustnější a přesnější alternativu k běžně používaným optickým přístrojům. Senzor ve formě drátu se nejprve několikrát přiblíží k povrchu dílu a získanou informaci o odchylce skutečných rozměrů polotovaru odešle do řídicího systému, kde robot přizpůsobí průběh svařování na základě programu vytvořeného pro konkrétní využití. [25]

3.6 Řízení kvality v průběhu výroby

Svařování jako zvláštní technologický proces se musí podrobovat kontrolám a zkouškám před, v průběhu a po provedení procesu. Důvodem je dodržení požadované kvality svarů, jejich celistvosti, mechanické pevnosti a zachování dostatečných plastických vlastností při cyklickém a dynamickém namáhání v provozních podmínkách. To vše za cílem dosažení požadované technické bezpečnosti, životnosti a trvanlivosti produktu. [26]

Na začátku stojí kvalifikace postupu svařování (viz Obr. 3.8) dle normy ČSN EN ISO 15 6xx, jejíž součástí je [18]:

- **pWPS** – předběžná specifikace postupu svařování
- **WPS** – specifikace postupu svařování
- **WPQR** – záznam o kvalifikaci postupu svařování



Obr. 3.8 Průběh kvalifikace postupu svařování [18]

Zkouška postupu svařování (ČSN EN ISO 15 614) je zhotovení a zkoušení normalizovaného zkušebního kusu uvedeného v pWPS a provedení za účelem

kvalifikace postupu svařování (doložené protokolem WPQR). *Předvýrobní zkouška svařování* (ČSN EN ISO 15 613) má funkci jako zkouška postupu svařování, založena je však na nenormalizovaném zkušebním kusu, který je typický pro výrobní podmínky (vhodnost pro hromadnou výrobu). Dokládá se protokolem WPQR. Další součástí kvalifikace postupu svařování jsou *Normalizovaný postup svařování, Předchozí svářečská zkušenost a Vyzkoušený svařovací materiál*. [16]

K ověření a deklaraci požadovaných vlastností svarů a svařovaných konstrukcí, které zabezpečují garanci odolnosti proti vnějším vlivům (zatížení, jeho charakter, okolní prostředí, teplota aj.) došlo během minulosti ke standardizaci řady testů a zkoušek. Mezi základní **destruktivní zkoušky** patří zkouška tahem, vrubové houževnatosti, tvrdosti, v ohybu a únavové pevnosti. Mezi **speciální zkoušky** se pak řadí mechanické zkoušky za snížených teplot, zkoušky tečení, metalografické šetření (makro a mikrostrukturní rozbor), zkoušky mezikrystalové koroze (MKK), metalurgické čistoty oceli atd. [20]

Dále se užívají **technologické zkoušky svařitelnosti**, konkrétně praskavosti, za cílem zkoušení odolnosti vůči praskání základního materiálu a kvalifikování přídatných materiálů vzhledem ke sklonu k trhlinám. Sklon k trhlinám závisí na podmínkách konkrétní zkoušky a ovlivněn je nejvíce způsobem svařování. Určuje se poměrem délky trhlin k celkové délce svaru. Zkoušky na trhliny za studena jsou např.: CTS, TEKKEN, LEHIGH aj. Zkoušky na trhliny za tepla existují např.: Houldcroftova zkouška, zkouška praskavosti na T – spoji, Varenstraint, Transvarenstraint aj. [15]

Důležitým článkem při zjišťování kvality ve všech etapách výroby a provozní spolehlivosti jsou **nedestruktivní zkoušky** svarů (NDT) neboli defektoskopie, kdy nedochází k porušení svaru [27], [18]:

- **Zkoušky ke zjišťování povrchových (částečně podpovrchových) vad:**

- vizuální metoda,
- penetrační (kapilární) zkoušení,
- magnetická prášková metoda,
- metoda vířivých proudů.

- **Zkoušky ke zjišťování vnitřních vad:**

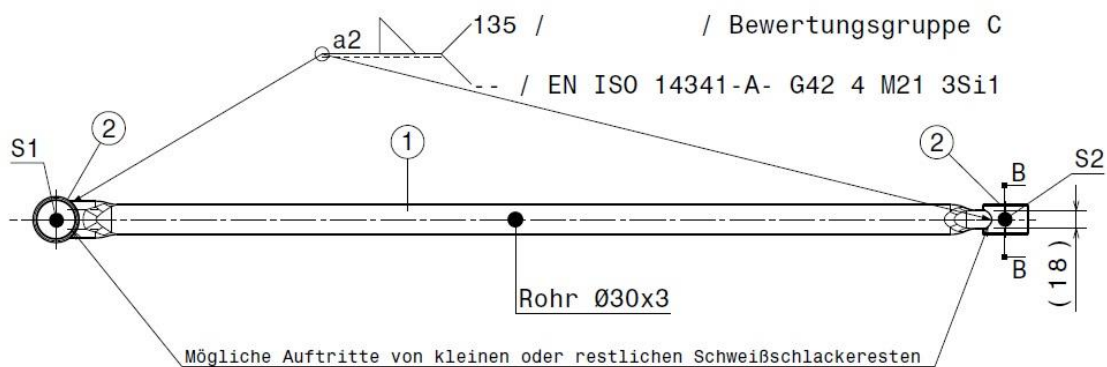
- prozářením,
- ultrazvukem.

Praktická část

4 Výrobek a jeho technologie výroby

Úkolem experimentální části práce bylo vyhledat příčinu problémů při svařovacím procesu Panhardovy tyče s ohledem na kvalitu svarového spoje. Firma Mubea poukázala na několik nedostatků, které by ráda vyřešila, zejména:

- neuspokojivé výsledky zkoušek provaření svarů,
- navržení procesních změn vedoucích ke zvýšení kvality svaru při zachování výrobního cyklu.



Obr. 4.1 Pohled z výkresu svařence – označení svarů²

Svařenec daného dílu se skládá ze dvou koutových svarů (viz Obr. 4.1).

Pro řešení dané problematiky byl navržen následující postup činností:

- 1) Sestavení analýzy současného stavu.
- 2) Analýza svařovacího procesu.
- 3) Požadavek o vytvoření metalografických vzorků a jejich vyhodnocení.
- 4) Rozbor výsledků - vytipování potenciálních kritických míst na svařenci.
- 5) Na základě vyhodnocení současného stavu, analýzy svařovacího procesu a výsledků zkoušek (NDT, DT) stanovit postup pro ověření vhodného nastavení svařovacího procesu.

² viz příložený výkres - Příloha č. 2

4.1 Mubea, spol. s.r.o.

Diplomová práce vznikala ve spolupráci s firmou Mubea, konkrétně ve výrobním závodě u města Žebrák. Mubea patří mezi světové lídry ve vývoji a výrobě automobilových dílů. Firmu **Josef Muhr, Attendorn** založil roku 1916 Josef Muhr (společně se svým synem) v německém městě Attendorn nacházejícím se ve spolkové zemi Severní Porýní – Vestfálsko. Roku 1931 začaly výrobky firmy nést nové jméno **MUBEA** složené z prvních písmen příjmení vlastníků firmy, **MU**(hr) a **BE**(nder) včetně prvního písmena jména města, kde se dodnes nachází hlavní sídlo firmy, **A**(ttendorn). Od založení doposud je firma v rodinném vlastnictví a momentálně ji vede Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. **Thomas Muhr**.



Obr. 4.2 First – to – market³ inovace firmy Mubea

Kromě interního vývoje produktů si Mubea zajišťuje i vlastní vývoj výrobních procesů. Jde tedy o firmu, kde se v rámci výrobního procesu přeměňuje základní materiál (surovina) na hotový konečný výrobek. Na Obr. 4.2 je vidět průřez výrobním portfoliem firmy Mubea se zaměřením na inovace v jednotlivých segmentech za posledních 30 let.

Většina výrobků jsou komponenty dodávané do automobilového průmyslu, několika procentní podíl zaujímá i letectví a ostatní průmysl. Zároveň je Mubea zastoupena nejen v Německu a zbytku Evropy, ale i v Severní Americe, Jižní Americe a Asii. Zákazníci firmy Mubea jsou převážně výrobci automobilů (viz Obr. 4.4). Ve výrobním závodě Žebrák (viz Obr. 4.3) vyrábí Mubea napínací systémy řemenů, díly z uhlíkových

³ z angl.: první na trhu

kompozitů, hlavové opěrky, komponenty sedaček a podvozkové (systémové) díly automobilů.



Obr. 4.3 Výrobní závod Žebrák MUBEA

Výrobní závod Žebrák byl založen roku 1994 a Mubea zde zaměstnává přes 1600 lidí, z nichž jich více jak 150 pracuje v oddělení systémových komponentů. Do produktů zmíněného oddělení patří díly stabilizátorových systémů, jako jsou příčné stabilizátory, tyčky stabilizátorů a svorky upevňující stabilizátory na karoseriích osobních automobilů. Takových součástek se vyrobí v Žebráku přibližně 50 miliónů ročně a celkově se systémové komponenty podílejí na obratu 30 až 35 milionů eur ročně. Závod Žebrák zároveň disponuje prototypovou zkušebnou, vlastní laboratoří a nástrojárnou.



Obr. 4.4 Stálí zákazníci firmy MUBEA

4.1.1 Svařování ve výrobním procesu firmy Mubea

Technologie svařování zaujímá značný podíl právě v oddělení systémových komponentů výrobního závodu Žebrák, kde se vyrábí pouze díly systémových komponentů automobilů, a to včetně dílu, který řeší tato diplomová práce (viz Obr. 4.5).



Obr. 4.5 Produkty oddělení systémových komponentů MUBEA

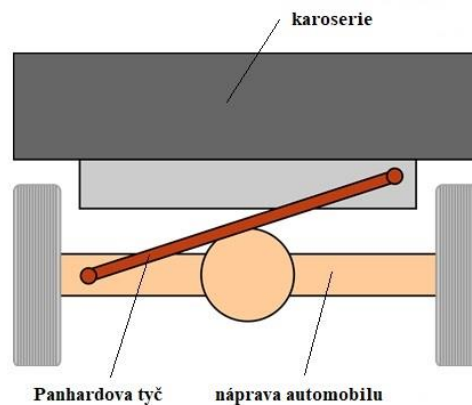
Hlavní výrobní technologie, které se zde používají, jsou tváření a svařování. Po vyrobení jednotlivých komponentů následuje montáž. Tváření je zastoupeno hlavně lisováním svorek stabilizátorů. Výrobky, které zahrnují svařované spoje, se zhotovují za pomoci jednoúčelových svařovacích zařízení a svařovacích robotů. Zastoupeny jsou zde všechny metody obloukového svařování v ochranné atmosféře a strojní park je složen výhradně z techniky německého výrobce svařovacích zařízení Cloos (viz Obr. 4.6).



Obr. 4.6 Ukázka svařovacího zařízení od firmy Cloos

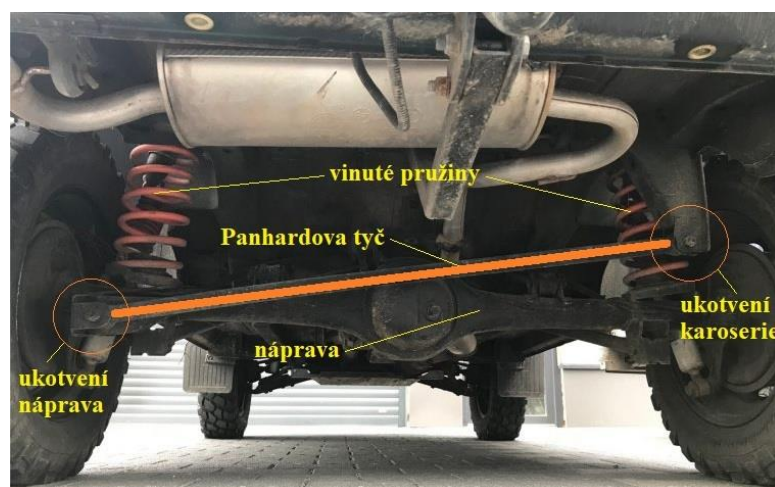
4.1.2 Výrobek – Panhardova tyč

Produkt, který je vyráběn daným svařovacím procesem v oddělení systémových komponentů, se nazývá Panhardova tyč. Jde o podvozkový díl nápravy automobilu využívaný zejména u větších a lehkých užitkových vozidel. Účelem použití tohoto dílu je zamezení příčného vychýlení nápravy vůči vozidlu (karoserii), zjednodušeně řečeno, zamezení posunutí nápravy do strany (viz Obr. 4.7). Nápravy s listovými pružinami vymezují příčný pohyb z podstaty své konstrukce, proto se Panhardova tyč aplikuje hlavně u zadních náprav s pružinami vinutými (viz Obr. 4.8). [28]



Obr. 4.7 Schematické vyobrazení umístění Panhardovy tyče [28]

Ve výrobním procesu Mubea jde z hlediska operace svařování o díl nezvyklých rozměrů. Standardní svařované stabilizátorové tyčky jsou dlouhé přibližně 100 až 150 mm a jejich hlavní částí je tyč o průměru přibližně 5 až 10 mm. Naproti tomu tato konkrétní Panhardova tyč (viz výkres - Příloha č. 1) je 951 mm dlouhá a má tloušťku stěny 3 mm (polotovarem je tedy trubka - viz další kapitola).



Obr. 4.8 Panhardova tyč jako součást podvozku terénního automobilu [28]

4.2 Analýza současného stavu výroby daného dílu

Pro splnění cílů diplomové práce byla vypracována kompletní analýza současného stavu výrobního a svařovacího procesu produktu Panhardova tyč.

4.2.1 Polotovar

Vstupujícími polotovary do operace svařování jsou hlavní trubka a dvě stejná pouzdra. Oba polotovary jsou ze stejného materiálu E355 (chemické složení viz Obr. 4.9).

Označení oceli		Hmotnostní podíl v %					
Značka	Číselné označení	C max	Si max	Mn max	P max	S max	Al celk. b) min
E355	1.0580	0,22	0,55	1,6	0,025	0,025	0,020

Obr. 4.9 Chemické složení oceli E355

Další vlastnosti oceli E355:

- Pevnost v tahu: $R_m = 540$ až 650 MPa
- Mez kluzu: $R_{eH} = 460$ MPa
- Tažnost: $A = 10$ %
- Poměr R_e/R_m : $R_e/R_m = 0,85$ až $0,95$

Hlavní trubka

Polotovary pro hlavní trubku jsou přesné ocelové trubky kalibrované za studena:

- Rozměry: $\varnothing 30$ mm, délka 916,6 mm, tloušťka stěny 3 mm
- Dle normy: EN 10305-3
- Materiál: E355+CR2

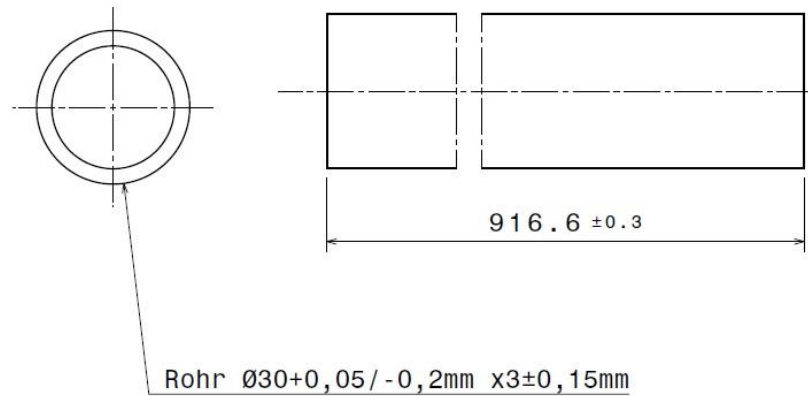
Pozn.:

E...oceli pro strojní součásti

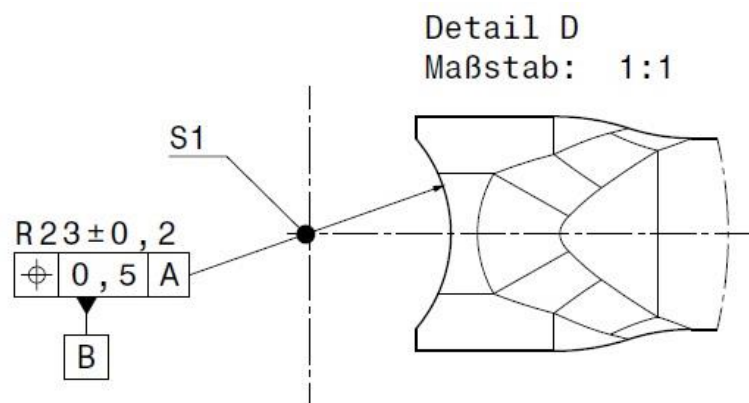
355... minimální mez kluzu [N/mm²]

+CR2...trubky nejsou určeny k tepelnému zpracování po svařování a kalibraci

Polotovar hlavní trubky (viz Obr. 4.10) je již upravený dodavatelem a do výroby je dodáván přímo ve stavu se zploštělými konci a tvarovým výřezem (“měsíčkem“) v místě, kde dochází ke spojení s pouzdem (viz Obr. 4.11).



Obr. 4.10 Pohled z výkresu polotovaru - hlavní trubka⁴



Obr. 4.11 Detail z výkresu polotovaru - zploštělý konec trubky⁵

Pouzdro

Polotovary pro pouzdra jsou ocelové trubky tažené za studena pro strojírenský a automobilový průmysl:

- Rozměry: Ø46 mm, délka 30 mm, tloušťka stěny 3,85 mm
- Dle normy: EN 10305-2
- Materiál: E355+C

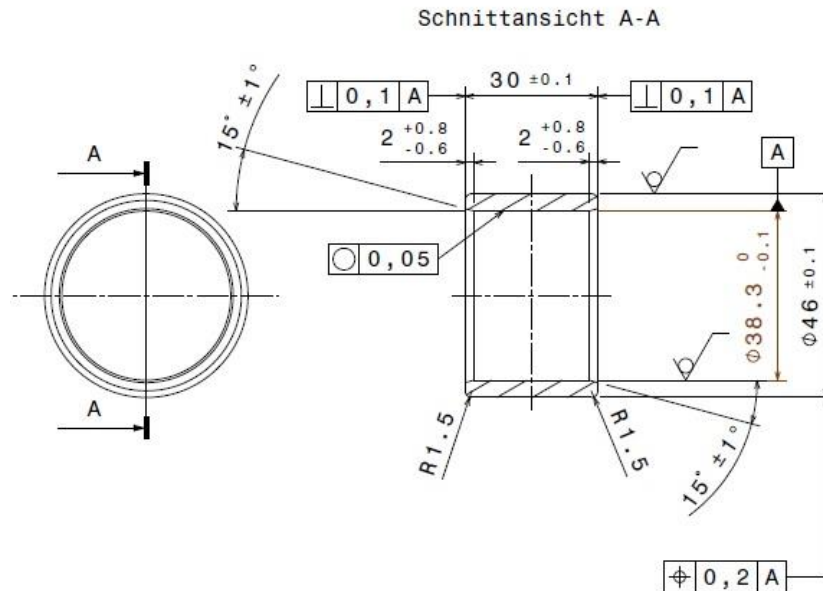
Pozn.:

+C...tažené za studena (tvrdé), po posledním tváření (tahu) tepelně nezpracované

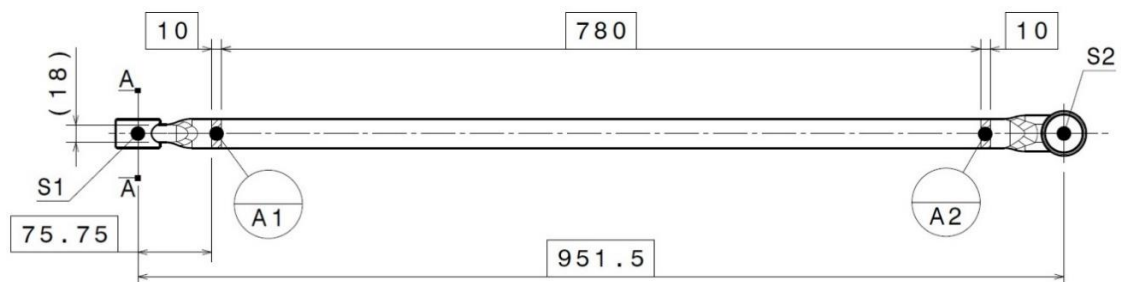
⁴ viz příložený výkres - Příloha č. 5

⁵ viz příložený výkres - Příloha č. 3

Poloha pouzdra (viz Obr. 4.12) vůči hlavní trubce je naznačena na Obr. 4.13. Pouzdra na obou koncích jsou vůči sobě natočena o 90° a jejich osa rotace zaujímá vždy kolmou polohu k ose rotace hlavní trubky.



Obr. 4.12 Řez z výkresu polotovaru - pouzdro⁶



Obr. 4.13 Pohled z výkresu svařence - poloha hlavní trubky a pouzder⁷

Kontrola polotovarů

Při přejímce polotovarů se provádí rozměrová kontrola vždy na 5 kusech z dodávky pouzder a na 5 kusech z dodávky hlavních trubek. Počet dílů v jedné dodávce není stanoven a zpravidla se liší.

⁶ viz příložený výkres - Příloha č. 4

⁷ viz příložený výkres - Příloha č. 2

4.2.2 Výrobní zařízení

Svařovací proces je prováděn na univerzálním pracovišti s využitím svařovacího robota a jednoúčelového polohovadla se svařovacím přípravkem zkonstruovaným přímo pro výrobu daného dílu.

Celý svařovací systém vychází z koncepce německého výrobce Cloos s označením **Qirox** (výkresová dokumentace použitého systému viz Příloha č. 6). Systémy Qirox obsahují všechna řešení pro automatizované svařování a řezání. Lze je stavebnicově uspořádat, a díky tomu stupňovitě rozlišovat jednotlivá řešení dle požadavků výroby. Systém Qirox zahrnuje [29]:

- roboty,
- polohovadla,
- zabezpečovací techniku,
- software,
- senzorku a rozhraní procesních technologií,
- doplnění o sortiment příslušenství a koordinované služby.

Svařovací robot

Svařovací robot vychází z řady QIROX C. **Robot QRC - 350** (viz Obr. 4.14) se šestiosým kloubovým ramenem disponuje standardním “zápěstím“, na které je možné namontovat svařovací hořák, plamenový hořák a další nástroje do hmotnosti 15 kg (další technické údaje viz Tabulka 4.1). Mezi hlavní aplikace patří svařování metodami MIG/MAG, svařování plasmatem, řezání kyslíkem a plasmatem. [29]



Obr. 4.14 Svařovací robot QRC – 350 [29]

Tabulka 4.1 Technické údaje robota [29]

Technické údaje	Robot QRC - 350
Rozsah otáčení osa 1	+170 / -170°
Rozsah otáčení osa 2	+125 / -90°
Rozsah otáčení osa 3	+80 / -210°
Rozsah otáčení osa 4	+179 / -179°
Rozsah otáčení osa 5	+135 / -135°
Rozsah otáčení osa 6	+300 / -300°
Rychlost otáčení osa 1	184°/sec
Rychlost otáčení osa 2	184°/sec
Rychlost otáčení osa 3	177°/sec
Rychlost otáčení osa 4	497°/sec
Rychlost otáčení osa 5	542°/sec
Rychlost otáčení osa 6	528°/sec
Operační rozsah	ø 4470 mm
Operační rozsah - osa 5 +90°	ø 3440 mm
Operační rozsah - výška	2580 mm
Nosnost	15.00 kg
Přesnost opakovaného nastavení polohy	$\Delta \leq s \pm 0,1 \text{ mm}$
Poloměr kolize	500 mm
Plocha podlahy	ø 500 mm
Hmotnost	235 kg

Svařovací zdroj

Svařovací zdroj od firmy CLOOS **GLC 403 Quinto** patří mezi vysoce výkonné impulsní zdroje svařovacího proudu pro rozsah výkonu 400 A (technické údaje viz Tabulka 4.2).



Obr. 4.15 Svařovací zdroj GLC 403 Quinto [29]

Tabulka 4.2 Technické údaje svařovacího zdroje [29]

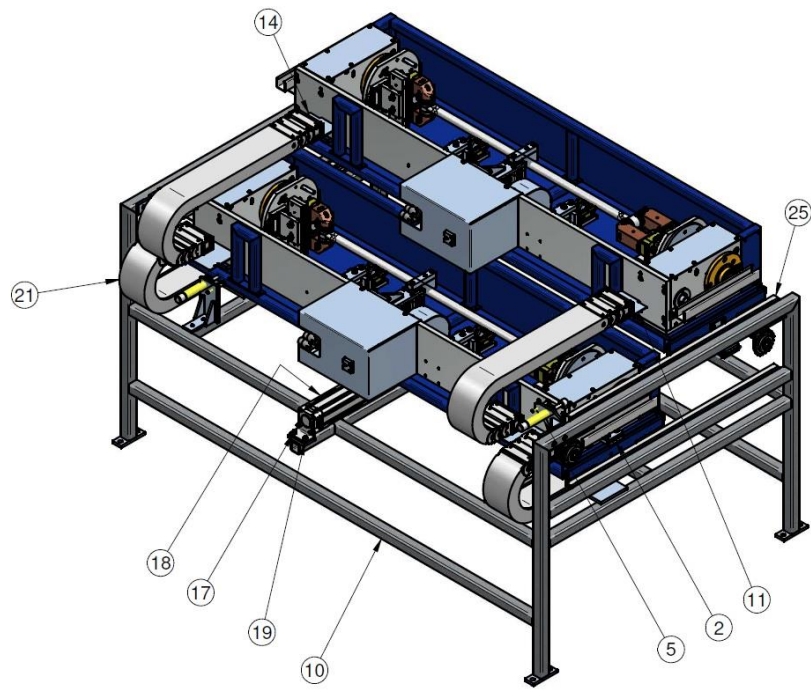
Technické údaje	GLC 403 Quinto
Síťové napětí	3x400V/32A/13,3kVA
Napětí naprázdno	71 V
Svařovací proud	40 A/15 V-400 A/34 V
Svařovací proud při 60%ED (pracovní cyklus)	40 A/15 V-400 A/34 V
Svařovací proud při 100%ED (pracovní cyklus)	310 A při 30 V
Podávací rychlost drátu	0 až 30 m/min
Elektrické krytí	IP23

Polohovadlo

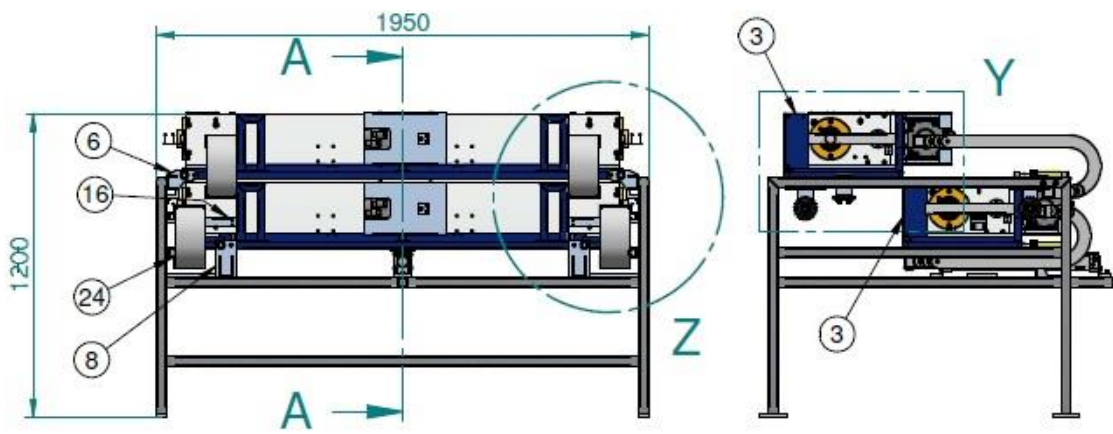
Polohovadlo pro svařování daného dílu se skládá z rámu, na kterém jsou pomocí všech součástek (viz Tabulka 4.3) instalovány dvě pojistné zásuvky, každá pro jeden svařovací přípravek. Zatímco se jeden díl svařuje, je možné zakládat polotovary pro díl další. Polohovadlo je znázorněno na další stránce (viz Obr. 4.16, Obr. 4.17, Obr. 4.18).

Tabulka 4.3 Polohovadlo – seznam položek

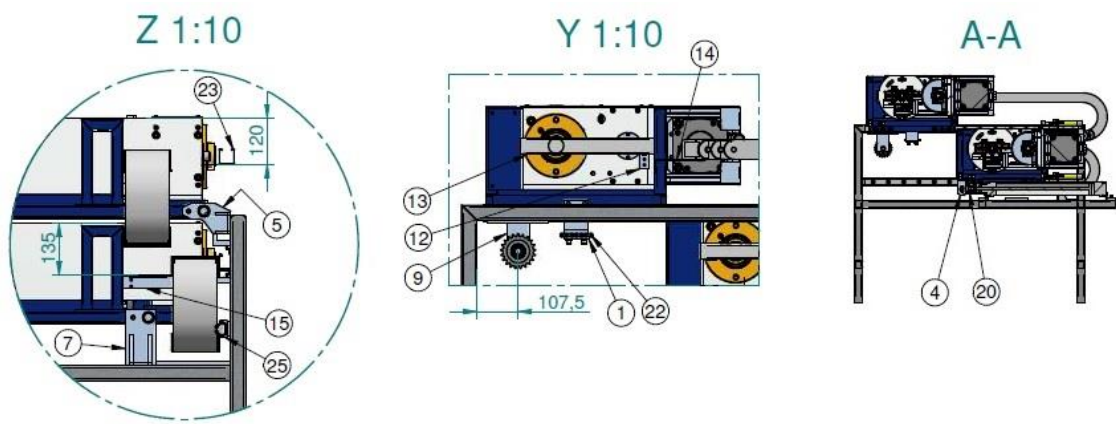
Pozice	Množství	Popis součásti
1	2	svorkovnice, řetěz
2	2	svorkovnice, řetěz
3	2	zásuvka (šuplík)
4	1	držák/držadlo
5	1	tlumič, pravý
6	1	tlumič, levý
7	1	tlumič, pravý spodní
8	1	tlumič, levý spodní
9	4	držák, řetězové kolo
10	1	rám
11	1	držák, levý
12	4	držák
13	4	držák
14	1	držák, pravý
15	1	držák, levý spodní
16	1	držák, pravý spodní
17	2	šroub s válcovou hlavou, M8x16
18	1	standartní válec, DNC-63-500-PPV-A
19	1	patka, HNC-63
20	1	vidlice na tyč, SG-M16
21	4	energetický řetěz, 0.8991 m 58.100.1
22	4	jednořadý řetěz, 083-1 1/2 x 3/16
23	4	mřížkový kanál pro el. vedení, GR 40.040x350mm
24	2	vodící lišta, ULC43-960
25	2	vodící lišta, TLC43-960
26	2	víko
27	2	víko



Obr. 4.16 Polohovadlo

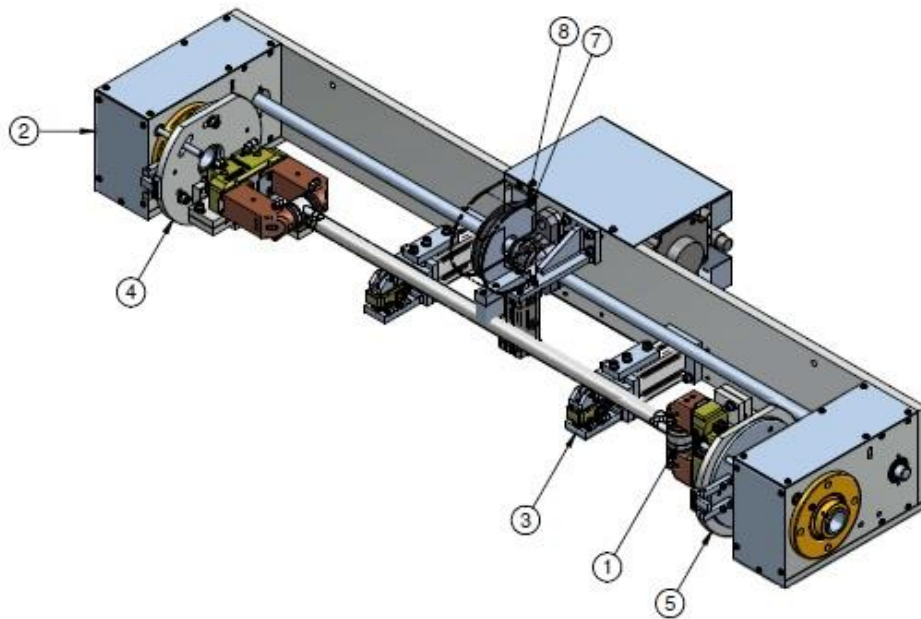


Obr. 4.17 Polohovadlo - pohledy



Obr. 4.18 Polohovadlo – řez, detaily

Svařovací přípravek



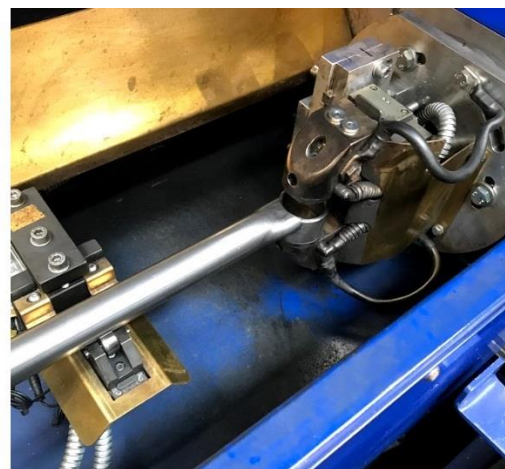
Obr. 4.19 Svařovací přípravek

1 - podpora, 2 – podstavec, 3 - upínací jednotka, 4 - upínací jednotka levá, 5 - upínací jednotka pravá, 7 - řemenice (8M-56S-12), 8 - ozubený řemen (8MGT-720-12)

Svařovací přípravek (viz Obr. 4.19) slouží k upnutí polotovarů. Nejprve jsou uložena pouzdra do postranních podpěr č. 1, poté je založena hlavní trubka na upínací jednotky č. 3. Následným pohybem přitiskne upínací jednotka levá č. 4 a pravá č. 5 pouzdra k hlavní trubce, čímž by měla být vymezena veškerá vůle a polotovary ve správné poloze ke spojení. Svařovací přípravky jsou dva, každý v jedné zásuvce. Spodní je označen číslem 1 a horní číslem 2.



a)



b)

Obr. 4.20 Upínání polotovarů – a) levá strana, b) pravá strana

4.2.3 Technologické faktory

Ochranná atmosféra

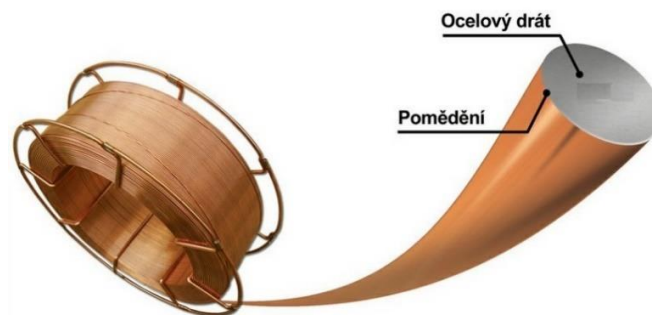
Ochranná atmosféra se skládá z dvousložkového směšného plynu s obsahem:

- 96 % argonu + 4 % kyslíku

Přídavný materiál

Jako přídavný materiál se používá:

- drát \varnothing 1 mm G3Si1
- chemické složení: 1,46 % Mn, 0,078 % C, 0,85 % Si



Obr. 4.21 Svařovací drát G3Si1 [30]

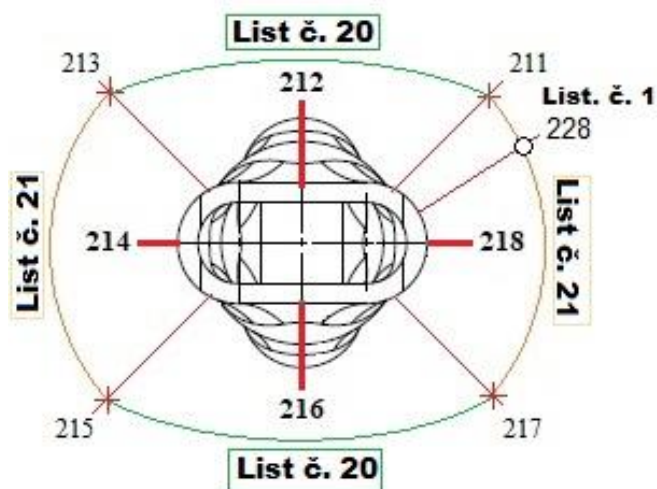
Svařovací drát (viz Obr. 4.21) je určený pro svařování nelegovaných a nízkolegovaných uhlíko-manganových konstrukčních ocelí metodou MAG a využívá se u svařování ocelových konstrukcí. Je vhodný pro svařování koutových a tupých svarů ve všech svařovacích polohách. Svařování je možné v ochranné atmosféře směšného plynu Ar + CO₂ nebo i v čistém CO₂. [30]

Svařovací parametry

Pro svaření jednoho pouzdra k hlavní trubce jsou naprogramovány čtyři skupiny různých svařovacích parametrů (viz Tabulka 4.4). Každá skupina svařovacích parametrů slouží vždy k jednomu určitému úseku svaru. Parametry **1 (2)** slouží ke stehování, **10 a 11 (20 a 21, 30 a 31, 40 a 41)** k vytvoření svarové housenky po celém obvodu a parametr **12 (22, 32, 42)** k převaření konce svarové housenky přes její začátek. Zároveň se parametry **10 a 11 (20 a 21, 30 a 31, 40 a 41)** střídají po obvodu trubky a každý je určen pro konkrétní úsek (viz Obr. 4.22). Svarová housenka tak vzniká na rovnějším (delším) úseku s parametrem **10 (20, 30, 40)** a na kratším úseku v obloucích s parametrem **11 (21, 31, 41)**.

Tabulka 4.4 Svařovací parametry

Svařovací přípravek č.1											
strana	Svařovací parametry										
	list	Čas čekání [ms] ±10 %	Rychlost [cm/min] ±10 %	Posuv drátu [m/min] ±10 %	Frekvence pulsu [Hz] ±10 %	Zákl. proud [A] ±10 %	Čas pulsu [ms] ±10 %	Napětí pulsu [V] ±10 %	Předfuk plynu [s]	Zapal. rychlost [m/min] ±10 %	Dofuk plynu [s]
•	1	200	80	8	125	75	2,1	35	0,2	3,6	0,1
Pravá	10	0	35	6,3	90	75	2,1	31	0	3,5	0
	11	0	18	6	80	75	2,1	31	0,2	3,5	0
	12	0	43	5,2	80	80	2,1	33	0	3,5	0
Levá	20	0	36	6,4	90	80	2,1	31	0	3,5	0
	21	0	28	4,7	80	75	2,1	28	0,2	3,5	0
	22	0	43	5,2	80	80	2,1	33	0	3,5	0
Svařovací přípravek č.2											
strana	Svařovací parametry										
	list	Čas čekání [ms] ±10 %	Rychlost [cm/min] ±10 %	Posuv drátu [m/min] ±10 %	Frekvence pulsu [Hz] ±10 %	Zákl. proud [A] ±10 %	Čas pulsu [ms] ±10 %	Napětí pulsu [V] ±10 %	Předfuk plynu [s]	Zapal. rychlost [m/min] ±10 %	Dofuk plynu [s]
•	2	300	80	8	125	75	2	35	0,2	3,6	0,1
Pravá	30	0	35	6,4	90	80	2,1	31,5	0	3,5	0
	31	0	18	5,5	80	75	2	28	0,2	3,5	0
	32	0	41	5,3	85	80	2,1	32	0	3,5	0
Levá	40	0	36	7,4	90	80	2,1	32,5	0	3,5	0
	41	0	30	4	80	75	2	25,5	0,2	3,5	0
	42	0	42	5,4	85	80	2,1	33,5	0	3,5	0
Další parametry shodné pro všechny úkony: Zahoření: 45 % ±10 %											

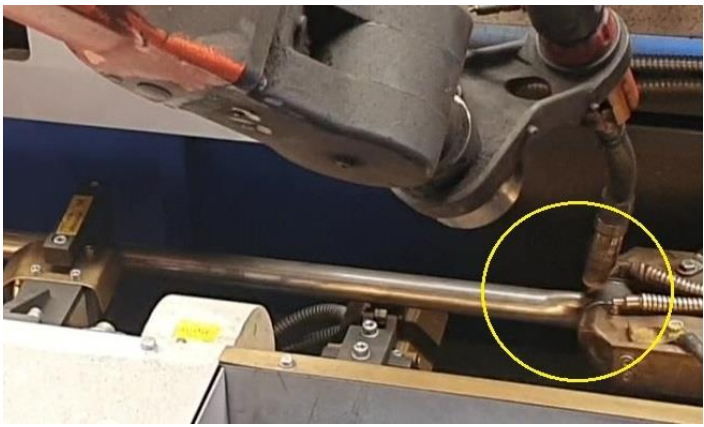



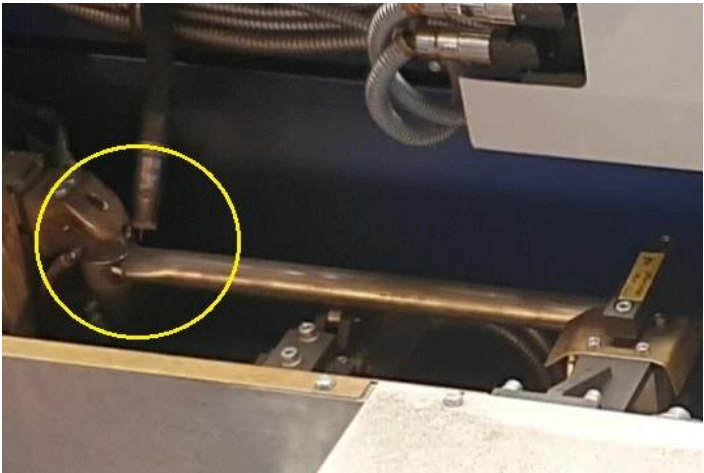

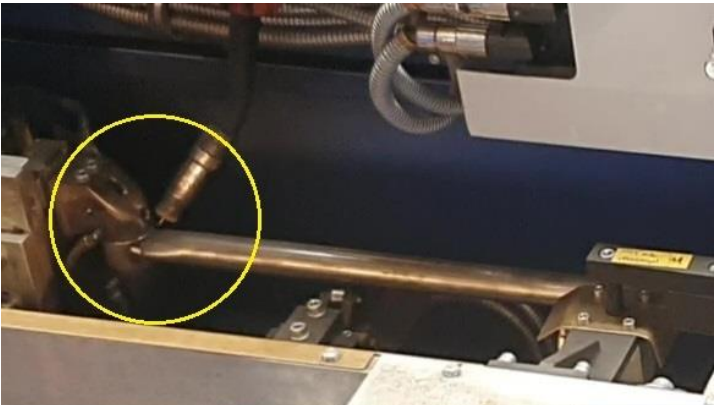
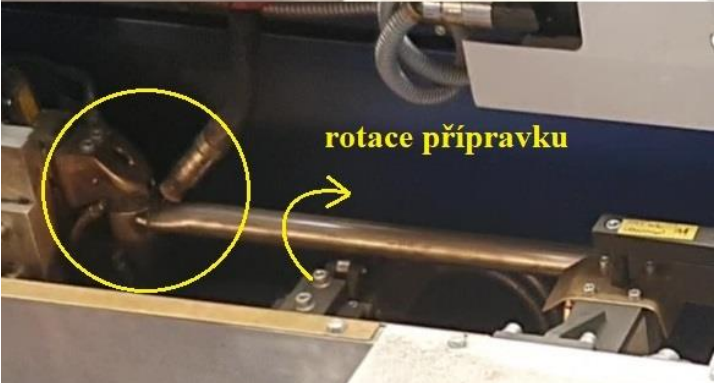
Obr. 4.22 Rozdělení svařovacích parametrů po obvodu trubky – přípravek č. 1, levá strana

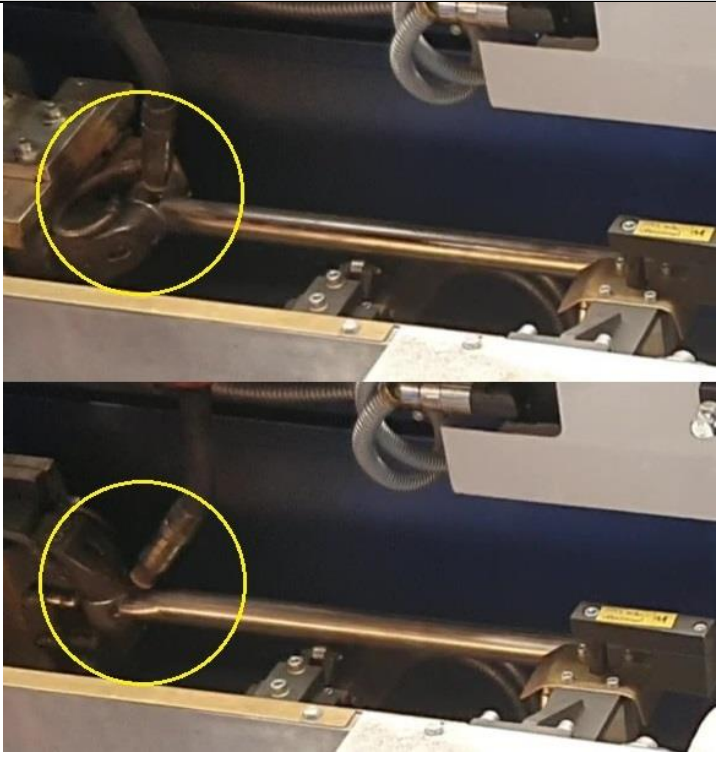
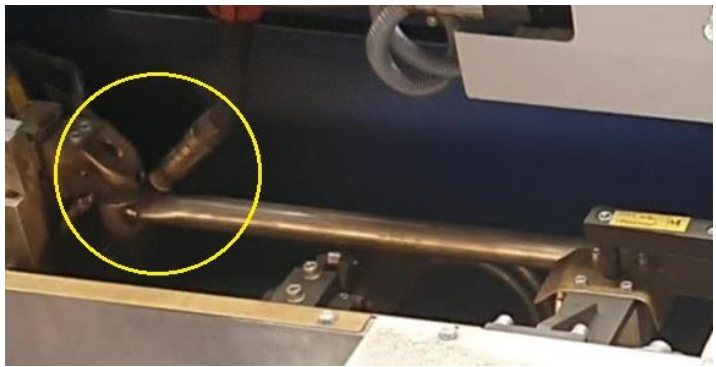

4.2.4 Technologický postup operace svařování

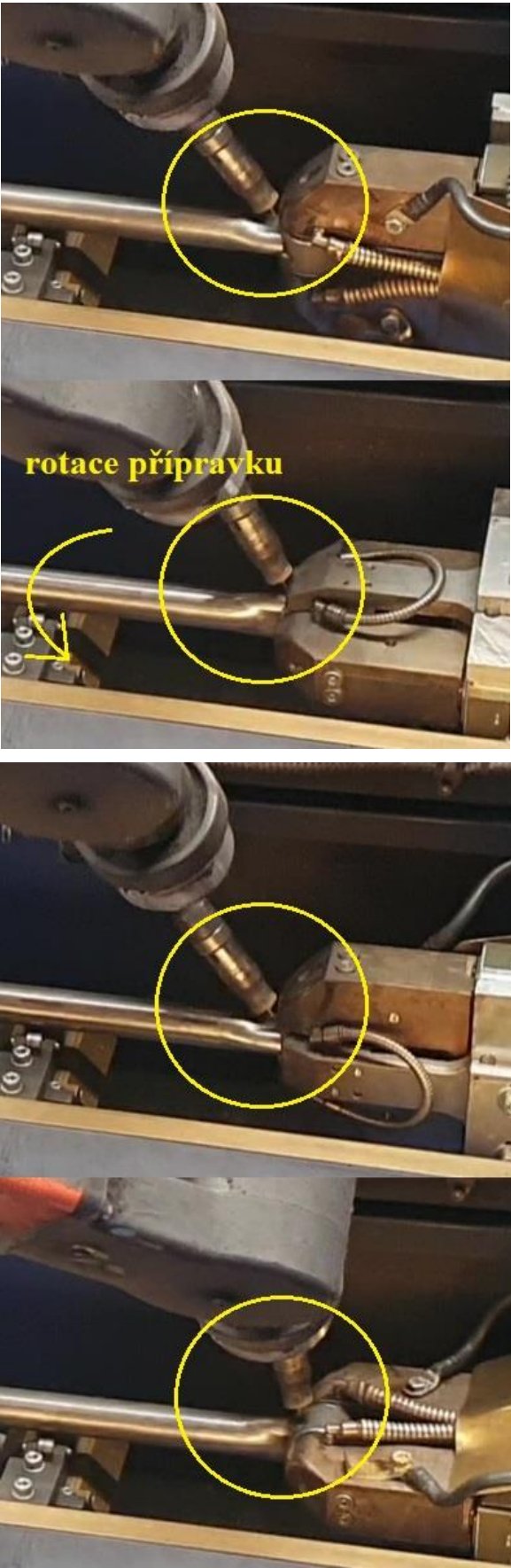
Demonstrativní technologický postup operace svařování (viz Tabulka 4.5) je tvořen názvem úseku, označením skupiny svařovacích parametrů použitých při daném úseku (viz Tabulka 4.4) a fotodokumentací operace. Fotky byly pořízeny ze zadní strany polohovadla z buňky svařovacího zařízení, proto jsou strany značeny opačně.


Tabulka 4.5 Technologický postup operace svařování

	Úsek	Parametry	Fotodokumentace
1	Stehování bodu 1 (levá strana)	List č. 1	
2	Stehování bodu 2 (pravá strana)	List č. 1	

	Úsek	Parametry	Fotodokumentace
3	Stehování bodu 3 (pravá strana)	List č. 1	
4	Odklopení přídržovače	-	
5	Vytvoření svarové housenky po celém obvodu (pravá strana)	List č. 10 a 11	 

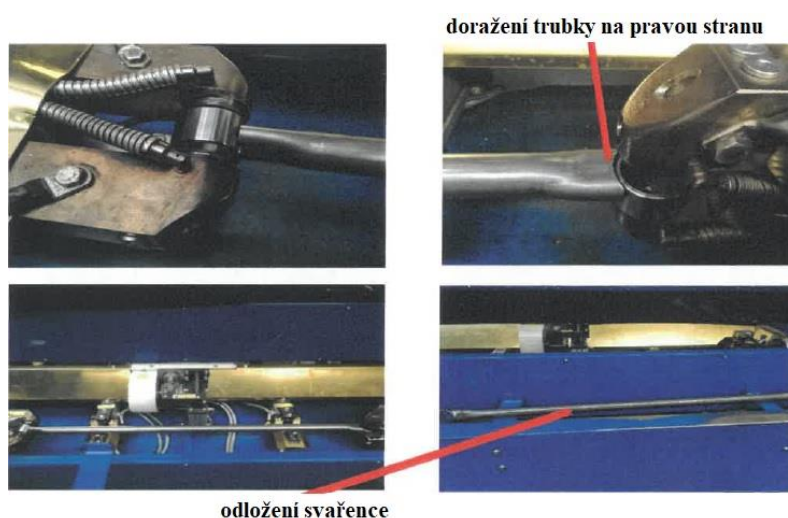
	Úsek	Parametry	Fotodokumentace
			
6	Převaření svarové housenky přes její začátek (pravá strana)	List č. 12	
7	Stehování bodu 4 (levá strana)	List č. 1	

	Úsek	Parametry	Fotodokumentace
8	Vytvoření svarové housenky po celém obvodu (levá strana)	List č. 20 a 21	

	Úsek	Parametry	Fotodokumentace
9	Převaření svarové housenky přes její začátek (levá strana)	List č. 22	

Pracovní postup vycházející z podnikové dokumentace určený pro obsluhu svařovacího systému:

- 1) Před započítím výroby zkontrolovat vstupní díly, zda souhlasí s výrobní zakázkou.
- 2) Díly správně založit do svařovacího přípravku (viz Obr. 4.23). Hlavní trubku dorazit na pravou stranu. Svařovací proces se spustí pomocí startovacího tlačítka.



Obr. 4.23 Po svaření díl odložit na odkládací držáky

- 3) Po dokončení svařovacího procesu díly 100% kontrolovat na kompletnost svaru a rozstřík:
 - a) svar nesmí být nedovařený a rozpěněný,
(pozn. pojem rozpěněný vychází z podnikové dokumentace – jedná se o poretitu)
 - b) svar nesmí obsahovat díry,
 - c) svar musí být proveden bez rozstříků/kuliček a bez ostřin,
 - d) jednotlivé části svařence nesmí být mechanicky poškozeny.
- 4) Díly balit dle balicího předpisu.

5 Návrh řešení

Úvodem praktické části byly stanoveny dva hlavní problémy daného výrobního procesu, tj. neuspokojivé výsledky zkoušek provaření svarů a zvýšení kvality svaru při zachování výrobního cyklu. Souvislost mezi těmito dvěma problémy, která může být na první pohled nejasná, se po bližším seznámení dosavadních kroků firmy Mubea k vylepšení procesu ukázala být následující: čím byly parametry svařování nastavené na vyšší výkon (svar splňoval normy provaření), tím delší čas byl pro vytvoření svaru potřeba. Stav svařovacího procesu, který je detailně popsán v kapitole č. 4, odpovídá dle firmy jistému kompromisu mezi dostatečným provařením svaru do základního materiálu a dosažením optimálního času pro jeho vytvoření. Zmíněný kompromis však nebyl shledán ze strany firmy jako dostatečně stabilní řešení pro plánovaný objem výroby.

5.1 Zkoušky

5.1.1 Normy

Pro svary, které jsou na daném dílu vytvářeny, jsou předepsány tyto normy (viz výkres svařence Příloha č. 2):

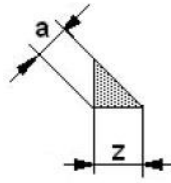
- EN ISO 14341
- podniková norma zákazníka

EN ISO 14341

Mezinárodní norma popisující svařovací materiály, tzn. drátové elektrody pro obloukové svařování nelegovaných a jemnozrnných ocelí v ochranném plynu a jejich svarové kovy. Norma stanovuje požadavky na klasifikaci drátových elektrod podle jejich chemického složení, případně podle meze kluzu, pevnosti v tahu a tažnosti čistého svarového kovu.

Podniková norma zákazníka (stupeň kvality C)

Norma vychází z ČSN EN ISO 5817 a zabývá se výrobou, zajištěním kvality a konstrukcí pro ocelové spoje vytvářené svařováním elektrickým obloukem. Konkrétně se vztahuje na metody obloukového svařování v ochranných atmosférách inertního a aktivního plynu MIG/MAG, TIG a na metodu svařování plazmatem. Norma zároveň definuje rozměrové parametry svarů, princip svařování elektrickým obloukem v ochranných atmosférách, požadavky kladené na vyráběné spoje, způsoby hodnocení svarových spojů atd. Základní geometrie svaru je popsána na Obr. 5.1.



Obr. 5.1 Zjednodušená definice geometrie koutového svaru

Legenda:

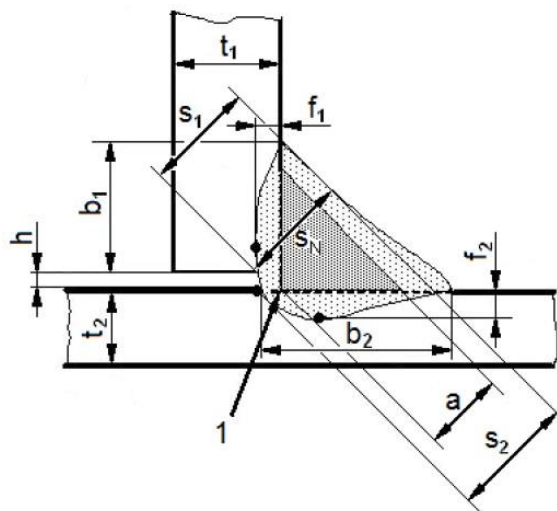
- a* jmenovitá velikost koutového svaru
z velikost natavení základny (rozlišuje se z_1 a z_2)

U daného dílu se ve svarovém spoji po celém obvodu trubky objevují dva druhy spojů:

1) Koutový svar s hlubokým průvarem

Norma popisuje následující požadavky (viz Obr. 5.2):

- pokud není mezera rovnoběžná, velikost mezery h musí být určena v kořeni svaru (viz Obr. 5.3)
- $s_1 \geq 0,7 \cdot t_{\min}$, $s_2 \geq 0,7 \cdot t_{\min}$
- pokud nemůže být bezprostředně určena tloušťka svaru s_1 a s_2 , může být jako alternativní hodnota zvolena nejmenší společná tloušťka svaru s_N .
 - $s_N \geq s_1$, $s_N \geq s_2$, a $s_N \geq 0,7 \cdot t_{\min}$
- $a \leq 0,7 \cdot t_{\min}$ (konstrukční doporučení)
- $f_1 \geq 0,2 \text{ mm}$, $f_2 \geq 0,2 \text{ mm}$
- $b_i \geq t_{\min}$

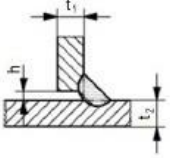


Obr. 5.2 Koutový svar

Legenda:

- a* konstrukční tloušťka svaru (viz Obr. 5.1)
b_i šířka provaření ($i = 1, 2$)

- f_i hloubka provaření ($i = 1, 2$)
 h velikost mezery
 s_i tloušťka svaru (s hlubokým průvarem) ($i = 1, 2$)
 s_N nejmenší společná tloušťka svaru
 t_i tloušťka základního materiálu ($i = 1, 2$)
 l teoretický bod kořene svaru

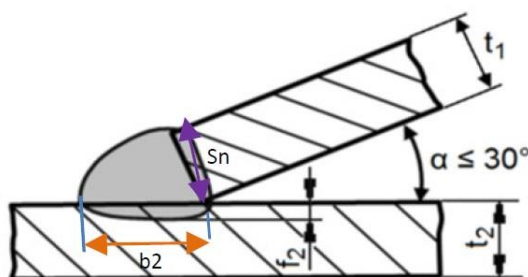
No.	Referenční číslo	Vada	Poznámky	Stupeň kvality		
				D	C	B
Koutové svary						
3.2.1	617	Velikost mezery koutového svaru u výlisků	Použije se velikost mezery v bodě kořene svaru.	If $t \leq 1.0$ mm: $h \leq 0.8$ mm If 1.0 mm $< t \leq 5.4$ mm: $h \leq 0.5 \times t_{\min} + 0.3$ mm If $t > 5.4$ mm: $h \leq 3.0$ mm	If $t \leq 1.0$ mm: $h \leq 0.5$ mm If 1.0 mm $< t \leq 5.4$ mm: $h \leq 0.5 \times t_{\min}$ If $t > 5.4$ mm: $h \leq 2.7$ mm	If $t \leq 1.4$ mm: $h \leq 0.5$ mm If 1.4 mm $< t \leq 5.4$ mm: $h \leq 0.5 \times t_{\min} - 0.2$ mm If $t > 5.4$ mm: $h \leq 2.5$ mm
3.2.2	617	Velikost mezery koutového svaru u obráběných dílů a precizních výlisků		$h \leq 0.5$ mm + $0.07 \times t_{\min}$ If $t > 3$ mm: $h \leq 1$ mm + $0.2 \times t_{\min}$	$h \leq 0.3$ mm + $0.07 \times t_{\min}$ If $t > 3$ mm: $h \leq 0.5$ mm + $0.15 \times t_{\min}$	$h \leq 0.2$ mm + $0.07 \times t_{\min}$ If $t > 3$ mm: $h \leq 0.5$ mm + $0.07 \times t_{\min}$

Obr. 5.3 Odchyly od stanovených rozměrů a dodatky k DIN EN ISO 5817 (stupeň kvality C)

2) Koutový svar na šikmém spoji

Šikmý spoj je možné použít pouze při tloušťce základního materiálu $t_i \geq 1,5$ mm. Následně jsou popsány tyto požadavky (viz Obr. 5.4):

- čelo horní stěny musí být kompletně natavené (čelní pokrytí $f_{st} = 100$ %)
- $f_2 \geq 0,2$ mm
- $s_N \geq t_{\min}$
- $b_2 \geq t_{\min}$



Obr. 5.4 Koutový svar na šikmém spoji

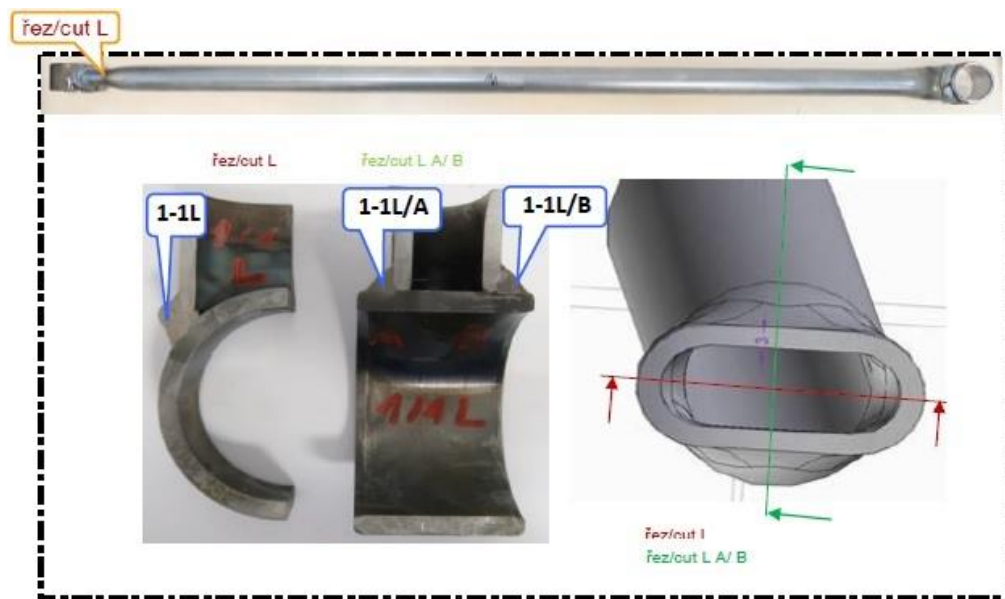
Legenda:

- f_2 hloubka provaření
 t_i tloušťka základního materiálu ($i = 1, 2$)

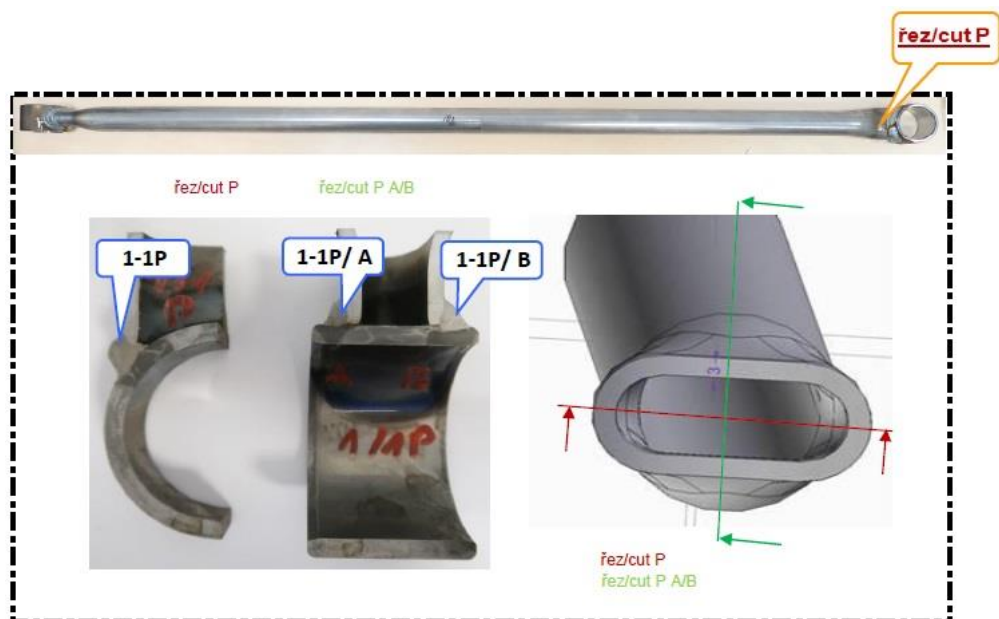
5.1.2 Metalografické vzorky

Poskytnuté protokoly zobrazovaly řezy a následně popisovaly jejich vyhodnocení. Řezy byly provedeny ve dvou rovinách a pro účel vyhodnocení parametrů svaru byla sledována tři různá místa s označením (viz Obr. 5.5 a Obr. 5.6):

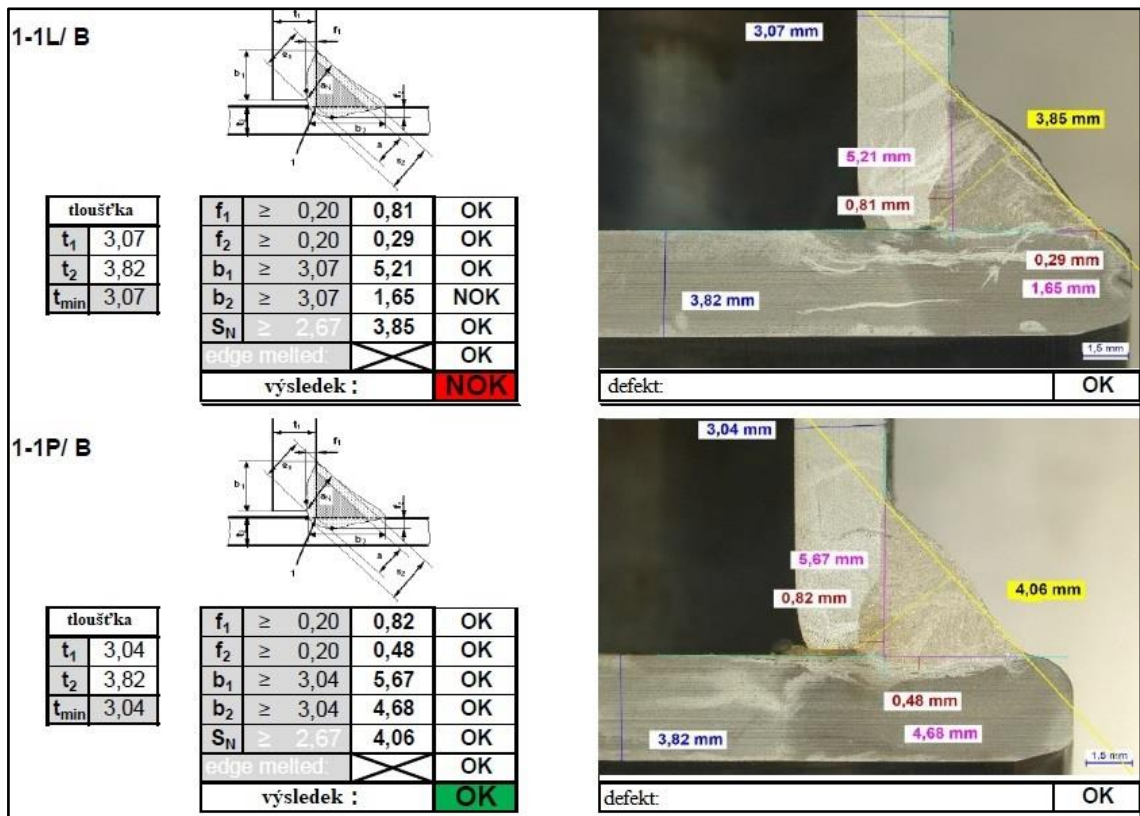
- 1 – 1 L(P)/A,
- 1 – 1 L(P)/B,
- 1 – 1 L(P).



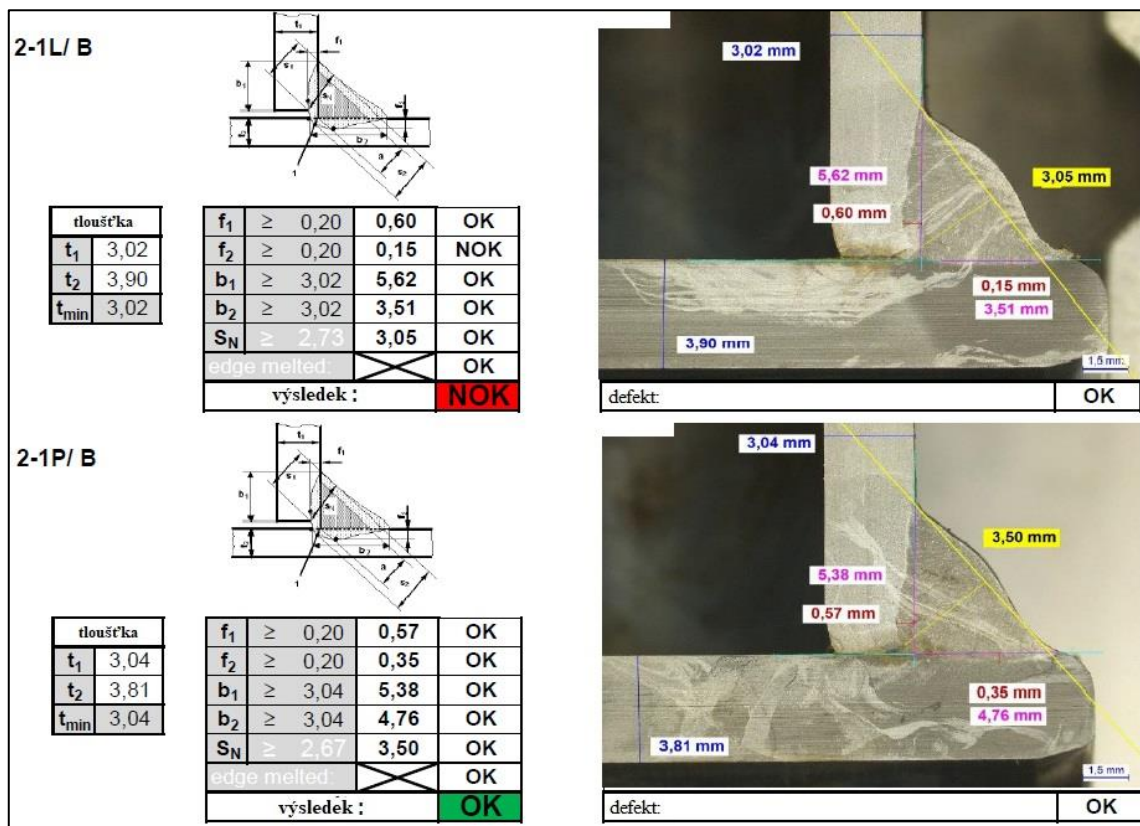
Obr. 5.5 Označení místa řezu na levé straně svařence



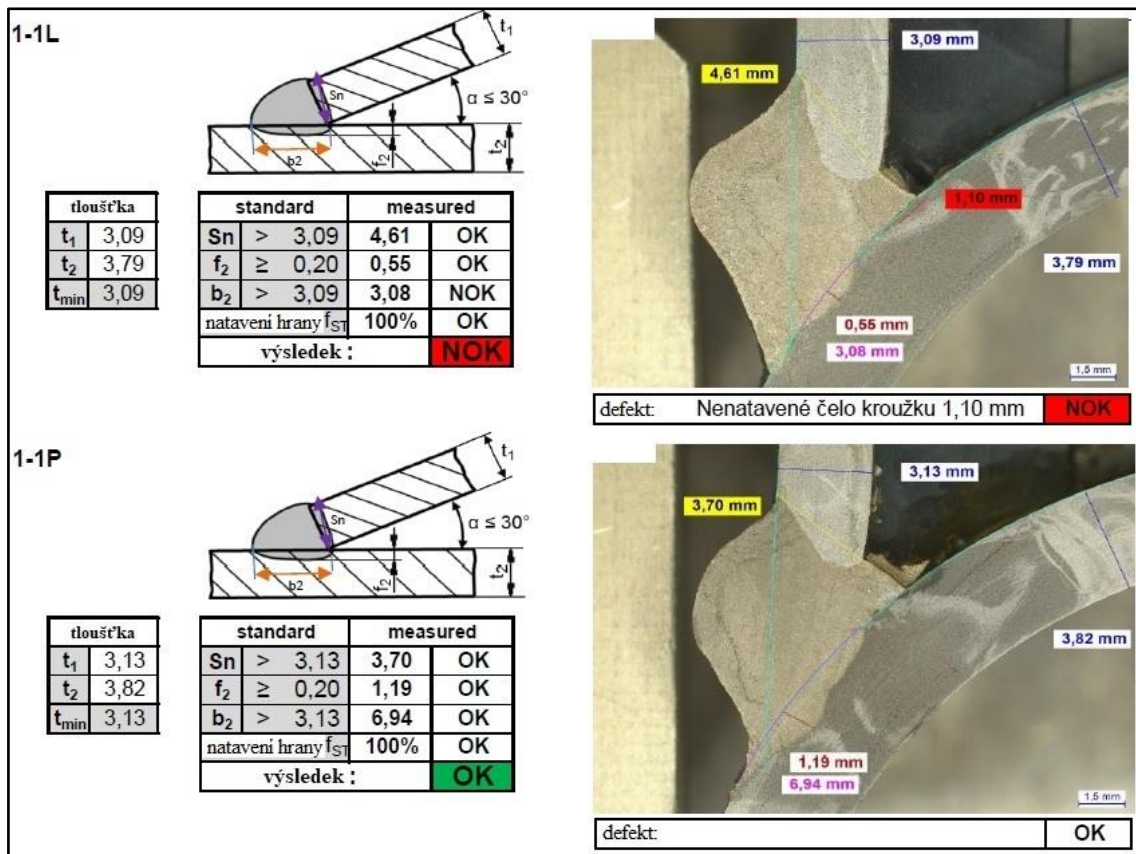
Obr. 5.6 Označení místa řezu na pravé straně svařence



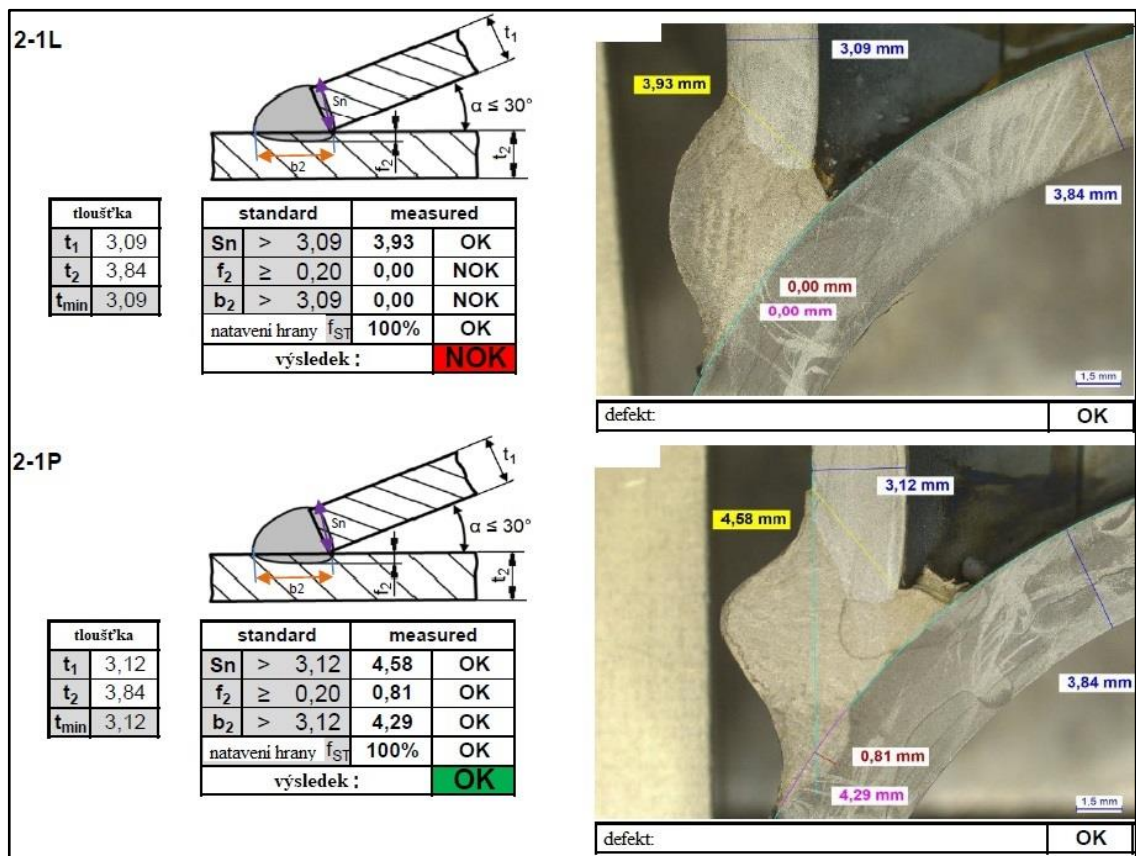
Obr. 5.7 Vyhodnocení řezu 1 – 1 L/B a 1 – 1 P/B (porovnání levé a pravé strany svařence)



Obr. 5.8 Vyhodnocení řezu 2 – 1 L/B a 2 – 1 P/B (porovnání levé a pravé strany svařence)



Obr. 5.9 Vyhodnocení řezu 1 – 1L a 1 – 1P (porovnání levé a pravé strany svařence)



Obr. 5.10 Vyhodnocení řezu 2 – 1L a 2 – 1P (porovnání levé a pravé strany svařence)

Z poskytnutých protokolů (viz příklad na Obr. 5.7 až Obr. 5.10) byla vytipována kritická místa (nevyhovující kvalita svaru) na svařenci a ty podrobeny bližší kontrole. Tabulka 5.1 zobrazuje výsledky provedených zkoušek na svařenci dílu Panhardova tyče. Protokoly č. 1 a č. 2 vznikly ještě před změnou výrobního procesu dodavatele polotovaru. Jednalo se o rozměrové nepřesnosti hlavní trubky, a to především na jejich zploštělých koncích s tvarovým výřezem. Protokoly č. 3 a č. 4, na které je analýza zaměřena, byly vytvořeny během vypracování diplomové práce a reflektují aktuální možnosti daného výrobního procesu. Každý protokol reprezentuje náhodně vybraný kus z předvýrobní série daného dílu.

Tabulka 5.1 Výsledky zkoušek ze čtyř různých svařenců

Umístění řezu	Označení zkoušeného dílu			
Levá strana	1 (1465_5_1-1_)	2 (1466_5_1-1x_)	3 (1613_5_1-1)	4 (1613_5_2-1)
1-1L/ A	OK	NOK	OK	OK
1-1L/ B	OK	NOK	NOK	NOK
1-1L	OK	OK	NOK	NOK
Pravá strana				
1-1P/ A	OK	NOK	OK	OK
1-1P/ B	OK	NOK	OK	OK
1-1P	NOK	OK	OK	OK
Pozn.: OK – v pořádku NOK – v nepořádku				

Dle výsledků protokolů č. 3 a č. 4 lze říct, že problémy nastávají pouze na levé straně svařence, např.:

- v řezu **2 – 1 L/B** může být příčinou nedostatečného provaření ($f_2 = 0,15$ mm) poloha hořáku (vysoko z pohledu snímku) a zřejmě i jeho úhel naklonění,
- v řezu **1 – 1 L/B** dochází k dostatečnému provaření a hodnota f_2 je v pořádku, oproti tomu ale neodpovídá šířka provaření b_2 , což nasvědčuje podobnému problému jako u řezu **2 – 1 L/B**

Prvotním úkolem tedy bylo získání informací z nastavení pozice svařovacího hořáku. Vzhledem k tomu, že se jedná o symetricky shodné součásti a zrcadlově otočenou dráhu robota, můžeme předpokládat nedokonalost při programování. Nabízí se tedy možnost jejího ověření měřením.

5.2 Ověření vhodného nastavení technologického procesu

Pro ověření nastavení technologického procesu byl prvně vypracován technologický výrobní postup (viz Tabulka 5.2) dílu Panhardova tyč vycházející z vykonané analýzy.

Tabulka 5.2 Technologický postup

Č. op.	Popis operace	Pracoviště (stroj)	Čas [s]	Poznámky	
10	Převzetí a rozměrová kontrola polotovarů	-	-	5 kusů z dodávky	
20	Vizuální kontrola polotovarů	(před založením)	-	-	
30	Založení polotovarů do přípravku č. 1 a upnutí	Polohovadlo, přípravek č. 1	20	viz str. 54, 56	
40	Posuv přípravku č. 1 do pozice svařování, posuv přípravku č. 2 do pozice zakládání	Polohovadlo, přípravek č. 1, přípravek č. 2	5	viz str. 54, 56	
50	Stehování bodu 1, 2, 3	Robot QRC – 350, zdroj GLC 403 Quinto	13	viz str. 52, 53	Svařování v přípravku č. 1
55	<i>Souběžně probíhá vyjmutí svařence z přípravku č. 2</i>	<i>Polohovadlo, přípravek č. 2</i>	3	<i>viz str. 54, 56</i>	
60	Svařování – vytvoření svarové housenky (pravá strana)	Robot QRC – 350, zdroj GLC 403 Quinto	28	viz str. 52, 53	
65	<i>Souběžně probíhá zakládání polotovarů do přípravku č. 2</i>	<i>Polohovadlo, přípravek č. 2</i>	20	<i>viz str. 54, 56</i>	
70	Stehování bodu 4	Robot QRC – 350, zdroj GLC 403 Quinto	4	viz str. 52, 53	
80	Svařování – vytvoření svarové housenky (levá strana)	Robot QRC – 350, zdroj GLC 403 Quinto	28	viz str. 52, 53	
90	Posuv přípravku č. 2 do pozice svařování, posuv přípravku č. 1 do pozice zakládání	Polohovadlo, přípravek č. 1, přípravek č. 2	5	viz str. 54, 56	
100	Stehování bodu 1, 2, 3	Robot QRC – 350, zdroj GLC 403 Quinto	12	viz str. 52, 53	Svařování v přípravku č. 2
105	<i>Souběžně probíhá vyjmutí svařence z přípravku č. 1</i>	<i>Polohovadlo, přípravek č. 1</i>	3	<i>viz str. 54, 56</i>	
110	Svařování – vytvoření svarové housenky (pravá strana)	Robot QRC – 350, zdroj GLC 403 Quinto	27	viz str. 52, 53	
115	<i>Souběžně probíhá zakládání polotovarů do přípravku č. 1</i>	<i>Polohovadlo, přípravek č. 1</i>	20	<i>viz str. 54, 56</i>	
120	Stehování bodu 4	Robot QRC – 350, zdroj GLC 403 Quinto	4	viz str. 52, 53	
130	Svařování – vytvoření svarové housenky (levá strana)	Robot QRC – 350, zdroj GLC 403 Quinto	28	viz str. 52, 53	
140	Posuv přípravku č. 1 do pozice svařování, posuv přípravku č. 2 do pozice zakládání	Polohovadlo, přípravek č. 1, přípravek č. 2	5	viz str. 54, 56	
150	Čištění svařovacího hořáku	Čistící stanice	8		

Následovně došlo ke shrnutí a součtu dílčích časů výrobních operací dle technologického postupu (viz Tabulka 5.3) a byl definován celkový výrobní cyklus, který zahrnuje svařování v přípravku č. 1 a č. 2. Celkový výrobní cyklus zahrnuje dílčí cykly 1 a 2, které obsahují svařování v přípravku č. 1 a č. 2. Cyklus 2 pak navíc zahrnuje čištění svařovacího hořáku v čistící stanici.

V tabulce jsou naměřeny dva různé časové úseky:

- samotná operace svařování, která začíná vyjetím a končí návratem svařovacího hořáku do výchozí pozice (tzv. home pozice),
- operace svařování včetně posuvů, tj. od vyjetí zásuvky s přípravkem z pozice zakládací (do pozice svařovací) po její návrat s hotovým svařencem.

Tabulka 5.3 Shrnutí časů z technologického postupu

		Poloha - operace	Čas [s] (od vyjetí přípravku z polohy zakládání po jeho návrat)	Čas [s] (od vyjetí svařovací hořáku z výchozí domácí pozice po jeho návrat)
Celkový výrobní cyklus	Cyklus 1	Přípravek č. 1	83	73
		Přípravek č. 2	81	71
		Cyklus 1 celkem	159	-
	Cyklus 2	Přípravek č. 1 (včetně zastavení v čistící stanici)	91	73
		Přípravek č. 2	81	71
		Cyklus 2 celkem	167	-
Celý svařovací cyklus			321	
Průměrný čas na výrobu jednoho dílu			80,3	

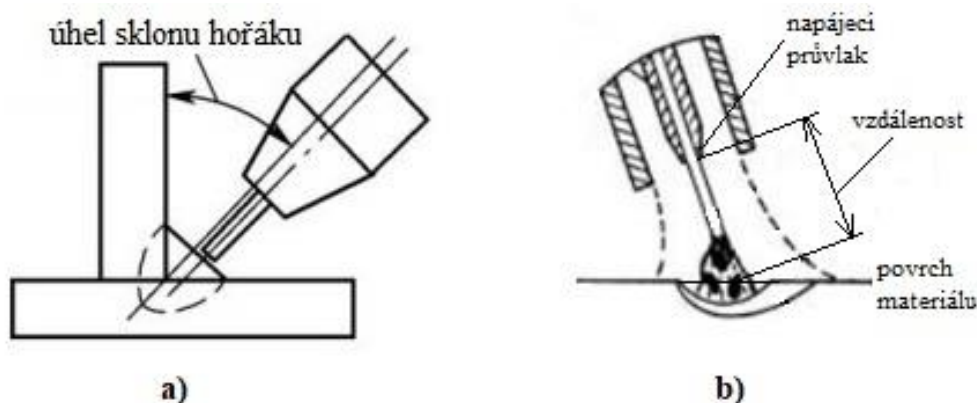
Pozn.:

- celkové časy dílčích cyklů neodpovídají součtu časů pro přípravek č. 1 a č. 2, protože se do něj nezapočítává 5 s, během kterých přežijí zásuvky mezi svařováním

Z naměřených hodnot vyplývá, že průměrný čas na výrobu jednoho dílu v celkovém výrobním cyklu včetně zastávek hořáku v čistící stanici je přibližně 80 s. Čas samotné operace svařování je 71 s, ačkoliv se liší u přípravku č. 1 a č. 2. Svařovací proces v přípravku č. 1 (horní zásuvka) probíhá o 2 s pomaleji.

5.2.1 Nastavení polohy svařovacího hořáku

V návaznosti na výsledky vyhodnocení metalografických vzorků a na podrobnou analýzu svařovacího procesu jako další logický krok následovalo ověření pozice svařovacího hořáku. Pro stanovení pozice svařovacího hořáku bylo zapotřebí změřit úhel sklonu hořáku a vzdálenost výletu drátu, tj. vzdálenost od napájecího průvlastku po povrch svařovaného materiálu (viz Obr. 5.11). Obzvláště důležité bylo naměřit tyto hodnoty v místech, kde byly prováděny metalografické řezy a jejich následné vyhodnocení.



Obr. 5.11 Parametry pozice svařovacího hořáku: a) úhel sklonu hořáku, b) vzdálenost kontaktního průvlastku od povrchu svařovaného materiálu

Hodnoty (viz Tabulka 5.4) byly naměřeny v místech, kde byl svar podroben řezu a následně vyhodnocen. Označení míst zde tedy odpovídá protokolům (viz kapitola 5.1.2). Měření probíhalo na nastehovaném svařenci, kdy se v dané pozici zastavil řídicí program robota a ručně se změřily potřebné hodnoty úhlu sklonu hořáku a vzdálenosti výletu drátu.

Tabulka 5.4 Naměřené hodnoty – pozice svařovacího hořáku

Levá strana	Úhel sklonu hořáku [°]	Vzdálenost výletu drátu [mm]
1-1L/ A	52,8	15,7
1-1L/ B	52,5	15,9
1-1L	62,1	19,4
Pravá strana		
1-1P/ A	47,8	13,4
1-1P/ B	52,2	15,7
1-1P	71,9	12,3

Použitá měřidla:

- digitální posuvné měřítko SOMET: rozsah 0 – 150 mm, citlivost 0,01 mm
- digitální úhloměr IGM Fachmann FDU-001: rozsah $\pm 180^\circ$, citlivost $0,1^\circ$ (viz Obr. 5.12)



Obr. 5.12 Digitální úhломěr

Z naměřených hodnot vyplývá, že pozice svařovacího hořáku se na každé straně svařence mírně liší. Tato skutečnost je dána polohou základny svařovacího robota, který je umístěn ze zadní části na pravé straně od polohovadla. Rameno robota tudíž omezuje svařovací hořák v zachování přesně stejných hodnot úhlu naklopení na obou stranách svařence, které jsou od sebe vzdáleny přes 900 mm (viz rozměr hlavní trubky).

Dle technologického návrhu daného svařovacího procesu by měl být úhel sklonu hořáku ve všech polohách přibližně 45° - 50° . Těchto hodnot téměř na všech místech dosahuje. Výjimkou jsou pozice svařovacího hořáku na místech 1 – 1 L(P).

S úhlem sklonu svařovacího hořáku se mění i délka výletu drátu. Na pravé straně je na dvou místech o několik milimetrů kratší než na straně levé, proto je zde rozdíl i ve svařovacím proudu, rychlosti podávání drátu a napětí.

Aspekty ovlivňující svařitelnost (viz Tabulka 3.1) jsou zpravidla příčinou problémů ve svařovacím procesu. V návaznosti na analýzu a ověření vhodného nastavení daného svařovacího procesu lze říct, že nejvíce nedostatků se objevuje v oblasti technologické a konstrukční svařitelnosti. Aspekty z této tabulky, které lze považovat za problémové jsou:

- parametry svařování (rozdílnost napětí na oblouku, rychlost svařování),
- příprava a čistota svarových ploch (kontrola rozměrů a tvarů),
- přístup ke svaru – dostupnost robota k místům svařování (dosah svařovacího hořáku, poloha hořáku vůči svařenci).

6 Vyhodnocení

Provedená analýza současného stavu výrobního a svařovacího procesu Panhardovy tyče poukázala na řadu důležitých okolností, které do tohoto procesu vstupují a mohou mít souvislost s příčinami problémů hledaných firmou Mubea. Nejprínosnější bylo v tomto ohledu vyhodnocení metalografických vzorků provedené podnikovou laboratoří v závodu Žebrák Mubea, na základě kterých se formoval další postup ověřování nastavení výrobního procesu. Ještě před tím, než bude udělán závěrečný výčet návrhů ke zvýšení produktivity za účelem dosažení požadavků pro díl při dodržení daných norem současně se zachováním/zkrácením času výroby, je třeba shrnout základní poznatky.

Obecný problém, který vyplývá z analýzy celého výrobního procesu, je zřejmý nedostatek zkušeností a postupů k optimalizaci výrobního procesu takového dílu, jako je Panhardova tyč. Nedostatkem zkušeností se myslí dosavadní absence produktu podobných rozměrů ve výrobním procesu zahrnující technologii svařování a nedostatkem postupů zase jasný návod, jak postupovat, pokud je třeba daný problém vyřešit. Oba nedostatky však mohou být způsobeny dalšími okrajovými podmínkami, což z hlediska chodu celé firmy může být i nedostatek odborného personálu, který by takové problémy řešil. Tyto okrajové podmínky byly obzvláště citelné v tomto období (jaro až léto r. 2020), kdy do celosvětového prostoru vstoupila nákaza koronaviru a uvrhla mnoho firem do výjimečného stavu, firmu Mubea nevyjímaje.

Přínosným zdrojem pro nabytí takovýchto zkušeností je teoretická část této diplomové práce, která se v kapitole č. 3 zabývá zajištěním svařovacího procesu z hlediska obecného definování a hledání problému. Zároveň je důkladně popsána svařitelnost a faktory, které ji ovlivňují. Tabulka 3.1 pak popisuje konkrétní aspekty ovlivňující svařitelnost, z nichž bylo několik určeno v rámci daného svařovacího procesu jako možné příčiny vzniku řešených problémů.

Pro splnění cílů této diplomové práce se v následující podkapitole přistupuje k návrhu možných variant. Tyto návrhy jsou řazeny v návaznosti na řešení praktické části práce tak, jak postupně vznikaly.

6.1 Návrhy možných variant

Pro dodržení daných norem současně se zachováním/zkrácením času výroby lze podle provedených analýz a naměřených hodnot navrhnout tyto úpravy:

1) Přidání kontrolní operace před založením polotovarů.

Ačkoliv se polotovary při přejímání rozměrově kontrolují (5 kusů z každé dodávky), bylo by dostatečným řešením navrhnout v rámci prvního bodu pracovního postupu určeného obsluze stroje (viz str. 63) etalon, se kterým by se polotovar porovnal. Nedochovalo by tedy pouze k vizuální kontrole, zda díl souhlasí s číslem zakázky, ale za pomoci jednoduchého etalonu by se mohl tvarový výřez zploštělého konce trubky rychle zkontrolovat na obou stranách. Časový interval pro vyjmutí svařence a založení polotovarů odpovídá času svařování 81 s (viz čas svařování s posuvy v Tabulka 5.3), kdežto čas vyjmutí svařence a založení polotovarů odpovídá přibližně 23 s. Existuje zde tedy ještě rezerva 58 s pro jednoduchou operaci navíc:

- ověření rozměrů tvarového výřezu zploštělého konce hlavní trubky pomocí etalonu

Důvodem pro vytvoření tohoto návrhu je fakt, že každá vzniklá mezera mezi pouzdry a hlavní trubkou po založení a upnutí do přípravku může být důvodem k nedostatečnému provaření svaru do základního materiálu. Taková mezera může vzniknout právě nedokonalým tvarem kruhového výřezu zploštělého konce hlavní trubky.

2) Změna a další ověření vhodného nastavení technologických faktorů.

Změnou svařovacích parametrů (viz Tabulka 4.4) by mělo být možné docílit nejenom lepších výsledků provaření svaru, ale i zkrácení času výroby. Z vyhodnocení metalografických vzorků (viz Tabulka 5.1) je patrné rozdělení míst na problémová a bezproblémová. Řešením pro zvýšení produktivity by tak mohlo být zvýšení rychlosti svařování v bezproblémových místech. Konkrétně by se jednalo o zvýšení rychlosti svařování na straně pravé. Každá další změna by se musela znovu ověřit vyhodnocením metalografických vzorků.

Zavádějící jsou často také poměry parametrů rychlosti svařování a rychlosti posuvu drátu. Až přehledně zpracovaná tabulka s parametry ukazuje nahodilé rozdělení a nastavení těchto svařovacích parametrů, obzvláště nepochopitelná jsou pak odlišná nastavení pro stejná místa svaru v obou přípravcích.

V tomto ohledu bylo velmi přínosným krokem zpracování všech svařovacích parametrů do přehledné tabulky (viz Tabulka 4.4), ze které bylo možné na první pohled vyčíst řadu nesrovnalostí i v následném vizuálním porovnání jednotlivých svarů.

3) Změna a další důkladné ověření polohy svařovacího hořáku.

Naměřené hodnoty pozice svařovacího hořáku (viz Tabulka 5.4) jasně ukazují, že na pravé straně je menší výlet drátu a vyšší hodnoty úhlů sklonu svařovací hubice. To odpovídá vyhodnocením metalografických vzorků, kde je strana levá problémová a strana pravá je v pořádku. Větší vzdálenost výletu drátu (vzdálenost napájecího průvzlaku od povrchu svařovaného materiálu) totiž může zapříčinit značné úbytky svařovacího proudu a tím dosáhnout horších hodnot průvarů svaru do základního materiálu. Na dvou nejkritičtějších místech svaru byly naměřeny nejvyšší hodnoty výletu drátu. Proto by bylo vhodné v těchto místech přiblížit hubici k základnímu materiálu.

Dalším faktorem je úhel sklonu hořáku, který definuje místo, kam míří svařovací drát. Obecně se doporučuje, aby mířil do místa, kde je více materiálu. Přibližně se uvádí směřování 0,5 až 1 mm do místa s předpokladem většího odvodu tepla. Jedná se tedy o směřování do pásnice (koutový svar se skládá ze stojiny a pásnice).

Ze závěru tohoto bodu vyplývají následná doporučení:

- změnit vzdálenost výletu drátu na levé straně na nižší hodnoty, tj. přiblížit svařovací hořák k povrchu základního materiálu
- v kritických místech nasměřovat drát o 0,5 až 1 mm více do pásnice, tj. do základního materiálu s větším odvodem tepla (hlavně u pozice 1 – 1 L(P)/B), což lze provést zvýšením úhlu sklonu svařovacího hořáku

4) Systematické zaměření se na opakovatelnost výroby svařovacího procesu.

Z důvodu jasných odlišností nejen v operacích na levé a pravé straně, ale i v přípravku č. 1 a č. 2. by bylo vhodné vytvořit důkladnou analýzu a ověřit, zda a proč to tomu tak je. Svařovací proces v přípravku č. 1 nabývá jiných hodnot svařovacích parametrů než v přípravku č. 2. To vysvětluje o 2 s rozdílné časy operace svařování. Zvýšení produktivity je možné zvýšením rychlosti svařování v místech, které vyhovují kvalitě svaru a jsou např. z hlediska tvaru spoje vyhovující. Doporučením se jeví snížení a omezení vzniku vad v místech vyhodnocených analýzou jako rizikovými.

7 Závěr

Cílem diplomové práce bylo navrhnout možné varianty zvýšení produktivity svařovacího procesu za účelem dosažení požadavků pro díl při dodržení daných norem současně se zachováním/zkrácením času výroby dílu Panhardova tyč.

V teoretické části práce byl popsán základní princip technologie svařování se zaměřením na obloukové svařování v ochranné atmosféře aktivního plynu MAG. Dále bylo vypracováno rozsáhlé téma s názvem zajištění svařovacího procesu, které obsahuje základní informace z oblasti svařitelnosti. Podrobně byly popsány faktory ovlivňující kvalitu svaru a okrajové podmínky vstupující do procesu svařování. Částečně byly zmíněny i způsoby zajištění kvality procesu svařování a řízení kvality v průběhu výroby.

Cíl práce byl naplněn prostřednictvím praktické části, která postupně představovala krok za krokem celý svařovací proces včetně jeho zařazení do kontextu s firmou Mubea. Na základě sestavené analýzy současného stavu výrobního procesu Panhardovy tyče a analýzy svařovacího procesu byl podán požadavek o vytvoření metalografických vzorků včetně jejich vyhodnocení dle daných norem. Rozbor výsledků z metalografických vzorků napomohl k vytipování potencionálních kritických míst na svařenci, na jejichž základě byl stanoven postup pro ověření vhodného nastavení daného svařovacího procesu. Ten se skládal ze sestavení přesného technologického postupu, včetně naměření všech výrobních časů, a ověření pozice svařovacího hořáku naměřením hodnot úhlu sklonu svařovacího hořáku vůči svařenci a vzdálenosti výletu drátu. Z celkového vyhodnocení se došlo k následujícím závěrům:

Vhodná doporučení jsou:

- 1) Přidání kontrolní operace před založením polotovarů.
- 2) Změna a další ověření vhodného nastavení technologických faktorů.
- 3) Změna a další důkladné ověření polohy svařovacího hořáku.
- 4) Systematické zaměření se na opakovatelnost výroby svařovacího procesu.

Vybraná doporučení spolu úzce souvisí, z čehož vyplývá, že nejvhodnějším řešením je postupná aplikace všech těchto návrhů. Vytyčené cíle diplomové práce byly splněny.

Citovaná literatura

- [1] NĚMEC, Milan, Jan SUCHÁNEK a Jan ŠANOVEC. *Základy strojírenské technologie I*. 3. vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2016. ISBN 978-80-01-06056-8.
- [2] KOVANDA, Karel. *Úvod do svařování* [online]. ČVUT v Praze, Ústav strojírenské technologie [cit. 2020-02-20]. Dostupné z: <http://utopm.fsid.cvut.cz/podklady/MT2/2018%20-%20svarovani.pdf>.
- [3] *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: ZEROSS, 2001. Svařování. ISBN 80-85771-81-0.
- [4] PHILLIPS, David H. *Welding engineering: an introduction*. Chichester, West Sussex, UK: John Wiley & Sons, 2016. ISBN 9781118766446.
- [5] KOLAŘÍK, Ladislav. *Současný vývoj v oblasti svařování*. MM průmyslové spektrum: technický měsíčník [online]. Praha: Vogel Publishing, 1997, **2018**(1), s. 56. [cit. 2020-01-24]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/soucasny-vyvoj-v-oblasti-svarovani.html>.
- [6] KLETEČKA, Jaroslav a Petr FOŘT. *Technické kreslení*. Brno: CP Books, 2005. ISBN 80-251-0498-2..
- [7] AYRTON, Hertha. *Electric Arc* (CLASSIC REPRINT). S.I: FORGOTTEN BOOKS, 2015. ISBN 978-1330187593.
- [8] KOLAŘÍK, Ladislav. *Elektrický oblouk* [online]. ČVUT v Praze, Ústav strojírenské technologie [cit. 2020-02-20]. Dostupné z: <http://u12133.fsid.cvut.cz/assets/subject/files/111/3-MMA-tsv-2016.pdf>.

- [9] KOLAŘÍK, Ladislav. *Zdroje pro svařování* [online]. ČVUT v Praze, Ústav strojírenské technologie [cit. 2020-02-20]. Dostupné z: <http://u12133.fsid.cvut.cz/assets/subject/files/111/9-zdroje-2016.pdf>.
- [10] *Co je svařování MIG/MAG?* [online]. Praha: FRONIUS ČESKÁ REPUBLIKA, c2020 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/cs-cz/czech-republic/perfect-welding/svet-svarovani/svaovn-migmag>.
- [11] *Obloukové svařování v ochranné atmosféře plynů* [online]. Kosmonosy: Schinkmann, c2020 [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: <https://www.schinkmann.cz/obloukove-svarovani-v-ochranne-atmosfere-plynu>.
- [12] *CLOSS: MIG/MAG Svařování kovů v ochranném plynu* [online]. Praha: CLOSS PRAHA, spol., c2020 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://www.cloos.de/de-cz/procesy/mig-mag-svarovani-kovu-v-ochrannem-plynu/>.
- [13] *IWELD 6503S: Synergický svařovací invertor IGBT pro svařování MIG/MAG, TIG a MMA*. Home - welco.cz [online]. 2019 [cit. 2020-07-06]. Dostupné z: https://www.welco.cz/file/download?id=1818&route_url_id=357.
- [14] MESSLER, Robert W. *A practical guide to welding solutions: overcoming technical and material-specific issues*. Weinheim: Wiley-VCH, 2019. ISBN 978-3-527-34543-4.
- [15] KOUKAL, Jaroslav. *Svařování ocelových konstrukcí*. Ostrava: Česká asociace ocelových konstrukcí, 2010. ISBN 978-80-904535-4-8.
- [16] KOLAŘÍK, Ladislav. *Svařitelnost konstrukčních ocelových materiálů* [online]. ČVUT v Praze, Ústav strojírenské technologie [cit. 2020-02-20]. Dostupné z: <http://u12133.fsid.cvut.cz/assets/subject/files/130/02-uvod-do-svaritelnosti.pdf>.
- [17] *Přehled způsobů svařování, svařitelnost*. Svařování svářečské práce Plzeň výroba svařovaných konstrukcí [online]. 4.3.2016 [cit. 2020-03-23]. Dostupné z: <http://svarox.cz/prehled-zpusobu-svarovani-a-zakladni-deleni-metod-dle-en-iso-4063/>.

- [18] MUSIL, Miloslav a Jaromír MORAVEC. *Výroba a aplikované inženýrství ve svařování: výukové materiály pro kurzy Mezinárodní svářečský inženýr IWE, Mezinárodní svářečský technolog IWT*. Česká Třebová: DOM-ZO 13, 2017. ISBN 978-80-906720-0-0.
- [19] *Univerzální robotizované svařovací pracoviště - Robotizovaná pracoviště - TRIOM s.r.o.* [online]. Frenštát pod Radhoštěm: TRIOM, spol., c2020 [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: http://triom.cz/robotizovana-pracoviste/5__univerzalni-robotizovane-svarovaci-praco.
- [20] *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. 2., upr. vyd.* Ostrava: ZEROSS, 2001. ISBN 80-85771-85-3.
- [21] *Effects of shielding gas composition. Journal of materials processing technology* [online]. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, c2017, 1.2.2017 [cit. 2020-06-21]. ISSN 0924-0136. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013617>.
- [22] *Effect of shielding gas. Journal of materials processing technology* [online]. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, c2017, 4.7.2018 [cit. 2020-06-21]. ISSN 0924-0136. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924013618302930>.
- [23] *WeldCube Premium* [online]. Praha: FRONIUS ČESKÁ REPUBLIKA, c2020 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/cs-cz/czech-republic/perfect-welding/vyrobky/digit%C3%A1ln%C3%AD-produkty/digit%C3%A1ln%C3%AD-produkty/weldcube/weldcube-premium>.
- [24] MOTLOCH, Jan. *Inteligentní svařovací systém MIG/MAG*. MM Průmyslové spektrum [online]. Praha: MM publishing, 2013, 1.10.2013, 2013(10), 52 [cit. 2020-06-22]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/inteligentni-svarovaci-system-mig-mag>.
- [25] *WIRESense: DRÁTOVÁ ELEKTRODA JAKO SENZOR* [online]. Praha: FRONIUS ČESKÁ REPUBLIKA, c2020 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/cs-cz/czech-republic/perfect-welding/vyrobky/digit%C3%A1ln%C3%AD-produkty/digit%C3%A1ln%C3%AD-produkty/weldcube/weldcube-premium>.

z: <https://www.fronius.com/cs-cz/czech-republic/perfect-welding/informacni-centrum/tisk/wiresense-technology>.

[26] *Používání WPS, WPQR při svařování i BPS, BPAR při pájení v praxi*. Konstrukce [online]. Ostrava: KONSTRUKCE Media, 10.12.2016, 2016 [cit. 2020-06-23]. ISSN 1803-8433. Dostupné z: <http://old.konstrukce.cz/clanek/pouzivani-wps-wpqr-pri-svarovani-i-mps-bpar>.

[27] *Hodnocení kvality svarového spoje* [online]. In: . Praha: Ústav strojírenské technologie, Fakulta strojní, ČVUT [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: <http://u12133.fs.cvut.cz/assets/subject/files/104/def-kontrol>.

[28] *Panhardská tyč* [online]. [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: <https://www.autolexicon.net/cs/articles/panhardska-tyc/>.

[29] *CLOOS: Svařovací robot* [online]. [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: <https://www.cloos.de/de-cz/products/qirox/welding-robots/>.

[30] *WELD G3SI1* [online]. [cit. 2020-07-18]. Dostupné z: <https://www.esab.co.uk/cz/cz/products/filler-metals/mig-mag-wires-gmaw/mild-steel-wires/weld-g3si1.cfm>.

Seznam obrázků, tabulek a příloh

Seznam obrázků

Obr. 2.1 a) Schéma V svaru (1-svařovaný materiál, 2-hranice závaru, 3-kořen svaru, 4-svarové plochy), b) Svar a tepelně ovlivněná oblast [1].....	12
Obr. 2.2 Druhy svarů [2].....	12
Obr. 2.3 Způsob označování svarů [2].....	13
Obr. 2.4 Základní značky svarů [6]	13
Obr. 2.5 Části elektrického oblouku [3]	15
Obr. 2.6 Síly působící na kapku tavící se elektrody při různých proudových hustotách [3]	18
Obr. 2.7 Základní schéma svařování metodou MIG/MAG [3].....	21
Obr. 2.8 Svařování procesem Narrow Gap Weld od firmy CLOOS	24
Obr. 2.9 Graf pracovního svařovacího cyklu – závislost proudu I na čase t [13]	26
Obr. 3.1 Dva příklady výborně zvládnutého svařování metodou WIG: a) ocelové součásti, b) hliníkové slitiny rámu jízdního kola. Dva příklady špatného svařování: c) oprava ocelové součásti automobilu, b) špatně zvládnutá oprava na lodi z hliníkové slitiny. [14]	27
Obr. 3.2 Schématická ilustrace neoddělitelného vztahu mezi konstrukční, technologickou a materiálovou stránkou mající vliv na svařitelnost [14].....	29
Obr. 3.3 Polohy svařování dle ČSN EN ISO 6947 [3]	33
Obr. 3.4 Univerzální robotizované svařovací pracoviště [19].....	34
Obr. 3.5 Závislost rychlosti podávání drátu na svařovacím proudu pro různé průměry drátu [4].....	37
Obr. 3.6 Plán sekvence svařování pro omezení deformace [18]	40
Obr. 3.7 WireSense (Fronius ČR) – drátová elektroda jako senzor [25].....	41
Obr. 3.8 Průběh kvalifikace postupu svařování [18]	42
Obr. 4.1 Pohled z výkresu svařence – označení svarů.....	44
Obr. 4.2 First – to – market inovace firmy Mubea	45
Obr. 4.3 Výrobní závod Žebrák MUBEA.....	46
Obr. 4.4 Stálí zákazníci firmy MUBEA	46
Obr. 4.5 Produkty oddělení systémových komponentů MUBEA	47
Obr. 4.6 Ukázka svařovacího zařízení od firmy Cloos.....	47

Obr. 4.7 Schematické vyobrazení umístění Panhardovy tyče [28].....	48
Obr. 4.8 Panhardova tyč jako součást podvozku terénního automobilu [28].....	48
Obr. 4.9 Chemické složení oceli E355	49
Obr. 4.10 Pohled z výkresu polotovaru - hlavní trubka.....	50
Obr. 4.11 Detail z výkresu polotovaru - zploštělý konec trubky	50
Obr. 4.12 Řez z výkresu polotovaru - pouzdro.....	51
Obr. 4.13 Pohled z výkresu svařence - poloha hlavní trubky a pouzder	51
Obr. 4.14 Svařovací robot QRC – 350 [29].....	52
Obr. 4.15 Svařovací zdroj GLC 403 Quinto [29]	53
Obr. 4.16 Polohovadlo	55
Obr. 4.17 Polohovadlo - pohledy.....	55
Obr. 4.18 Polohovadlo – řez, detaily	55
Obr. 4.19 Svařovací přípravek.....	56
Obr. 4.20 Upínání polotovarů – a) levá strana, b) pravá strana.....	56
Obr. 4.21 Svařovací drát G3Si1 [30].....	57
Obr. 4.22 Rozdělení svařovacích parametrů po obvodu trubky – přípravek č. 1, levá strana	58
Obr. 4.23 Po svaření díl odložit na odkládací držáky.....	63
Obr. 5.1 Zjednodušená definice geometrie koutového svaru	65
Obr. 5.2 Koutový svar.....	65
Obr. 5.3 Odchytky od stanovených rozměrů a dodatky k DIN EN ISO 5817 (stupeň kvality C)	66
Obr. 5.4 Koutový svar na šikmém spoji	66
Obr. 5.5 Označení místa řezu na levé straně svařence.....	67
Obr. 5.6 Označení místa řezu na pravé straně svařence	67
Obr. 5.7 Vyhodnocení řezu 1 – 1 L/B a 1 – 1 P/B (porovnání levé a pravé strany svařence)	68
Obr. 5.8 Vyhodnocení řezu 2 – 1 L/B a 2 – 1 P/B (porovnání levé a pravé strany svařence)	68
Obr. 5.9 Vyhodnocení řezu 1 – 1L a 1 – 1P (porovnání levé a pravé strany svařence) .	69
Obr. 5.10 Vyhodnocení řezu 2 – 1L a 2 – 1P (porovnání levé a pravé strany svařence)	69
Obr. 5.11 Parametry pozice svařovacího hořáku: a) úhel sklonu hořáku, b) vzdálenost kontaktního průvzlaku od povrchu svařovaného materiálu.....	73
Obr. 5.12 Digitální úhloměř.....	74

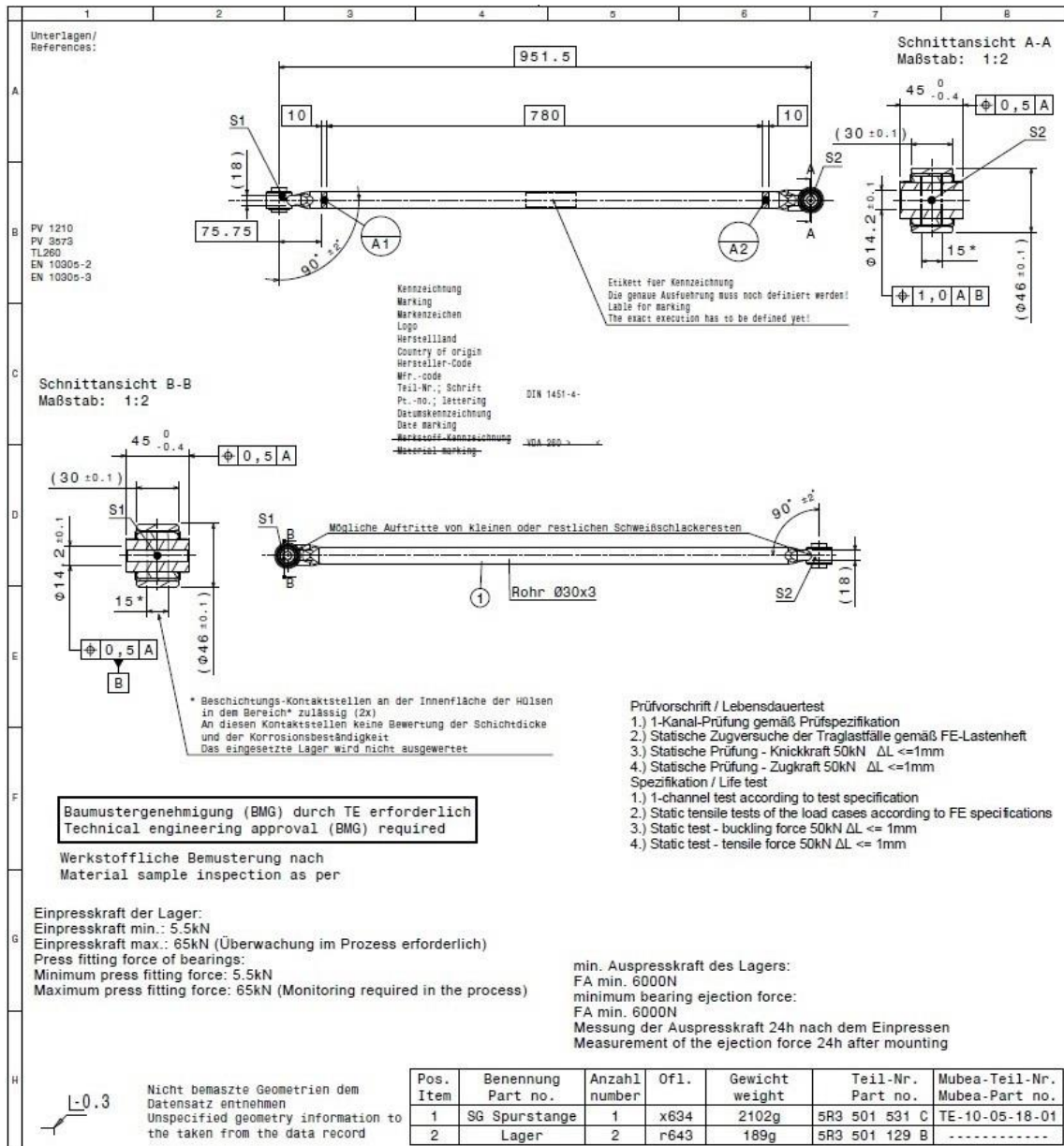
Seznam tabulek

Tabulka 2.1 Výhody a nevýhody svařování metodou MAG [10], [11].....	22
Tabulka 3.1 Aspekty ovlivňující svařitelnost [15].....	32
Tabulka 4.1 Technické údaje robota [29]	53
Tabulka 4.2 Technické údaje svařovacího zdroje [29]	54
Tabulka 4.3 Polohovadlo – seznam položek	54
Tabulka 4.4 Svařovací parametry	58
Tabulka 4.5 Technologický postup operace svařování.....	59
Tabulka 5.1 Výsledky zkoušek ze čtyř různých svařenců	70
Tabulka 5.2 Technologický postup.....	71
Tabulka 5.3 Shrnutí časů z technologického postupu.....	72
Tabulka 5.4 Naměřené hodnoty – pozice svařovacího hořáku.....	73

Seznam příloh

Příloha č. 1 Panhardova tyč – výkres sestavy	86
Příloha č. 2 Výkres svařence	87
Příloha č. 3 Výkres hlavní trubky se zploštělými konci.....	88
Příloha č. 4 Výkres polotovaru - pouzdro	89
Příloha č. 5 Výkres polotovaru - trubka	90
Příloha č. 6 Výkresová dokumentace svařovacího systému QIROX (foceno)	91

Příloha č. 1 Panhardova tyč – výkres sestavy

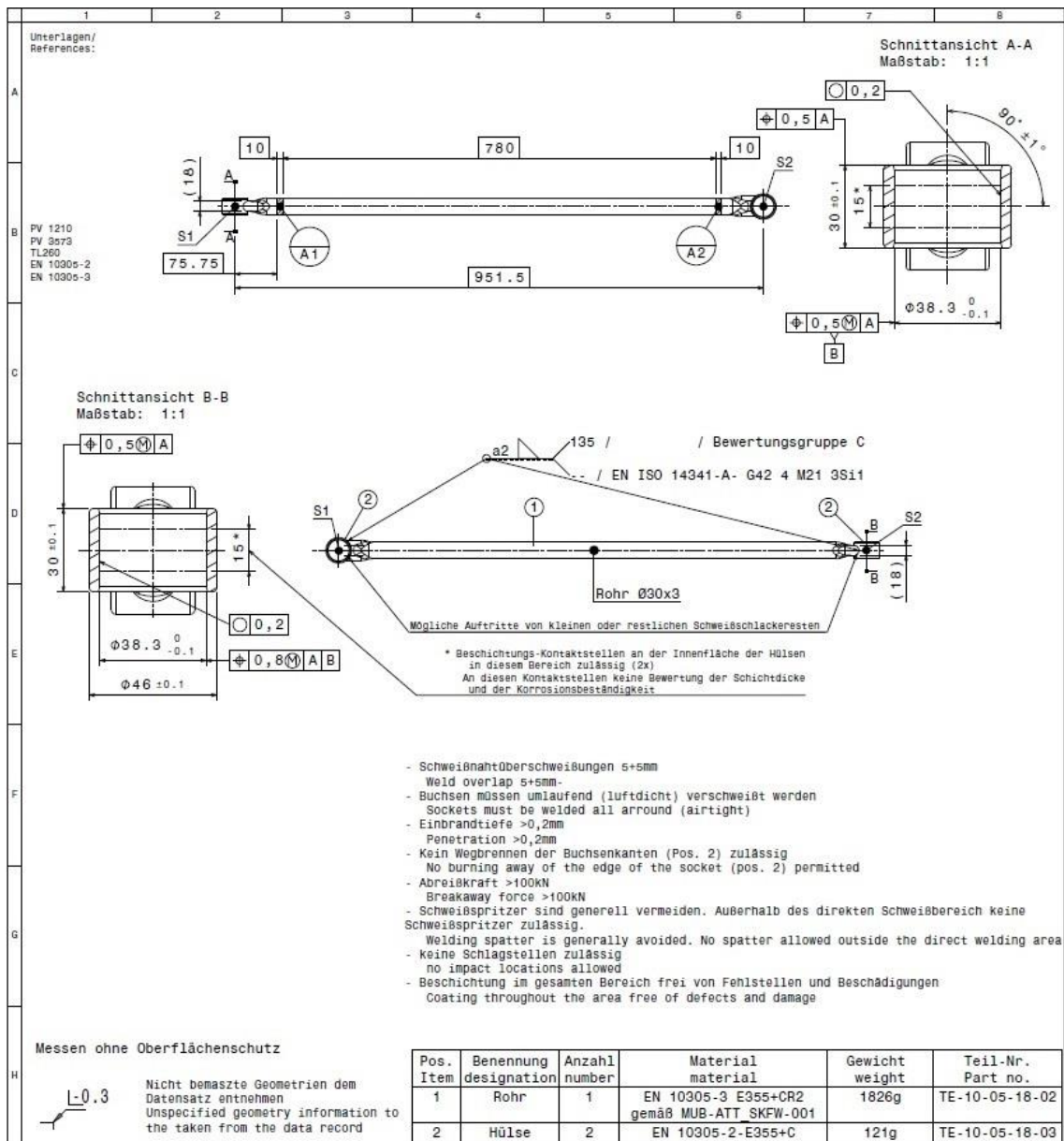


Pozn.:

Výkres sestavy hotového výrobku skládajícího se ze dvou komponentů:

- Pos. 1) SG Spurstange – svařenec hlavní trubky a pouzder (viz výkres - Příloha č. 2)
- Pos. 2) Lager – pryžové ložisko

Příloha č. 2 Výkres svařence

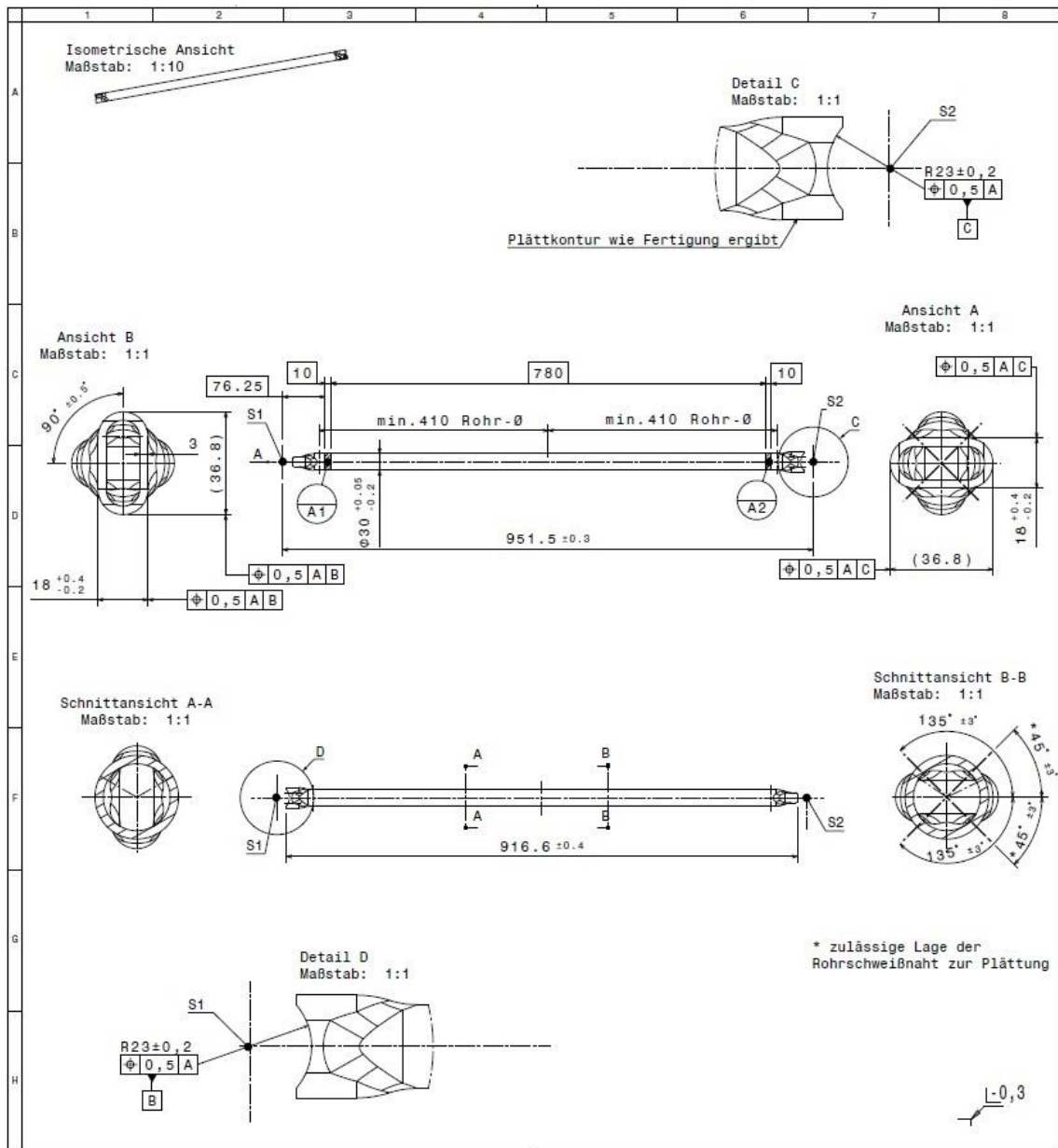


Pozn.:

Výkres svařence, který se skládá z:

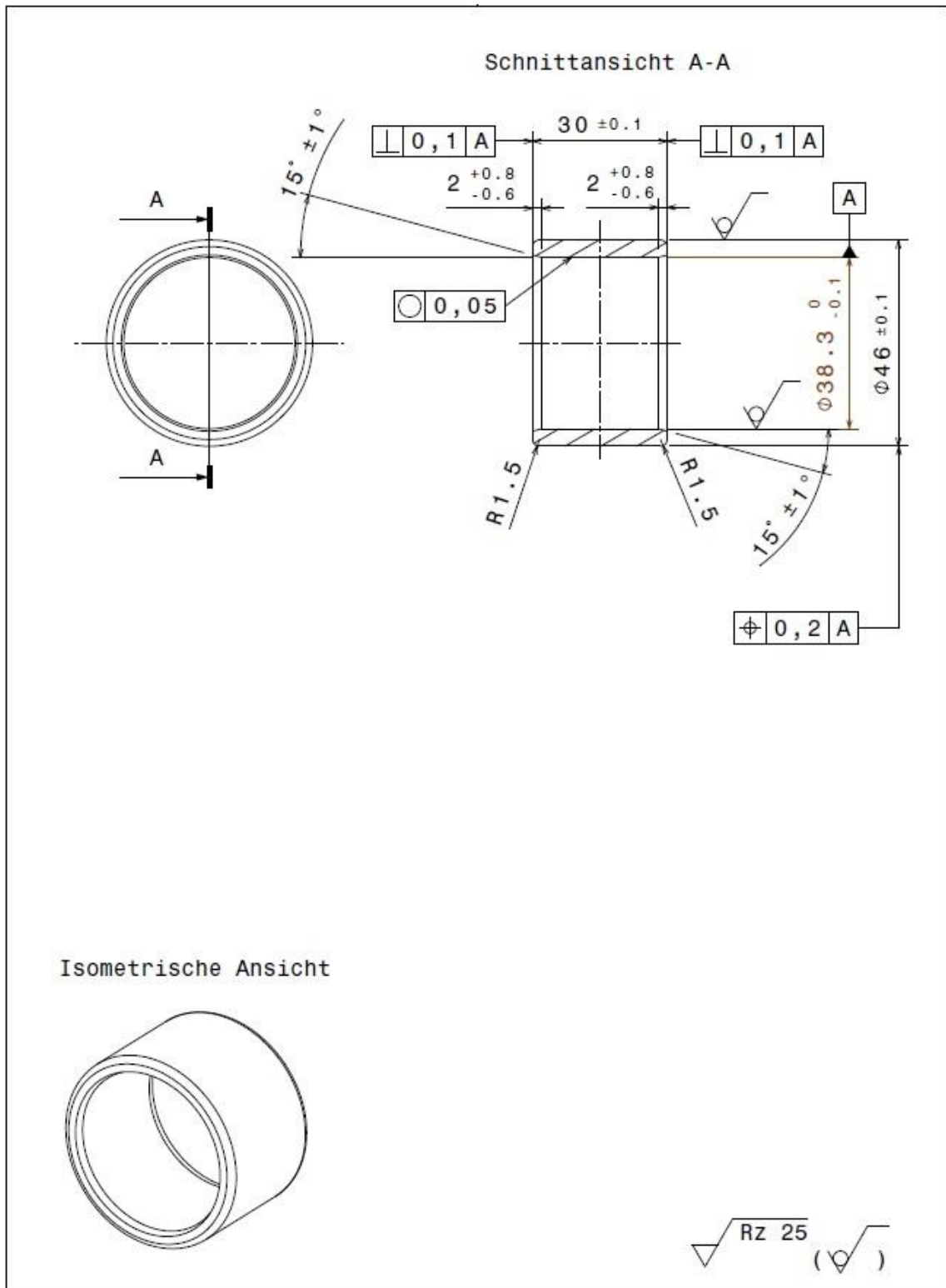
- Pos. 1) Rohr – hlavní trubka se zploštělými konci (viz výkres - Příloha č. 3)
- Pos. 2) Hülse – pouzdro (viz výkres - Příloha č. 4)

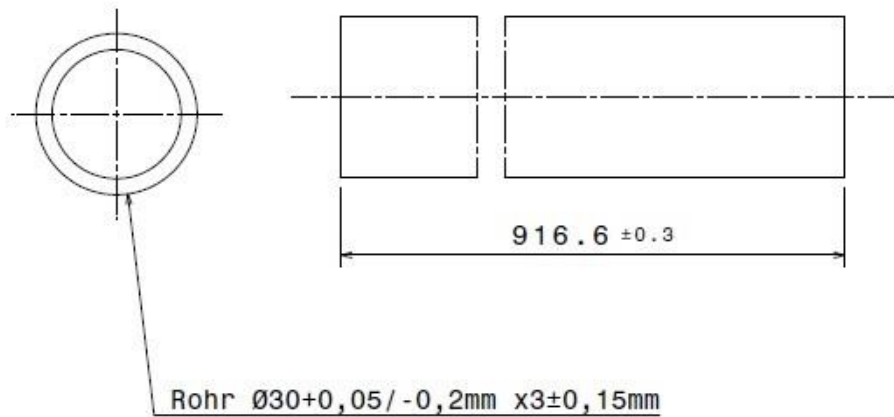
Příloha č. 3 Výkres hlavní trubky se zploštěnými konci



Pozn.:

Polotovarem je trubka viz výkres - Příloha č. 5





Technische Lieferbedingungen siehe: MUB-ATT-SKFW-001
- es gilt die aktuelle Version
Technical delivery conditions see: MUB-ATT-SKFW-001
- the current version applies

Rohre gewaschen & Prüfbescheinigung nach EN 10204 APZ 3.1
Pipes washed & test certificate according to EN 10204 APZ
3.1

Rohrlieferant: Fa. Mesu Sundern Germany
pipe supplier: Fa. Mesu Sundern Germany

$-0,3$

Příloha č. 6 Výkresová dokumentace svařovacího systému QIROX (foceno)

