



Vliv svařovacích parametrů na geometrii svarové lázně a únavovou životnost svarů z jemnozrnné oceli S460MC

Bakalářská práce

Studijní program: B2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301R000 – Strojní inženýrství
Autor práce: **Michal Fanta**
Vedoucí práce: doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.





Zadání bakalářské práce

Vliv svařovacích parametrů na geometrii svarové lázně a únavovou životnost svarů z jemnozrnné oceli S460MC

Jméno a příjmení: **Michal Fanta**
Osobní číslo: S16000049
Studijní program: B2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojní inženýrství
Zadávací katedra: Katedra strojírenské technologie
Akademický rok: **2018/2019**

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se teoreticky se způsobem zpevnění u jemnozrnných ocelí a s podstatou růstu zrna při aplikaci teplotních cyklů.
2. Seznamte se s metodou svařování MAG a s vlivem procesních parametrů na geometrii svarové lázně. Provedte rešerši současného stavu znalostí o způsobech svařování těchto ocelí.
3. Seznamte se s podstatou testů na vysoko a nízko cyklovou únavu.
4. Připravte si testovací vzorky pro svařování koutových svarů z materiálu S460MC.
5. Navrhněte a proveďte experimenty svařování koutových svarů s ohledem na velikost svaru a na hodnotu tepla vneseného na jednotku délky svaru.
6. Vzorky svarů rozřežte a připravte na testy únavy. Provedte testy únavové životnosti svarových spojů.
7. Provedte zhodnocení výsledků a diskuzi.

Rozsah grafických prací: tabulky, grafy
Rozsah pracovní zprávy: cca 30 stran
Forma zpracování práce: tištěná/elektronická



Seznam odborné literatury:

- [1] MORAVEC, J. *Vliv procesních parametrů na geometrii svarové lázně při svařování v ochranných atmosférách*. Skripta – 1. vydání. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2011. ISBN 978-80-7372-682-9.
- [2] HRSTKA, D. *Vliv směsi plynu na efektivitu provedení svaru a stabilitu procesu MAG. /Diplomová práce/, Liberec 2007, TU Liberec, FS.*
- [3] DuPONT, J.N., MARDER, A.J. *Thermal Efficiency of Arc Welding Processes*. Welding Journal Dec.1995, 406- 416 s.
- [4] ASW Welding Handbook: *Welding Science and Technology*. 9th Ed., Vol.1, 2001.
- [5] Kolektiv autorů: *Technologie svařování a zařízení*. ISBN 80-85771-81-0. ZEROSS.
- [6] ČSN EN 3987 – Letectví a kosmonautika – *Zkušební metody pro kovové materiály – Zkoušení vysokocyklové únavy, řízené silou při stálém rozkmitu*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.

Vedoucí práce: doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
Katedra strojírenské technologie

Konzultant práce: Ing. Iva Nováková, Ph.D.
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání práce: 31. října 2018

Předpokládaný termín odevzdání: 30. dubna 2020

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan

V Liberci 1. listopadu 2018



doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že texty tištěné verze práce a elektronické verze práce vložené do IS STAG se shodují.

20. 6. 2019

Michal Fanta

Anotace

Bakalářská práce se zabývá zkoumáním svarových spojů z jemnozrnné oceli S460MC při svařování metodou MAG a následném cyklickém zatěžování. Teoretická část shrnuje základy z oblasti jemnozrnných ocelí, obloukového svařování a cyklického namáhání. Experimentální část je založena na pozorování účinků svařovacích parametrů (např. svařovacího proudu, napětí či rychlosti svařování) na tvar geometrie svarové lázně. Dále je v experimentu zkoumán vliv velikosti vneseného tepla, resp. velikosti tepelně ovlivněné oblasti a změn, k nimž v ní dochází, na únavovou životnost spoje.

Klíčová slova: jemnozrnná ocel S460MC, metoda MAG, svarová lázeň, cyklické namáhání, únavová životnost, Wöhlerova křivka

Annotation

This bachelor thesis is aimed at research of welding joints of fine grain steel S460MC using the MAG method and its cyclic loading. The teoretic part summarises the basics of fine grain steels, arc welding and cyclic loading. The experimental part is based on observing the impacts of welding parameters (e.g. welding current, voltage or speed) on the geometric parameters of the weld pool. The next part of the experiment analyses impacts of supplied heat energy and the size of heat-affected zone (more precisely changes in it) on the fatigue life of joints.

Key words: fine grain steel S460MC, MAG method, weld pool, cyclic loading, fatigue life, Wöhler curve

Poděkování

V první řadě bych tímto velmi rád poděkoval panu doc. Ing. Jaromíru Moravcovi, Ph.D. za jeho cenné rady a nápomocný a trpělivý přístup při vedení mé bakalářské práce. Dále děkuji paní Ing. Ivě Novákové, Ph.D. za pomoc při vypracování praktické části. Na závěr moc děkuji mé skvělé rodině, přítelkyni a přátelům za veškerou podporu, a to nejen při mém studiu.

Obsah

Seznam použitých zkratek a symbolů.....	9
1 Úvod	11
2 Teoretická část.....	12
2.1 Vysokopevné (HSLA) oceli.....	12
2.1.1 Termomechanické zpracování	13
2.1.1.1 Řízené válcování	14
2.1.2 Svařování jemnozrnných ocelí	14
2.2 Svařování elektrickým obloukem.....	16
2.2.1 Elektrický oblouk	16
2.2.1.1 Ionizace prostředí	16
2.2.1.2 Popis elektrického oblouku.....	17
2.2.1.3 Teplo v elektrickém oblouku a jeho účinky	18
2.2.2 Ochranné atmosféry.....	19
2.2.3 Metoda MAG	20
2.2.4 Přenos kovu elektrickým obloukem	23
2.2.5 Svařovací parametry a jejich vliv na geometrii svaru	24
2.2.5.1 Svařovací proud.....	24
2.2.5.2 Svařovací napětí	25
2.2.5.3 Rychlost svařování.....	26
2.2.5.4 Volná délka drátu	27
2.3 Cyklické namáhání.....	28
2.3.1 Definice cyklického zatížení	28
2.3.2 Únavový lom	30
2.3.3 Wöhlerova křivka životnosti.....	31
2.3.4 Skutečná součást a mez únavy.....	32
2.3.5 Zkoušení únavy materiálu	34
3 Experimentální část.....	35
3.1 Příprava vzorků.....	35

3.1.1	Jemnozrnná ocel S460MC	35
3.1.2	Polotovary pro svařování.....	36
3.2	Svařování.....	36
3.2.1	Svařovací parametry	38
3.2.2	Deformace svařenců.....	41
3.3	Metalografické vyhodnocení svarů	44
3.3.1	Geometrie svarové lázně	44
3.3.2	Zpracované metalografické výbrusy	45
3.4	Měření Wöhlerových křivek svarových spojů.....	48
3.4.1	Příprava vzorků pro cyklické namáhání.....	48
3.4.2	Testování	49
4	Vyhodnocení a diskuse výsledků.....	55
4.1	Vyhodnocení svarů a jejich deformací.....	55
4.2	Vyhodnocení únavové životnosti	56
5	Závěr.....	58
	Citovaná literatura	59

Seznam použitých zkratek a symbolů

HSLA	high-strength low-alloy	
R_e	mez kluzu	[MPa]
$D_{\text{střední}}$	průměrná velikost zrna	[mm]
σ_o	napětí, při kterém v materiálu dochází k pohybu dislokací	[MPa]
k	koeficient zpevnění materiálu	[MPa.m ^{1/2}]
A	normalizačně žíhané jemnozrnné oceli	
Q	zušlechtěné jemnozrnné oceli	
M	termomechanicky zpracované jemnozrnné oceli	
TMZ	termomechanické zpracování	
A_{r_3}	teplota počátku transformace austenitu na ferit	[°C]
TOO	tepelně ovlivněná oblast	
C_{ekv}	uhlíkový ekvivalent	[-]
CE	uhlíkový ekvivalent pro běžné konstrukční oceli	[-]
CET	uhlíkový ekvivalent pro jemnozrnné oceli	[-]
T_p	teplota přehřevu	[°C]
UV	ultrafialové	
P_o	celkový výkon oblouku	[W]
k_l	součinitel průběhu napětí a proudu	[-]
U	elektrické napětí	[V]
I	elektrický proud	[A]
Q_m	energie kapek roztaveného kovu elektrody v elektrickém oblouku	[J]
Q_v	měrné vnesené teplo	[J.m ⁻¹ , [kJ.cm ⁻¹]
V_s	rychlost svařování	[m.s ⁻¹]
η_o	účinnost přenosu tepla elektrického oblouku	[-],[%]
Q_{sv}	vnesené teplo do svaru	[J]
MIG	svařování v inertním plynu pomocí tavící se elektrody	
MAG	svařování v aktivním plynu pomocí tavící se elektrody	
WIG, TIG	svařování v inertním plynu pomocí netavící se wolframové elektrody	
F_B	elektromagnetická (Lorentzova) síla	[N]
F_D	tlaková síla proudícího ochranného plynu	[N]
F_G	gravitační (tíhová) síla	[N]
F_S	síla povrchového napětí	[N]
F_D	síla tlaku kovových par	[N]
U_o	napětí naprázdno	[V]
L_d	volná délka drátu	[mm]
L_p	vzdálenost kontaktní špičky od základního materiálu	[mm]
D	průměr drátu elektrody	[mm]
σ_h	horní napětí	[MPa]
σ_d	dolní napětí	[MPa]
σ_a	amplituda napětí	[MPa]
σ_m	střední napětí	[MPa]
R	koeficient asymetrie cyklu	[-]
σ_c	mez únavy	[MPa]
N	počet cyklů do lomu	[-]

c_i	materiálový a zátěžový součinitel	[-]
R_m	mez pevnosti	[MPa]
v	součinitel velikosti	[-]
η	součinitel jakosti povrchu	[-]
ζ	součinitel zpevnění	[-]
β	vrubový součinitel	[-]
A_g	homogenní tažnost	[-],[%]
KV_2	nárazová práce	[J]
a	účinná výška	[mm]
x	maximální hloubka svaru	[mm]
w	šířka svaru	[mm]
z_1, z_2	parametry popisující vychýlení svaru	[mm]
TOOs	šířka TOO na stojně	[mm]
TOOp	šířka TOO na pásnici	[mm]

1 Úvod

V dnešní moderní a inovativní době jsou na průmyslově využívané materiály kladeny stále větší nároky. Od materiálů je často požadováno, aby splňovaly protichůdné vlastnosti, jako je vysoká mez kluzu a mez pevnosti, ale zároveň i dobrá tažnost, tvařitelnost, svařitelnost a v neposlední řadě i obrobitelnost. Vysoká mez kluzu a pevnosti zaručí dostatečnou tuhost konstrukce i při použití menšího množství materiálu, od kterého se odvíjí celková hmotnost i cena. Tyto požadavky vedly k vývoji vysokopevných ocelí, jejichž výjimečných vlastností je docíleno zjemňováním struktury. Z tohoto důvodu jsou někdy označovány pojmem jemnozrnné oceli. Tyto oceli si přes své dobré mechanické vlastnosti zachovávají relativně nízké ceny, jež jsou díky malému množství legur odvozovány od cen uhlíkových ocelí.

Velmi významnou technologii, nejen ve strojírenství, představuje technologie svařování, což je nerozebíratelné spojování dvou či více kovových součástí. Proces spočívá v lokálním natavení materiálu a následné krystalizaci, při které se tvoří nové meziatomární vazby. Především díky své efektivitě a univerzálnosti je v praxi nejvíce používané svařování metodou MAG, při níž je teplo potřebné pro natavení materiálu získáváno z energie elektrického oblouku hořícího mezi základním materiálem a přídavným materiálem, který zároveň představuje tavící se elektrodu. Do oblasti svaru je navíc přiváděn ochranný plyn, jenž izoluje proces od nežádoucích účinků okolní atmosféry. Při dodávání tepla do svaru vzniká kolem spoje tepelně ovlivněná oblast, která má odlišné vlastnosti oproti zbytku součástí.

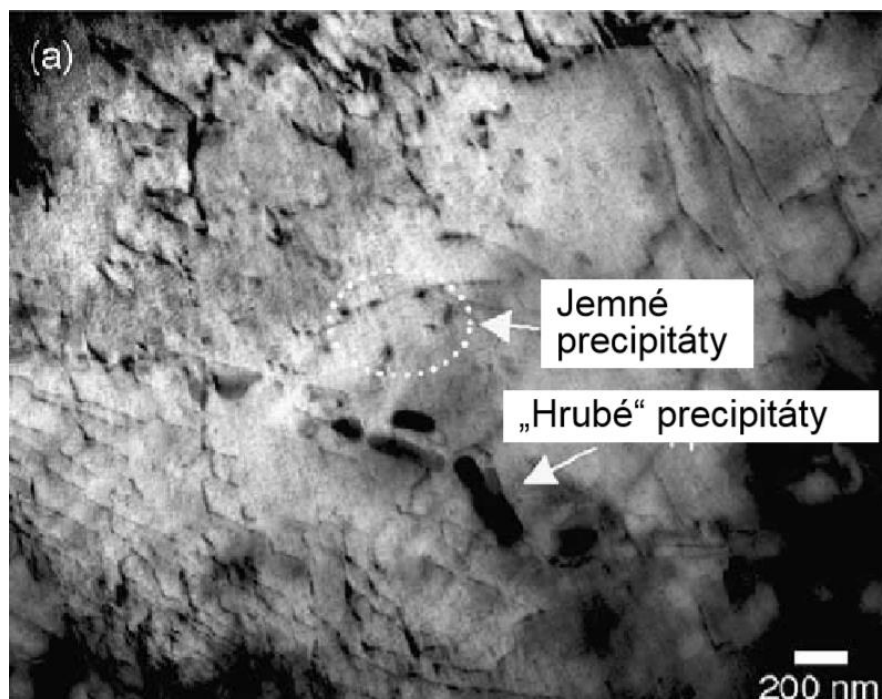
Součásti jsou v reálném provozu velmi často zatěžovány silami, které v čase nejsou konstantní. Tyto síly přitom nemusí být velké – ve většině případů napětí v materiálu nedosahuje ani meze kluzu a jejich statické působení by součást bez známek poškození vydržela – přesto při nich dochází k poruše materiálu. Tato porucha je zapříčiněna opakovaným (cyklickým) působením namáhání, které způsobuje nevratné mikroskopické změny v materiálu. Ty se postupně kumulují, až dochází k tzv. únavovému lomu.

Cílem této práce je vyhodnotit vlivy svařovacích parametrů na tvar průřezu svarové lázně a únavovou životnost svarů z jemnozrnné oceli S460MC s různým měrným vneseným teplem. Za tímto účelem bylo navrženo a zkoumáno celkem pět vzorků, u kterých byla hodnota měrného vneseného tepla ovlivňována nastavením různých kombinací hodnot svařovacího proudu, napětí a rychlosti.

2 Teoretická část

2.1 Vysokopevné (HSLA) oceli

U vysokopevných ocelí, někdy nazývaných jako mikrolegované, jemnozrné či označovaných zkráceně HSLA (což je zkratka anglického názvu high-strength low-alloy), lze celkový obsah uhlíku regulovat za účelem optimálních technologických i materiálových vlastností, a to od 0,05% do 0,25%. [1] Mangan se zde vyskytuje v množství, které závisí na požadované tvařitelnosti a svařitelnosti, maximálně však do 2%. Dalšími legujícími prvky jsou chrom, nikl, molybden, měď, vanad, niob, titan a zirkon v různých kombinacích, v množství od 0,01 do 0,2% každého z nich. [2] Tyto prvky se slučují s uhlíkem a dusíkem a tvoří tak karbidy, nitridy a karbonitridy. Jejich příznivé vlivy se projeví tím, že umožní vznik jemnozrné struktury a formou precipitačního zpevnění (tedy vylučováním krystalických fází z přesyceného tuhého roztoku při ochlazování) zvyšují mechanické vlastnosti ocelí – primárně mez kluzu a mez pevnosti. Dalším účinkem vzniku precipitátů je bránění pohybu hranic zrn, a tím tedy zachování jemné struktury při rekrystalizaci, během níž by jinak zrno výrazně zhrublo. Precipitací se také zmenšuje pravděpodobnost vzniku nitridů železa, které způsobují stárnutí ocelí, a dalším účinkem je snížení množství uhlíku využitelného na fázové přeměny. [1] Obr. 2.1 vyobrazuje jemné a hrubé precipitáty na metalografickém snímku.



Obr. 2.1 - Precipitáty [2]

Výsledná velikost zrna je tedy pro materiálové vlastnosti velmi důležitým parametrem. Mimo pevnostní charakteristiky ovlivňuje také lomové vlastnosti, únavovou odolnost, a dokonce i

elektrické a magnetické vlastnosti. Závislost meze kluzu R_e [MPa] na velikosti zrna je popisována Hall-Petchovou rovnicí (2.1),

$$R_e = \sigma_0 + k \cdot D_{\text{střední}}^{-\frac{1}{2}} \quad (2.1)$$

ve které $D_{\text{střední}}$ [mm] představuje průměrnou velikost zrna, σ_0 [MPa] označuje napětí, při kterém v materiálu začne docházet k pohybu dislokací, tedy čárových poruch krystalických mřížek, a k [MPa.m^{1/2}] je tzv. koeficient zpevnění materiálu. [3] V Tab. 2.1 jsou uvedeny hodnoty σ_0 a k pro vybrané materiály.

Tab. 2.1- Hodnoty σ_0 a k vybraných materiálů [3]

Materiál	Měď	Titan	Uhlíková ocel	Ni ₃ Al
σ_0 [MPa]	25	80	70	300
k [MPa.m ^{1/2}]	0,11	0,40	0,74	1,70

Dle normy ČSN EN 10027-1 jsou na základě způsobu výroby jemnozrnné oceli označovány písmeny A, Q a M. Písmeno A značí oceli, které jsou normalizačně žíhané, písmeno Q oceli zušlechtěné a písmenem M jsou značeny oceli, které jsou termomechanicky zpracované. [4] Pro zpracování této práce byla použita ocel, která byla termomechanicky zpracovávána, proto bude dále popisován pouze tento způsob zpevnění ocelí.

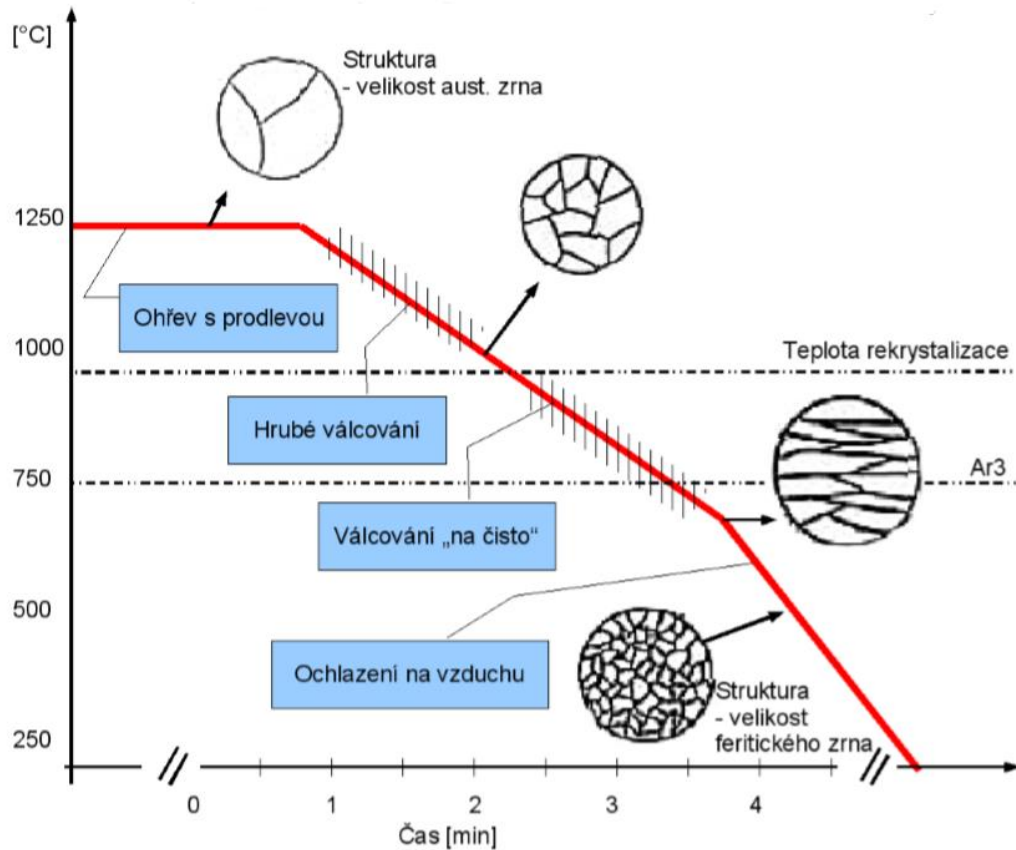
2.1.1 Termomechanické zpracování

Pojem termomechanické zpracování (TMZ) popisuje způsoby výroby ocelových polotovarů, které mají výrazně odlišné vlastnosti a strukturu, než polotovary vyráběné konvenčními způsoby. Při tomto způsobu výroby dochází vlivem kombinace cílené deformace a tepelného zpracování, tedy fázových přeměn, ke zjemňování struktury, což ve výsledku vede ke zvýšení pevnostních charakteristik a zároveň zachování dostatečné plasticity. Postupy TMZ vycházejí z teoretických poznatků zabývajících se dislokacemi, jejichž hustota hraje velmi významnou roli pro zpevnění materiálu. Při tomto druhu zpracování se využívá principu, kdy se při tváření austenitu zjemní jeho zrna a po následujícím rychlém ochlazení a fázové přeměně si tuto jemnou strukturu zachovají i finální produkty transformace (například ferit, perlit, martenzit nebo bainit). Výsledné mechanické vlastnosti jsou nejvíce ovlivněny chemickým složením oceli, teplotou a rychlostí procesů a stupněm deformace. [5]

Jako nejčastější metoda výroby polotovarů se používá tzv. řízené válcování. Kromě něj dále rozlišujeme způsoby termomechanického zpracování, kdy deformace nastává před, během, nebo až po transformaci. [1]

2.1.1.1 Řízené válcování

Při této metodě se dokončovací teplota pohybuje okolo 800 °C, tedy těsně nad teplotou, při které se při ochlazování začnou tvořit první feritická zrna (Ar_3), oproti konvenčnímu válcování, kdy je dokončovací teplota přibližně 1000 °C. Vlivem nižší teploty trvá déle rekystalizace a růst zrna a materiál má po procesu jemnější feritickou strukturu. [2] Celý proces je znázorněn na Obr. 2.2.

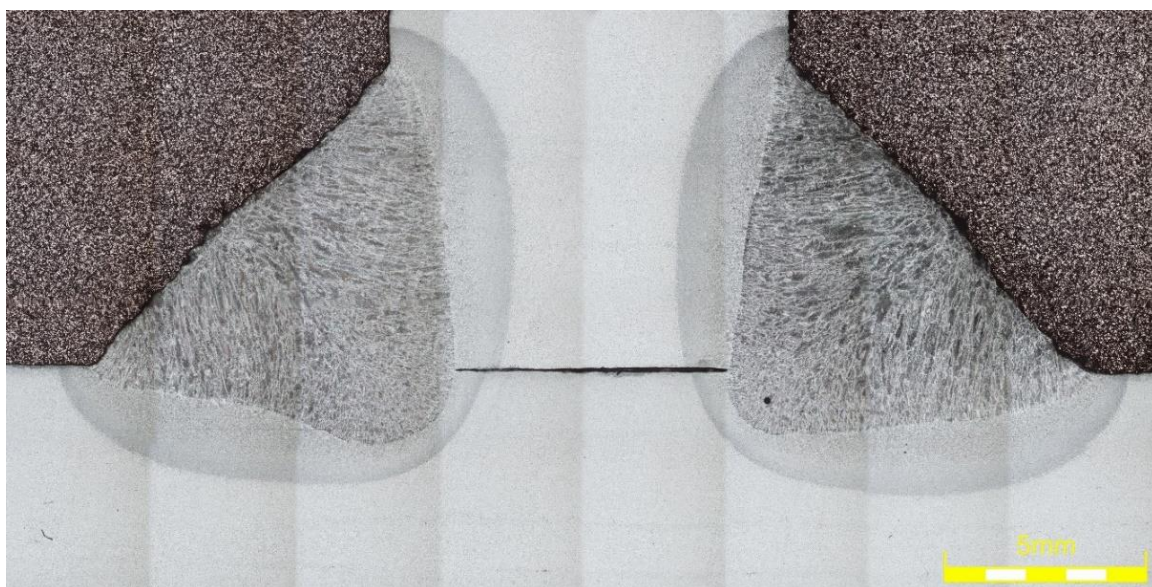


Obr. 2.2 - Řízené válcování [2]

Oceli se při řízeném válcování zvyšuje houževnatost a materiál po procesu dosahuje vysoké meze kluzu. Té je docíleno kombinací zjemnění struktury a precipitačního vytvrzení díky přítomnosti vanadu, niobu, titanu a dalších prvků. [2]

2.1.2 Svařování jemnozrnných ocelí

Pro svařované spoje je typická tepelně ovlivněná oblast (TOO), dobře viditelná na Obr. 2.3, která se pomocí přenosu tepla tvoří v okolí svarové lázně. U ocelí, které dosahují zvláštních mechanických vlastností díky jemné struktuře, je na tuto oblast kladen velký důraz. V TOO totiž vlivem dodávaného tepla probíhá růst zrna a spolu s jeho velikostí se mění i vlastnosti materiálu, které nabyly právě zjemňováním struktury – klesají plastické vlastnosti a také tvrdost. [1]



Obr. 2.3 - Metalografický snímek průřezu swarem, TOO je viditelná jako tmavě šedá oblast kolem svaru

Obecně je při svařování vhodné, v mnoha případech dokonce nutné, znát hodnotu uhlíkového ekvivalentu C_{ekv} , který zohledňuje chemické složení svařovaného materiálu a určuje nutnost použití předehřevu. Teplota předehřevu se na základě normy ČSN EN 1011-2 určuje buď přímo z uhlíkového ekvivalentu, anebo z grafů, které zahrnují vliv uhlíkového ekvivalentu spolu s vlivem difuzního vodíku, tloušťky spoje a tepelného příkonu. Pro běžné konstrukční oceli je nejčastěji využíván výpočet uhlíkového ekvivalentu podle rovnice (2.2), pro jemnozrnné oceli pak podle rovnice (2.3), které se dají využít pro hodnoty CE (resp. CET) mezi 0,3 až 0,7 a pro rozsahy chemického složení v hmotnostních procentech, uvedených v Tab. 2.2. [1]

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad (2.2)$$

$$CET = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40} \quad (2.3)$$

Tab. 2.2 – Hmotnostní procenta legur omezující výpočet uhlíkového ekvivalentu [1]

	C	Si	Mn	Cr	Cu	Ni	Mo	V	Ti	Nb	B
CE	0,05 až 0,25	max. 0,80	max. 1,70	max. 0,90	max. 1,00	max. 2,50	max. 0,75	max. 0,20			
CET	0,05 až 0,25	max. 0,80	0,5 až 1,9	max. 1,50	max. 0,70	max. 2,50	max. 0,75	max. 0,18	max. 0,12	max. 0,06	max. 0,005

Do svaru je snaha dodávat co nejméně měrného tepelného příkonu, aby se minimálně změnila struktura a aby velikost ovlivněné oblasti byla co možná nejmenší. Pokud to okolnosti dovolují, svařuje se bez přehřevu, případně postačí teplota přehřevu T_p v rozmezí 100 – 150 °C. [1]

Dle metody svařování a požadovaných mechanických vlastností svařence se volí přídatný materiál. U svařovaných ocelí, které dosahují meze kluzu vyšší než 380 MPa, se běžně používají přídatné materiály obsahující Cr, Mo a Ni. [1]

2.2 Svařování elektrickým obloukem

Svařování elektrickým obloukem je druh nerozebíratelného spojování součástí, kdy se pro natavení materiálu využívá tepelná energie, která je tvořena přeměnou z energie elektrické. [6; 7] Schéma zařízení pro obloukové svařování je znázorněno na Obr. 2.4.

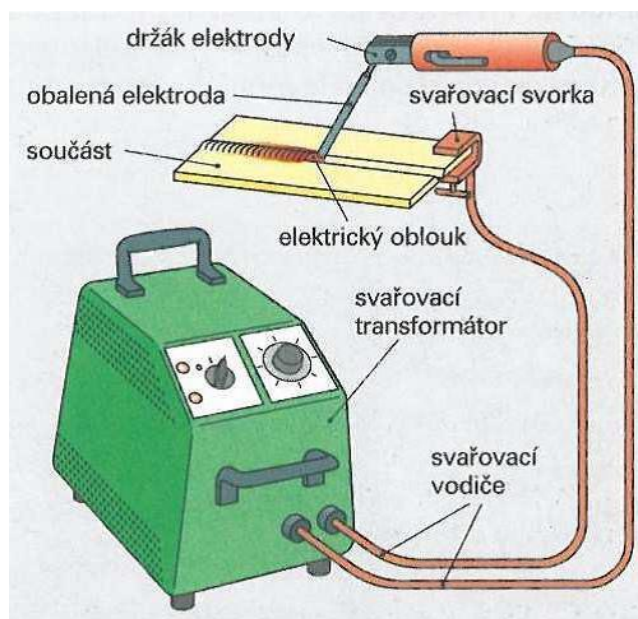
2.2.1 Elektrický oblouk

Přeměna elektrické energie na tepelnou se děje právě v elektrickém oblouku, což je vysokotlaký výboj v ionizovaných plynech, a při svařování vzniká mezi elektrodou a základním materiálem za relativně malého napětí (běžně 10 – 50 V) a velké intenzity proudu (běžně 10 – 2000 A). [6] Proud se při svařování využívá jak střídavý, tak stejnosměrný. U stejnosměrného proudu je z hlediska polarity, tedy připojení kladného a záporného pólu, nutné rozlišovat svařování s [8]:

- přímou polaritou - elektroda představuje záporný pól, základní materiál kladný
- nepřímou polaritou - elektroda představuje kladný pól, základní materiál záporný

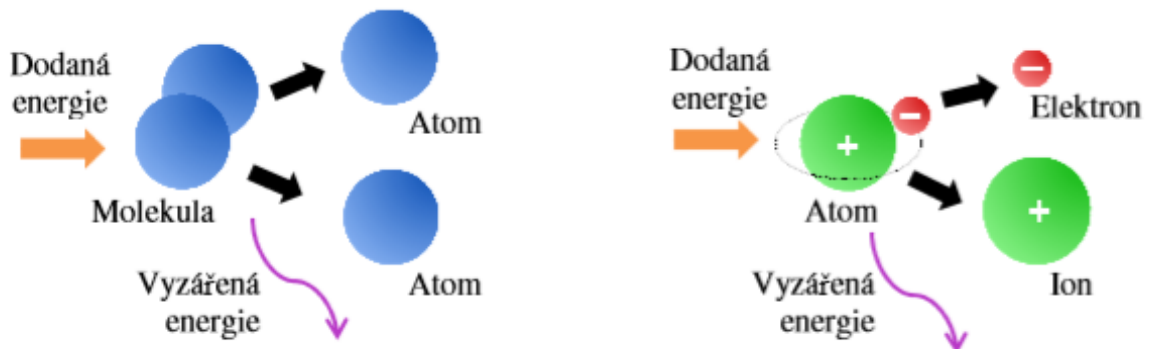
2.2.1.1 Ionizace prostředí

Při normálních podmínkách je plyn mezi elektrodou a základním materiálem nevodivý, protože jsou atomy v rovnováze, a není tedy schopný přenosu nabitých částic. Aby přenos byl umožněn, je nutné plyn ionizovat. To se děje emitováním elektronů z povrchu katody. Elektrony pomocí napěťového spádu mezi elektrodami získávají dostatečně velkou kinetickou (ionizační) energii k tomu, aby z neutrálních atomů při srážce vytvořily kationty a tím od nich oddělily sekundární elektrony. Při srážkách se také uvolňuje energie, která se



Obr. 2.4 - Svařování elektrickým obloukem obalenou elektrodou [7]

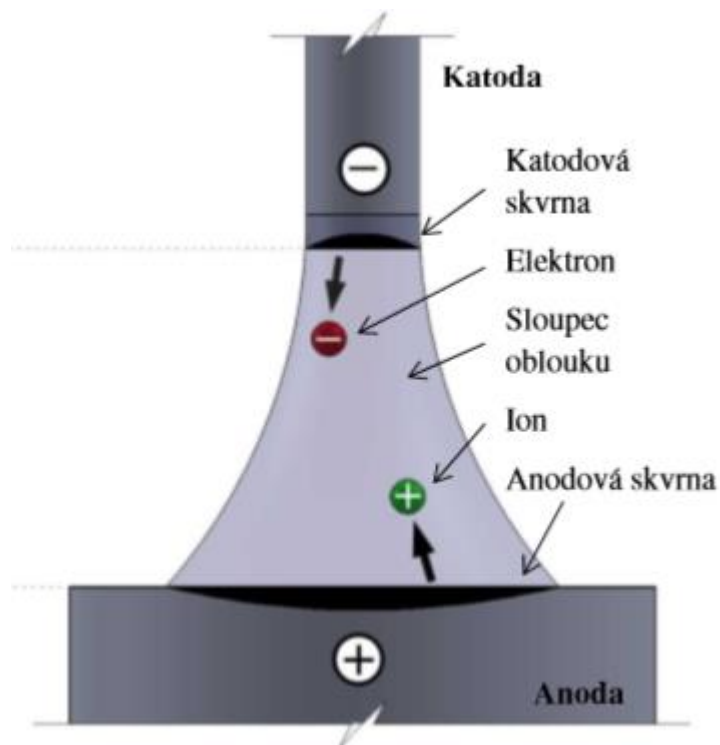
projevuje jako UV záření. Analogický děj k ionizaci, kdy se namísto atomů vlivem dodávané energie rozpadají molekuly na jednotlivé atomy, se nazývá disociace. Oba děje jsou znázorněny na Obr. 2.5. [9]



Obr. 2.5 - Disociace molekul (vlevo) a ionizace atomů (vpravo) [9]

2.2.1.2 Popis elektrického oblouku

Při procesu svařování je elektrický oblouk rozdělen na tři základní oblasti – katodovou oblast, anodovou oblast a oblast sloupce oblouku. Základní schéma elektrického oblouku je vyobrazeno na Obr. 2.6.



Obr. 2.6 - Schéma elektrického oblouku [9]

Katodová skvrna je ostře ohraničená oblast na katodě emitující prvotní elektrony, které nám umožňují ionizaci plynu a zapálení oblouku. Vzniká dopadem kationtů, které se uvolňují na anodě. S růstem elektrického proudu se rychlosti dopadu kationtů zvyšují a

spolu s nimi se zvyšuje i teplota katodové skvrny. Vlivem emise elektronů (odvod práce) se opět snižuje a pohybuje se tak v rozmezí 2400 – 3000 °C. [6; 9]

Sloupec oblouku je svítící oblast vyznačující se intenzivním UV zářením a výbornou vodivostí. Ionizovaný plyn se zde vyskytuje ve formě plazmatu a dosahuje velmi vysokých teplot. Ty závisí na proudu, napětí, prostředí oblouku a metodě svařování. Nejvyšších teplot dosahuje střed oblouku těsně pod katodovou skvrnou. Délka oblouku ovlivňuje změnu napětí – s rostoucí délkou roste i napětí a naopak. Průměrné snížení napětí je přibližně 2 V na 1 mm délky oblouku. [6]

Anodová skvrna je oblast na anodě, kde se neutralizují dopadající záporné částice, jejichž energie se při dopadu mění na tepelnou energii a částečně také na elektromagnetické záření. Opět platí, že s větší kinetickou energií částic, a tedy i rostoucí rychlostí dopadu, je teplo uvolňováno intenzivněji. Teplota anodové skvrny se pohybuje v rozmezí 2700 – 3600 °C a často dosahuje teploty varu svařovaného materiálu. Vypařované atomy pak z anody přechází do plazmatu oblouku a opět se ionizují. [6]

Výše popsaný děj je stabilní při svařování stejnosměrným proudem. Pokud se při svařování naopak používá střídavý proud, oblouk zhasíná vždy při nulovém proudu a poté je opět zapálen při opačné polaritě. Tento cyklus se opakuje frekvencí, která je určena nastavením svařovacího zdroje, anebo síťovou frekvencí 50 Hz. [6]

2.2.1.3 Teplo v elektrickém oblouku a jeho účinky

Svařování elektrickým obloukem je v praxi rozšířené především díky tomu, že elektrický oblouk je výborným zdrojem tepla, které dokáže koncentrovat na relativně malou plochu při poměrně dobré účinnosti přenosu tepla do svarového spoje. Změnou svařovacích parametrů je možné velmi snadno elektrický oblouk a jeho účinky regulovat, lze například ovlivňovat charakter a rozměry svarové lázně, zbytková napětí ve svařenci, deformace svaru i tepelné ovlivnění základního materiálu. Teplota elektrického oblouku výrazně ovlivňuje fyzikální, metalurgické i chemické děje při svařování, se kterými souvisí odtavování elektrody a vzájemné působení plynů a roztaveného kovu ve svarové lázni. [6; 9]

Vzhledem ke složitosti energetických a chemických reakcí, které mohou mít vliv na energetickou bilanci elektrického oblouku, se jako celkový výkon oblouku uvažuje jeho elektrický příkon P_0 [W], který se vypočítá dle rovnice (2.4),

$$P_0 = k_I \cdot U \cdot I \quad (2.4)$$

kde k_I [-] vyjadřuje vliv průběhu elektrického napětí U [V] a proudu I [A] (při stejnosměrném proudu je k_I rovno jedné). [6; 8]

Celková tepelná energie Q_c [J] elektrického oblouku, která je vnášena do materiálu při svařování tavící se elektrodou, se spočítá dle rovnice (2.5):

$$Q_c = Q_i + Q_p + Q_r + Q_m \quad (2.5)$$

Složka Q_i [J] představuje energii, která je přenášena nosiči elektrického náboje na katodovou, nebo anodovou skvrnu. Tepelná energie vzniká odevzdáním kinetické energie částic při dopadu.

Složka Q_p [J] je dána energií, která je přenášena tokem plazmatu, obtékající svařovaný materiál. Je velmi důležitá pro tepelné i mechanické účinky elektrického oblouku. Velký vliv mají na proud plazmatu také páry kovu, které vznikají na konci elektrody.

Složku Q_r [J] tvoří energie záření, které je přenášeno sloupcem oblouku a elektrodovými skvrnami. Závisí na polaritě, průřezu elektrody a velikosti svarové lázně.

Složka Q_m [J] je energie, která se do oblouku dostává z kapek roztaveného kovu elektrody jejich entalpií a kinetickou energií. [6; 8]

Mnohem častěji se však v praxi namísto celkové tepelné energie používá měrné vnesené teplo Q_v [$J \cdot m^{-1}$], které se vypočítá ze vztahu (2.6). Měrné vnesené teplo je vztažené na jednotku délky svaru a obvykle se namísto základních jednotek uvádí v $kJ \cdot cm^{-1}$.

$$Q_v = \eta_o \cdot \frac{U \cdot I}{v_s} \quad (2.6)$$

V rovnici (2.6) symbol v_s [$m \cdot s^{-1}$] označuje rychlost pohybu elektrody ve směru drátu (rychlost svařování). Teplo, které je tvořené elektrickým obloukem, však není do svaru předáváno beze zbytku. Měrné vnesené teplo vlivem ztrát, například pro ohřev elektrody a základního materiálu či záření, představuje tedy jen část z celkové tepelné energie. V rovnici (2.6) jsou tyto tepelné ztráty zohledněny tzv. účinností přenosu tepla elektrického oblouku η_o [-]. [10] Účinnost přenosu tepla se dá obecně považovat za podíl vnesené energie do svaru Q_{sv} [J] a celkové energie oblouku Q_c [J], viz rovnice (2.7) [6], často se však uvažují jednotné hodnoty pro různé metody svařování, například 0,9 pro svařování pod tavidlem, 0,8 pro svařování metodou MIG/MAG nebo 0,6 pro svařování obalenou elektrodou a svařování metodou TIG.

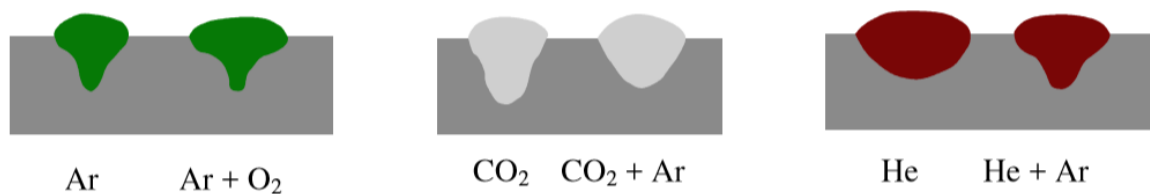
$$\eta_o = \frac{Q_{sv}}{Q_c} \quad (2.7)$$

2.2.2 Ochranné atmosféry

Při svařování elektrickým obloukem v ochranné atmosféře se za účelem zlepšení svařovacích podmínek a ochrany elektrody, oblouku, svarové lázně i tepelně ovlivněné oblasti do oblasti svařování přivádí plyn, jehož hlavní funkce jsou [6]:

- zamezení přístupu okolního vzduchu (především vzdušného kyslíku), čímž se omezuje nebo úplně zabraňuje oxidaci, propalu prvků v kovu, naplynění a tím i vzniku pórů
- vytvoření ionizovaného prostředí, které zlepšuje zapálení a hoření oblouku
- vliv na způsob přenosu kovu v elektrickém oblouku – tvar a rozměr kapek kovu, síly, které na ně působí, jejich rychlost pohybu v oblouku a tím i jejich kinetickou energii
- ovlivnění tvaru a rozměru oblouku
- metalurgické, fyzikální a chemické procesy v kapce kovu
- zvýšení účinnosti přenosu tepelné energie z oblouku do svaru a tím zvýšení rychlosti a produktivity svařování
- vliv na chování a geometrii svarové lázně a výsledný tvar a velikost průřezu svaru
- kvalitu, povrch a mechanické charakteristiky spoje

Plyny jsou děleny do dvou skupin: aktivní a inertní (nereaktivní). [9] Dle dalšího rozdělení mohou být jednosložkové nebo vícesložkové (směsi plynů) a dle svého chemického složení se ve svarové lázni projevují redukčním, oxidačním nebo nauhličujícím vlivem. Redukční účinek způsobují plyny obsahující vodík, oxidační účinek způsobují plyny s kyslíkem a nauhličující účinek plyny s uhlíkem. [6; 8] Na Obr. 2.7 jsou patrné typické vlivy různých ochranných plynů na tvar průřezu svarové housenky.



Obr. 2.7 - Vliv složení ochranné atmosféry na geometrii svaru [9]

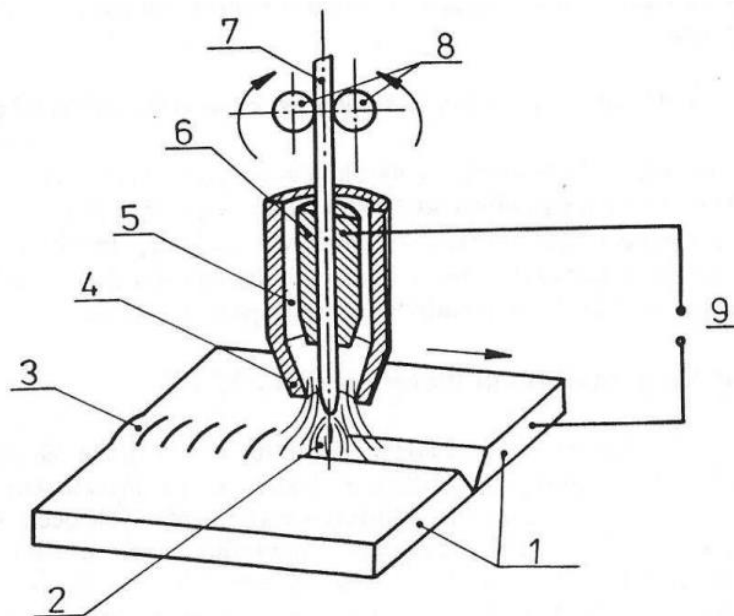
2.2.3 Metoda MAG

Svařování metodou MAG (z angličtiny metal active gas), dle normy ISO 4063 označováno jako metoda 135, patří, spolu se svařováním obalenou elektrodou, k světově nejrozšířenějším způsobům svařování nízkouhlíkových, nelegovaných a nízkolegovaných ocelí. Je to způsobeno především díky mnoha výhodám, které umožňují svařování [8]:

- ve všech polohách
- přímočaré, kruhové i bodové
- plechů (o tloušťce od 1 mm) i materiálů o velkých tloušťkách (až 40 mm) [11]
- s odkrytým obloukem (přímá kontrola svarové lázně)
- s minimální tvorbou strusky
- velmi dlouhých svarů

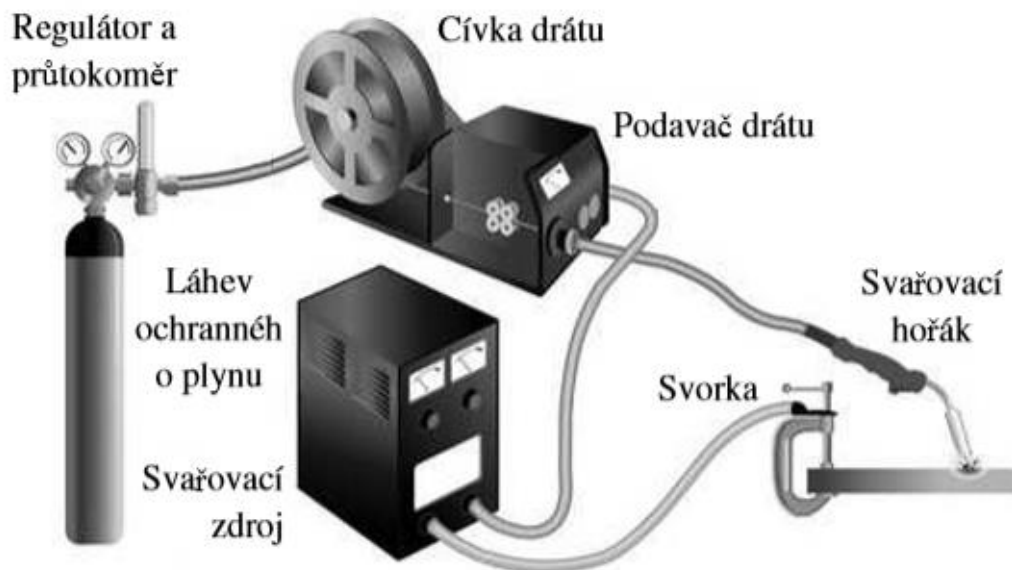
- s jednoduchým zapalováním oblouku
- s velkou proudovou hustotou a výkonem odtavování elektrody
- s širokým výběrem elektrod i ochranných plynů, čímž se dá ovlivnit geometrie svaru i mechanické vlastnosti svařence
- se snadnou možností automatizace, vysokou produktivitou a širokým uplatněním

Princip svařování pomocí metody MAG je založen na předávání tepelné energie do svaru z oblouku, který hoří mezi hubicí svařovacího hořáku a základním materiálem. Skrze objímku, která tvoří jádro hubice, je konstantní rychlostí vedena teplem odtavující se elektroda ve formě drátu, který je odvíjen z podávacího zařízení pomocí podávacích kladek. Kapka roztavené elektrody je přenášena do nataveného svařovaného materiálu a společně tvoří svarovou lázeň. Elektrický kontakt elektrody se zdrojem je zajištěn třecím kontaktem drátu a ústí hořáku. Uzemnění elektrického proudu je realizováno pomocí svorky, která propojuje základní materiál se zdrojem, a uzavírá tak elektrický obvod. Z tlakové lahve skrze trysku kolem objímky elektrody proudí ochranný plyn, případně směs plynů, tvořící ochrannou atmosféru v oblasti elektrického oblouku. [6; 9] Na Obr. 2.8 je schematicky znázorněn princip metody MAG a celá svařovací sestava je vyobrazena na Obr. 2.9.



Obr. 2.8 - Schéma procesu MAG [12]

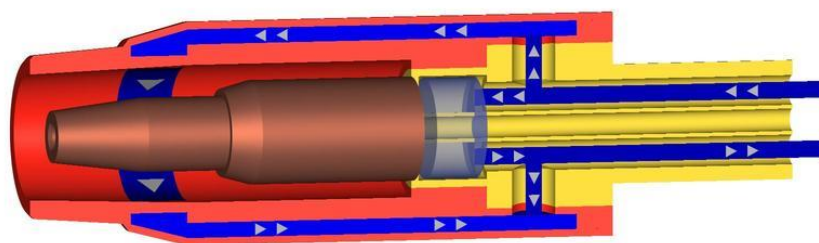
1 – základní materiál, 2 – elektrický oblouk, 3 – svar, 4 – svařovací hubice, 5 – ochranný plyn, 6 – kontaktní objímka, 7 – přídavný materiál, 8 – podávací kladky, 9 – svařovací zdroj



Obr. 2.9 - Pracovní sestava pro ruční svařování metodou MAG [9]

Vzhledem k náročnosti a složitosti výroby mohou někdy být modernější pracovní zařízení dovybaveny například [6]:

- chladicím systémem znázorněným na Obr. 2.10, který zabraňuje přehřívání svařovacího hořáku a kabelu vedoucího přídavný materiál
- dalším podávacím zařízením napomáhajícím přivádět drátovou elektrodu do míst, která jsou vzdálená od zásobníku s cívkou
- dálkovým ovladačem, který usnadňuje obsluze regulovat svařovací parametry
- počítačem s řídicí jednotkou a procesorem umožňujícím regulaci a kontrolu svařovacích parametrů v reálném čase, archivaci procesních dat v paměti a obsahujícím databázi předdefinovaných programů svařovacích cyklů
- pojízdný vozík pro zlepšení mobility pracovní sestavy



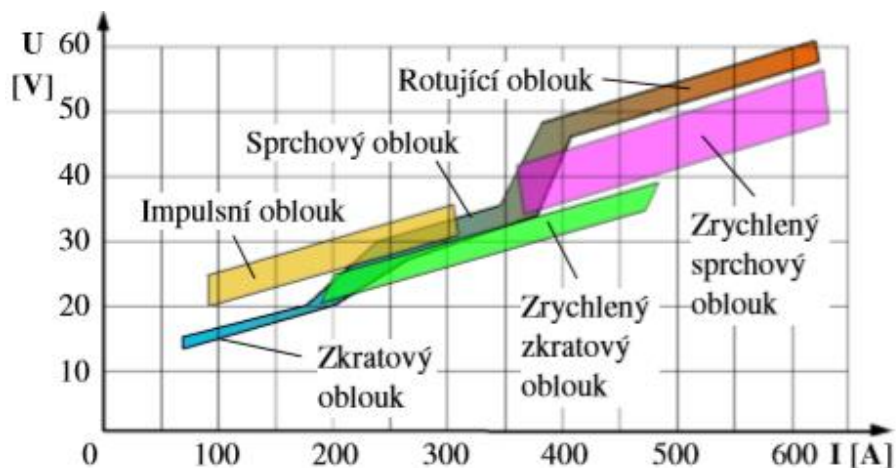
Obr. 2.10 - Systém chlazení svařovacího hořáku a kabelu [12]

2.2.4 Přenos kovu elektrickým obloukem

Pod pojmem přenos kovu elektrickým obloukem se rozumí děj, kdy se při svařování natavuje konec elektrody a oddělují se z něj kapky tekutého kovu, které se následně přenáší obloukem a splývají se svarovou lázní. Způsob přenosu nataveného kovu velmi výrazně ovlivňuje celkový svařovací proces. Má vliv na stabilitu hoření elektrického oblouku, rozstřík roztaveného kovu a výslednou kvalitu svarového spoje. Pro stabilní proces je nutné dodržet plynulost oddělování kapek z konce elektrody. Minimalizací rozstříku dojde k tvorbě vzhledného svaru a kromě vzhledu také rozstřík ovlivňuje účinnost přenosu tepla do svaru. [9; 10]

Legující prvky, které se nacházejí v přídavném materiálu, mohou při přenosu v elektrickém oblouku reagovat s oxidační složkou v ochranném plynu, čímž dochází k jejich vypalování. Výsledný obsah prvků ve svarovém materiálu závisí na frekvenci kapek (počet kapek, které přejdou z elektrody přes oblouk do svarové lázně za jednotku času), tedy na době, po kterou je roztavený kov ve styku s elektrickým obloukem, resp. ochranným plynem. Čím je frekvence kapek větší, tím více se shoduje obsah prvků ve svarovém kovu s obsahem prvků v přídavném materiálu. Frekvenci kapek lze zvyšovat např. zmenšením průměru drátu tavící se elektrody, vyšší proudovou hustotou nebo nižším zkratovým napětím. [11]

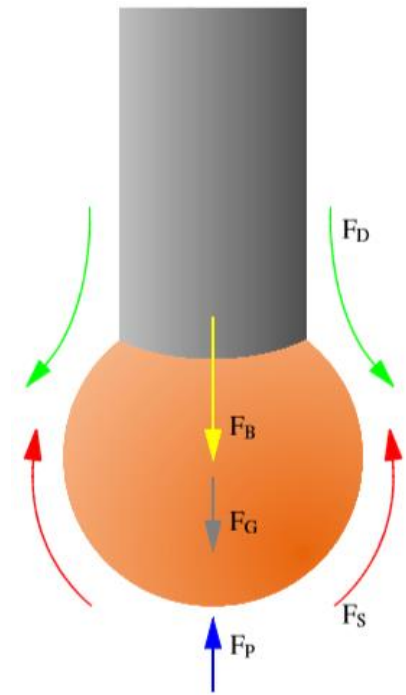
Na Obr. 2.11 jsou graficky znázorněny různé druhy přenosu kovu elektrickým obloukem v závislosti na velikosti svařovacího proudu a napětí v oblouku.



Obr. 2.11 - Způsoby přenosu kovu elektrickým obloukem dle svařovacího proudu I a napětí v oblouku U [9]

Faktorů ovlivňujících to, jakým způsobem se bude roztavený kov v oblouku přenášet, je poměrně mnoho. Nejdůležitějšími jsou procesní parametry, zejména napětí v oblouku, svařovací proud a rychlost podávání drátu. Mezi další důležité faktory patří složení ochranného plynu, druh přídavného i svařovaného materiálu a síly působící v elektrickém oblouku, které jsou vyobrazeny na Obr. 2.12. [10; 13]

Výsledné síly v elektrickém oblouku se sečtou, přičemž nejdůležitější z nich je síla elektromagnetická F_B neboli Lorentzova, která způsobuje zaškrcení kapky v zužujícím se krčku a umožňuje svařování v polohách. Spolu s touto silou napomáhá odtržení kapky od elektrody tlaková síla F_D proudícího ochranného plynu. Další ze sil je síla gravitační F_G (tíhová), jejíž směr je dán polohou svařování. Síla povrchového napětí F_S působí proti odtržení, udržuje kapku na hrotu elektrody a formuje ji do podoby koule. Proti odtržení působí také síla tlaku kovových par F_P vznikajících při hoření oblouku. [9; 10]



Obr. 2.12 - Síly působící na kapku v elektrickém oblouku, poloha PA [9]

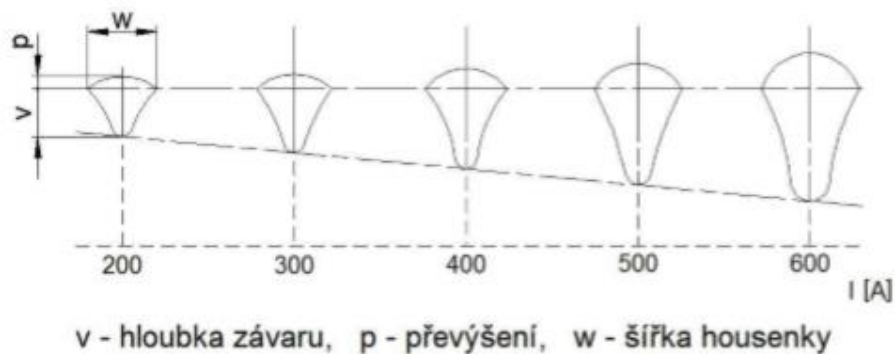
- F_B – elektromagnetická síla
- F_D – tlaková síla proudícího ochranného plynu
- F_G – gravitační síla
- F_S – síla povrchového napětí
- F_P – síla tlaku kovových par

2.2.5 Svařovací parametry a jejich vliv na geometrii svaru

Svařování elektrickým obloukem tavící se elektrodou se vyznačuje velkým množstvím proměnných, které ovlivňují celkový proces tvorby svaru i výslednou kvalitu spoje. Tyto proměnné spolu často vzájemně souvisí a jsou navíc ještě ovlivněny dalšími faktory, jako je například druh ochranného plynu, průměr používaného drátu elektrody, požadovaný způsob přenosu kovu obloukem apod. Je nutné dodržet, aby se použité procesní parametry pohybovaly v oblasti stability hoření elektrického oblouku. Za tímto účelem byly výzkumnými svařovacími středisky vypracovány grafy těchto pracovních oblastí, které se nahrávají do knihoven řídicích jednotek svařovacích zařízení. Ty poté pracují v tzv. synergickém režimu, to znamená, že zařízení při nastavení jednoho procesního parametru automaticky upravuje zbylé tak, aby byl celý průběh svařování stabilní. [10]

2.2.5.1 Svařovací proud

Z procesních parametrů má největší vliv na tvar průřezu svarové housenky svařovací proud. S rostoucím svařovacím proudem se zvětšuje hloubka protavení, převýšení svaru a housenka se lehce rozšiřuje, jak je ukázáno na Obr. 2.13. [10]

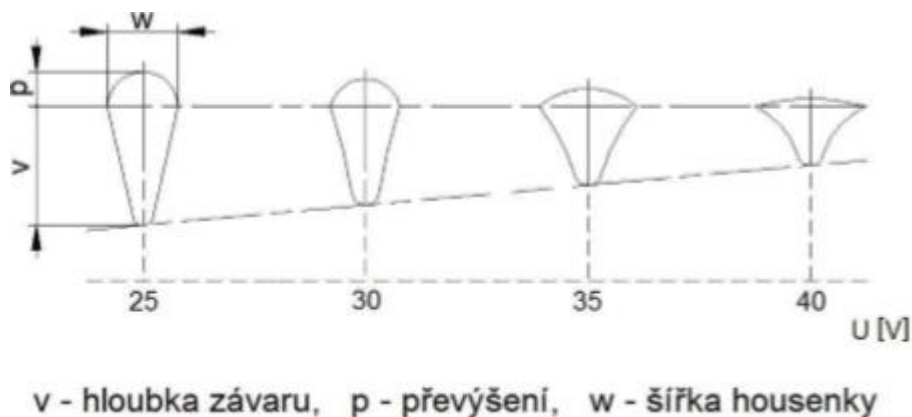


Obr. 2.13 - Vliv svařovacího proudu na geometrii svaru [10]

Dále svařovací proud ovlivňuje výkon odtavování, proudovou hustotu, tekutost svarové lázně a charakter přenosu kovu. Při zvyšování proudu výrazně roste frekvence kapek, zmenšuje se jejich objem a mění se síly, které na ně působí. Pro výslednou kvalitu svaru je větší počet menších kapek výhodnější, větší drát má naopak větší směrovou stabilitu výletu drátu a je levnější. Je nutné dát si pozor na příliš vysoký svařovací proud, jelikož při něm dochází k rozstříku a také by se mohl protavit svařovaný materiál. Nebezpečí protavení je primárně dáno tloušťkou a druhem svařovaného materiálu, dále je ovlivněno druhem ochranné atmosféry a limitní hodnotou vneseného měrného tepla. [10]

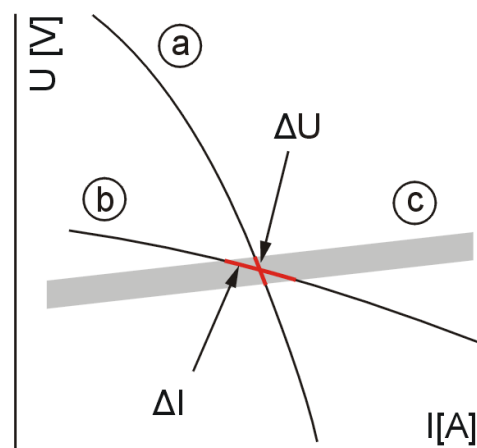
2.2.5.2 Svařovací napětí

Napětí v oblouku představuje rozdíl elektrického potenciálu mezi drátem elektrody a svarovou lázní. V průběhu procesu se mění dle délky oblouku a má pouze malý vliv na výkon odtavení. Naopak má velmi velký vliv na šířku svarové housenky – se zvyšujícím se napětím šířka roste, klesá hloubka závaru a převýšení. Na hloubku závaru má ale samotné napětí jen malý vliv. Spolu s použitým ochranným plynem však výrazně ovlivňuje způsob přenosu kovu obloukem. Vliv velikosti napětí na geometrii svaru je znázorněn na Obr. 2.14. [6; 10]



Obr. 2.14 - Vliv svařovacího napětí na geometrii svaru [10]

Důležitou roli hraje napětí při samoregulaci délky oblouku, kvůli které se u metod MIG a MAG používají svařovací zdroje s plochou voltampérovou charakteristikou. Ta je spolu se strmou V-A charakteristikou a pracovní oblastí svařovacího zdroje znázorněna na Obr. 2.15. Plochá V-A charakteristika zaručuje, že při malé změně napětí se výrazně změní proud. Při prodloužení oblouku se zvětší napětí, vlivem ploché V-A charakteristiky se sníží proud, tím klesne i rychlost odtavování a přiváděný drát tak dorovná optimální délku oblouku. Pokud by se oblouk zkrátil, kleslo by tím napětí a zvýšil se proud, čímž by se zvětšila rychlost odtavování a délka oblouku by tak opět nabyla ideálních hodnot. [10]



Obr. 2.15 - Zobrazení strmé (a) a ploché (b) charakteristiky v pracovní oblasti (c) svařovacího zdroje [14]

Svařovací napětí nelze nastavit předem, a to z důvodu závislosti na velikosti proudu. Nastavuje se proto tzv. napětí naprázdno U_0 [V]. Napětí naprázdno po zapálení oblouku klesá na hodnotu, která odpovídá velikosti proudu při určitém odporu elektrického obvodu. [10]

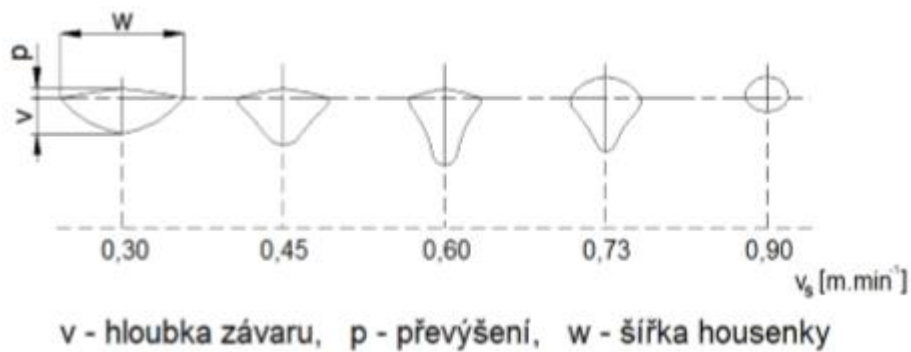
Napětí je možné měnit pouze v určitém rozsahu. Jeho velikost lze orientačně určovat dle normy ČSN EN 60974-1, ze vztahu (2.8). Pokud proud přesahuje hodnotu 600 A, velikost napětí se uvažuje 44 V. [10]

$$U = 14 + 0,05 \cdot I \quad (2.8)$$

S rostoucím napětím se prodlužuje délka oblouku a tím i doba, po kterou jsou kapky roztaveného kovu v kontaktu s elektrickým obloukem. Při příliš velkém napětí pak dochází ke zvýšení propalu prvků a svarový spoj má ve výsledku horší mechanické vlastnosti. [10]

2.2.5.3 Rychlost svařování

Rychlost, jakou se pohybuje svařovací hubice ve směru tvorby svaru, má na proces opačný vliv než svařovací proud a napětí. Při zvyšování svařovací rychlosti se do svaru dostává méně měrného tepla a zároveň se zvyšuje rychlost ochlazování svarové lázně. S rostoucí rychlostí svařování se zmenšuje šířka svaru, hloubka protavení se naopak zvětšuje, a to až do takové hodnoty rychlosti, kdy se ještě stíhají natavovat svarové plochy. S dalším zvyšováním rychlosti se dále svar zužuje a roste jeho převýšení. Vliv svařovací rychlosti na tvar průřezu svaru je zobrazen na Obr. 2.16. [10]

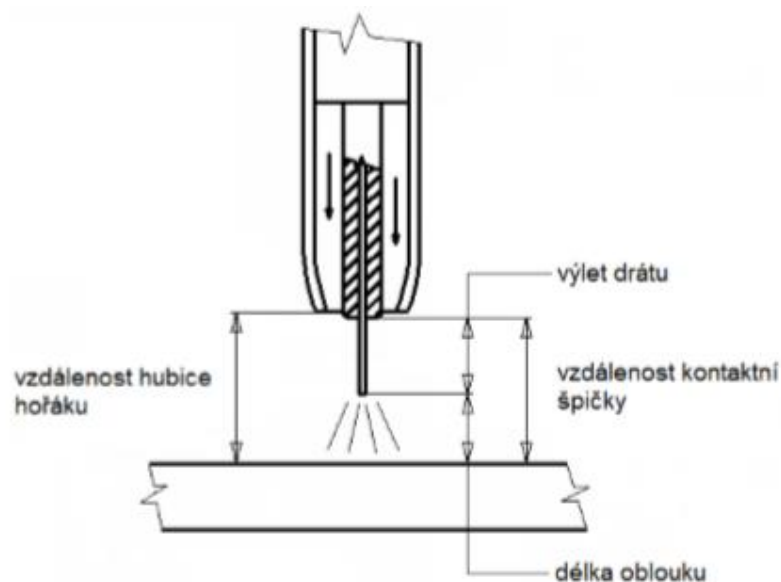


Obr. 2.16 - Vliv rychlosti svařování na geometrii svaru [10]

Při větších rychlostech se na rozhraní povrchu svarové housenky a svařovaného materiálu tvoří vrub, ve kterém se soustřeďuje napětí při namáhání svařence. Rychlost svařování také výrazně ovlivňuje to, s jakou účinností se natavuje materiál, neboť určuje množství vneseného tepla do svarové lázně, které se přímo využije na natavení materiálu. [10]

2.2.5.4 Volná délka drátu

Volná délka drátu, tzv. výlet, je vzdálenost mezi kontaktní špičkou a koncem drátu tavicí se elektrody a je v průběhu procesu ovlivňována způsobem přenosu kovu obloukem a použitým ochranným plynem. Ačkoliv je hodnota výletu samoregulována plochou charakteristikou svařovacího zdroje, lze ji částečně regulovat změnou vzdálenosti mezi kontaktní špičkou a základním materiálem. Čím je volná délka drátu větší, tím je větší i teplota, na kterou je drát ohříván vlivem odporového tepla. [10] Na Obr. 2.17 jsou znázorněny rozměry, které definují polohu konce elektrody při procesu svařování



Obr. 2.17 - Schematické znázornění vzdáleností v oblasti mezi svařovací hubicí a základním materiálem [10]

Při nastavování výletu drátu se přihlíží na používaný ochranný plyn. Pro čistý plyn CO₂ platí rovnice (2.9) a pro směsné ochranné plyny rovnice (2.10), ve kterých L_d [mm] představuje volnou délku drátu a průměr drátu je označen d [mm]. V praxi je však výhodnější vycházet spíše z druhu přenosu kovu, kdy pro zkratový přenos kovu platí rovnice (2.11) a pro bezzkratový rovnice (2.12), ve kterých L_p [mm] značí vzdálenost kontaktní špičky od materiálu a písmeno d [mm] opět značí průměr drátu. [10]

$$L_d = 5 + 5 \cdot d \quad (2.9)$$

$$L_d = 7 + 5 \cdot d \quad (2.10)$$

$$L_p = (10 \cdot d) + 1 \quad (2.11)$$

$$L_p = (10 \cdot d) + 3 \quad (2.12)$$

Kromě změny velikosti výletu a délky oblouku změnou vzdálenosti kontaktní špičky, lze volnou délku drátu měnit i rychlostí podávání drátu. Jejím zvýšením se volná délka drátu prodlužuje a tím se zkracuje délka oblouku. Při zvýšení hodnoty výletu je drát ohříván odporovým teplem a pro natavení využívá méně tepelné energie oblouku, snižuje se ale vliv ochranné atmosféry, klesá směrová stabilita drátu a roste rozstřík. [10]

Příliš dlouhý oblouk způsobuje plochý a mělký závar, u kterého je velký rozstřík a nebezpečí vzniku pórů, díky turbulentnímu proudění plynů v oblasti elektrického oblouku. Při příliš krátkém oblouku naopak hrozí zkrat při dotyku elektrody a lázně, do svaru je vnášeno méně materiálu a vlivem nerovnoměrného vnášení tepla je riziko výskytu studených spojů. [10; 15]

2.3 Cyklické namáhání

Strojní součásti jsou v praxi velmi často vystavovány opakovanému působení vnějších sil, které je nazýváno cyklické namáhání. Již od prvotního působení tohoto zatížení pak na mikroskopické úrovni vznikají v materiálu nevratné změny, které se označují termínem únava materiálu. Tyto změny jsou vyvolány napětím, které by materiál při statickém působení bez problémů zvládl – zpravidla je napětí menší než mez kluzu – a vedou ke kumulaci poškození, které způsobuje tvorbu trhlin materiálu a ve výsledku i únnavový lom. Je důležité zmínit, že v teorii únnavových lomů není materiál považován za homogenní, a tudíž se proces neřídí zákony mechaniky kontinua. [16; 17]

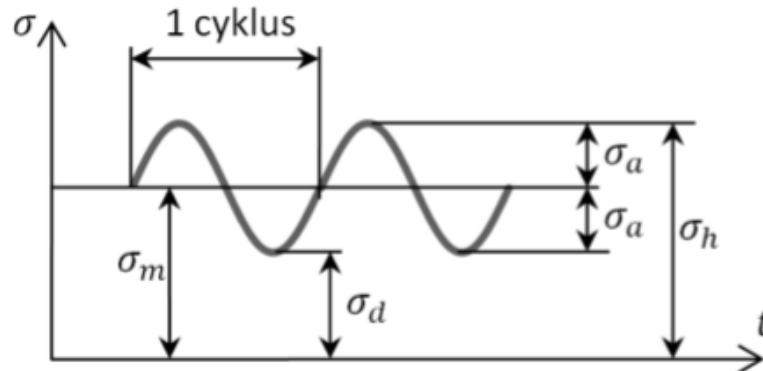
2.3.1 Definice cyklického zatížení

Zatěžování cyklickým namáháním se rozlišuje dle průběhu v čase – může být deterministické, nebo stochastické. Stochastické je zatěžování náhodné, kdežto deterministické zatížení je určitou periodickou, či neperiodickou funkcí času. Periodický proces, jehož průběh je vidět na Obr. 2.18, se vyznačuje konstantními hodnotami horního napětí σ_h , dolního napětí σ_d , amplitudy napětí σ_a a středního napětí σ_m , které lze chápat

jako předpětí. [16; 18] Při návrhu a kontrole součásti při cyklickém zatěžování se nejčastěji pracuje se středním napětím a jeho amplitudou, jejichž vztahy s horním a dolním napětím popisují rovnice (2.13) a (2.14). [19]

$$\sigma_m = \frac{1}{2}(\sigma_h + \sigma_d) \quad (2.13)$$

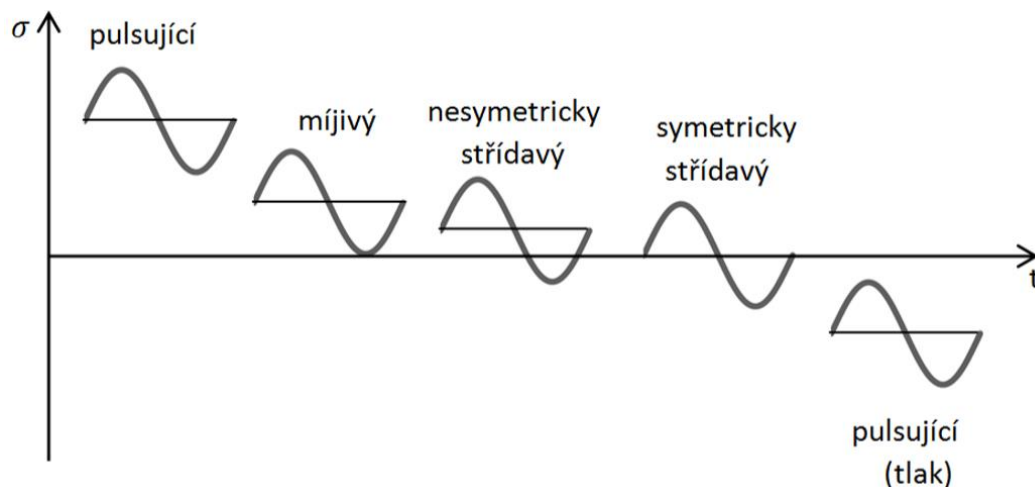
$$\sigma_a = \frac{1}{2}(\sigma_h - \sigma_d) \quad (2.14)$$



Obr. 2.18 – Periodický napěťový cyklus [20]

Jak je znázorněno na Obr. 2.19, dle velikosti středního napětí a jeho smyslu (tah - tlak) jsou zátěžné cykly rozdělovány na pulsující tahové, mívivý, nesymetricky střídavé, symetricky střídavé a pulsující tlakové. Často je pak používáno značení pomocí koeficientu asymetrie cyklu $R [-]$, který se počítá dle rovnice (2.15).

$$R = \frac{\sigma_d}{\sigma_h} \quad (2.15)$$

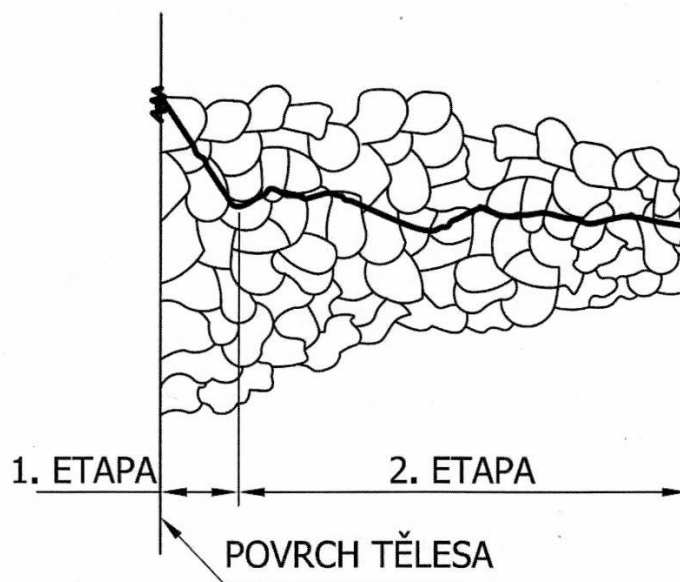


Obr. 2.19 - Rozlišení zátěžných cyklů na základě středního napětí [20]

2.3.2 Únavový lom

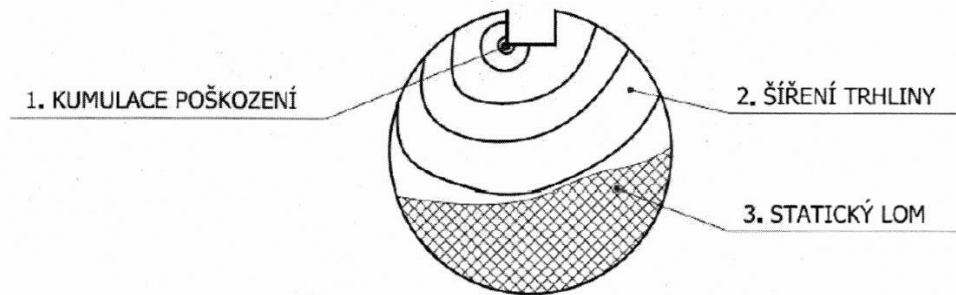
Narušení materiálu vlivem cyklického namáhání není zpočátku pouhým okem pozorovatelné a je viditelné až po delším působení zatížení. Obecně platí, že prvotní trhliny se tvoří na povrchu tělesa či ve velmi malé hloubce pod povrchem a dále ve fázích postupují hlouběji. [16]

Ještě před samotnou tvorbou únavového lomu se v celém objemu zatěžované součásti mění hustota mřížkových poruch, což zapříčiní i změnu mechanických vlastností. V první fázi, zvané též nukleace či iniciace, dochází k lokalizaci plastických deformací. Na povrchu součásti se začínají tvořit první mikrotrhliny a postupně se šíří hlouběji ve skluzových pásmech, která jsou vůči povrchu skloněna přibližně pod úhlem 45° . [20] Pokud jsou v materiálu různé nehomogenity (například póry nebo vměstky), tvoří se trhliny i na jejich rozhraní bez ohledu na to, jak daleko jsou od povrchu součásti. V druhé fázi, která je také někdy nazývána propagace, trhlina postupuje kolmo na směr největšího normálového napětí ve velikosti, která přibližně odpovídá velikosti zrn materiálu. Pro šíření poruch materiálu jsou rozhodující plastické vlastnosti zóny, která je v těsné blízkosti před špičkou trhliny. Pokud je zbývající průřez slabý natolik, že není schopen přenosu ani statického zatížení, dochází ke křehkému dolomu. [16; 17] Fáze tvorby únavového lomu jsou schematicky znázorněny na Obr. 2.20.



Obr. 2.20 - Vznik a šíření únavového lomu [16]

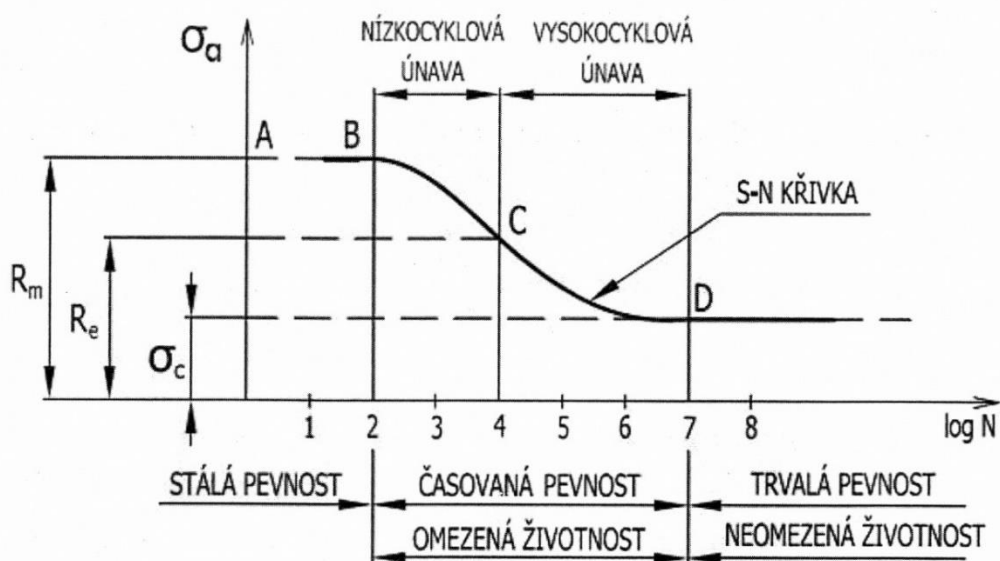
Povrch trhlin vznikajících únavovým lomem je často hladký, jelikož se stěny opakovaným rozšiřováním a zužováním vzájemně obrušují. Někdy se na povrchu trhlin objevují čáry, které vyznačují rozhraní mezi etapami šíření trhlin. Ze vzhledu lomové plochy lze vyčíst například napětí, kterým byla součást namáhána, její tvar průřezu anebo velikost provozního zatížení. Obr. 2.21 schematicky zobrazuje části lomové plochy. [16]



Obr. 2.21 - Vzhled únavového lomu [16]

2.3.3 Wöhlerova křivka životnosti

Wöhlerova křivka, v některých literaturách označována jako křivka S-N, popisuje závislost amplitudy napětí σ_a na počtu cyklů N do únavového lomu. Je zjišťována experimentálně a platí, že se snižující se amplitudou napětí vzrůstá počet cyklů do lomu. Wöhlerova křivka se asymptoticky přibližuje k mezi únavy σ_c , což je amplituda napětí, při které materiál vydrží teoreticky nekonečně mnoho cyklů. Zjištění této hodnoty je však nereálné, proto se v praxi za mez únavy uvažuje hodnota napětí, při kterém se materiál neporuší ani při překonání 10^7 cyklů. Trhlina přitom nemusí vzniknout vůbec, anebo se její šíření zastaví ve fázi tvorby mikrotrhliny. [16; 20]



Obr. 2.22 - Wöhlerova křivka [16]

Diagram zobrazený na Obr. 2.22 je rozdělen na následující oblasti [16]:

- Oblast **stálé neboli kvazistatické pevnosti**, ve které se únavový jev neprojevuje vůbec a porucha materiálu nastává až při překročení meze pevnosti R_m .
- Oblast **časované pevnosti**, ve které je životnost vzorku, který je namáhán odpovídajícím cyklickým zatížením, dána maximálním počtem cyklů. Dle počtu cyklů do porušení součásti se tato oblast dále rozděluje na **nízkocyklovou únavu** a **vysokocyklovou únavu**. Počet cyklů, který rozděluje nízkocyklovou a vysokocyklovou únavu, se pro ocelové součásti uvádí v rozmezí 10^4 až $5 \cdot 10^5$.
- Oblast **trvalé pevnosti** představuje neomezenou životnost vzorku. [16]

Orientačně lze mez únavy vyjádřit vzhledem k mezi pevnosti materiálu dle vztahu (2.16),

$$\sigma_c = c_i \cdot R_m \quad (2.16)$$

ve kterém jsou hodnoty napětí uvažovány v MPa, a c_i představuje bezrozměrný součinitel, který závisí na materiálových vlastnostech a způsobu zatěžování. Pro konstrukční oceli platí hodnoty uvedené v Tab. 2.3. [16]

Tab. 2.3 - Hodnoty součinitele c_i [16]

způsob namáhání	hodnota c_i
střídavý tah - tlak	0,35
střídavý ohyb	0,43
střídavý krut	0,25

2.3.4 Skutečná součást a mez únavy

Mez únavy skutečné součásti může mít v praxi mnohem menší hodnotu, než která byla zjištěna na zkušebním vzorku. Je to proto, že mez únavy je ovlivněna velkým množstvím faktorů.

Jedním z faktorů, které ovlivňují mez únavy skutečné součásti, je její **velikost**. Obecně platí, že čím větší je součást, tím menší má mez únavy. S rozměrem součásti totiž roste její povrch, tedy plocha, kde mohou vzniknout prvotní trhliny, a je tedy větší pravděpodobnost jejich výskytu. Navíc na větším povrchu je obtížnější dosáhnout ve všech místech stejné jakosti. Ve větším objemu je také více nečistot a defektů, které taktéž umožňují vznik mikrotrhlin. Vliv velikosti součásti na mez únavy je zahrnut v součiniteli velikosti $v [-]$, který je definován jako podíl meze únavy skutečné součásti a meze únavy zkušebního vzorku. [16]

Dalším z vlivů je **kvalita povrchu**. Ta je u skutečné součásti zpravidla horší než u zkušebních vzorků, které bývají broušené či leštěné. Větší drsnost povrchu urychluje

nukleaci, tedy tvorbu a šíření mikrotrhlin. Vliv na mez únavy nemá samotná drsnost, ale také to, jakým způsobem byla dosažena. [16]

Vliv jakosti povrchu představuje součinitel jakosti povrchu η [-], který je definován podílem meze únavy skutečné součásti a meze únavy leštěného vzorku. [16]

Mez únavy je také ovlivněna tím, jaká má povrch součásti **zbytková napětí**. Tlaková zbytková napětí snižují trhlinám schopnost šířit se a jsou tedy přínosná – zvyšují mez únavy. Tahová zbytková napětí působí na materiál přesně opačně a mez únavy naopak snižují. Tato dvě zbytková napětí však nemohou existovat jedno bez druhého – pokud je v povrchové vrstvě tlakové zbytkové napětí, tak v určité hloubce je i napětí tahové, které součást udržuje v rovnováze. Je proto nutné brát v úvahu i možnost tvorby trhlin v určité hloubce pod povrchem. [16]

Napětí v povrchové vrstvě lze i účelně vytvořit. Galvanické pokovování způsobuje tahová napětí, a je proto spíše nevhodné pro cyklicky namáhané součásti. Tlaková napětí se dají vytvořit například nitridováním, cementováním, povrchovým kalením, kuličkováním a válečkováním. [16]

Vliv technologických úprav na mez únavy je vyjádřen součinitelem zpevnění ζ [-], který je definován podílem meze únavy součásti se zpevněnou povrchovou vrstvou a meze únavy nezpevněné součásti. [16]

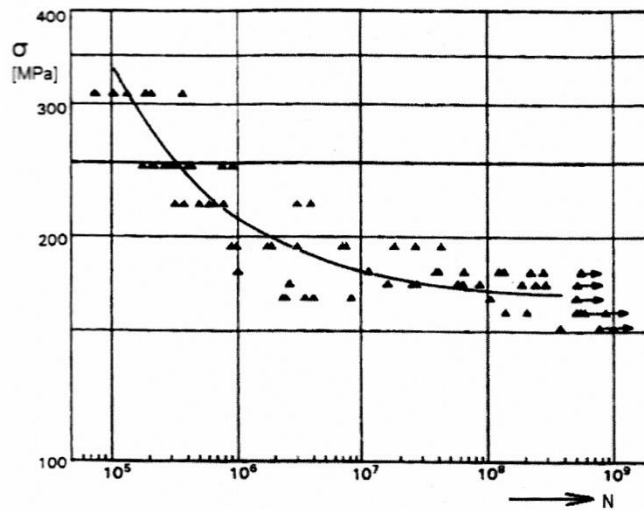
Koncentrátory napětí neboli konstrukční vruby také velmi výrazně ovlivňují mez únavy. Za vruby se považují jakékoliv náhlé změny tvaru součásti, například zápichy, osazení nebo otvory. V jejich okolí se mění průběh napětí – dochází k lokálnímu zvýšení, tedy koncentraci. Čím je vrub ostřejší, tím je špička napětí vyšší, a hrozí větší nebezpečí vzniku trhlin. Zajímavé je, že špičky napětí a jejich vlivy se dají částečně eliminovat přidáním dalších – odlehčovacích – vrubů na vhodná místa. [16]

Vliv vrubu na mez únavy představuje vrubový součinitel β [-], někdy označován jako součinitel koncentrace napětí. Je dán podílem meze únavy součásti bez vrubu a meze únavy součásti s vrubem. Závisí na tvaru a rozměrech součásti a vrubu, na způsobu namáhání, vlastnostech materiálu, velikosti a gradientu napětí a na charakteru napjatosti v místě vrubu. [16; 17]

Mezi další faktory patří například teplota okolí, druh okolního prostředí, způsob namáhání, frekvence zatěžování, asymetrie zátěžného cyklu, homogenita materiálu a další. [16; 17]

2.3.5 Zkoušení únavy materiálu

Únavové zkoušky se nejčastěji provádějí za účelem naměření Wöhlerovy křivky. Přestože je zkoušen stejný materiál za stejných podmínek, jsou naměřené veličiny rozptýleny, jak je znázorněno na Obr. 2.23. Je to způsobeno tím, že při každé zkoušce vznikne trhlinka v jiném čase a šíří se jinou rychlostí. Výsledky zkoušek je proto nutné stanovovat na základě co nejvyššího počtu odzkoušených vzorků. [16]



Obr. 2.23 - Rozptyl hodnot meze únavy [16]

3 Experimentální část

Experimentální část byla zaměřena na posouzení vlivu hodnoty vneseného tepla při svařování na únavovou životnost svarových spojů. Hodnota vneseného tepla je dána procesními parametry (svařovací proud, napětí, rychlost svařování), a má tedy přímý vliv jak na geometrii svarové lázně, tak také na velikost a strukturu TOO. Změny, k nimž dochází v TOO svarů, mají výrazný vliv na hodnoty meze kluzu R_e , meze pevnosti R_m , na homogenní tažnost A_g a zejména na hodnotu nárazová práce KV_2 . Hlavním cílem této práce je posouzení, zda (a případně také jak) se projeví rozdílná hodnota vneseného tepla na změně únavové životnosti svarových spojů z jemnozrnné oceli S460MC.

3.1 Příprava vzorků

3.1.1 Jemnozrnná ocel S460MC

Pro označování oceli S460MC je užitá norma ČSN EN 10027-1, kterou jsou udávány značky ocelí na základě jejich mechanických a fyzikálních vlastností a použití. Značky se skládají ze 4 (případně pouze 3) skupin znaků. První skupinu tvoří velká písmena, která charakterizují použití oceli. V našem případě písmeno S znamená, že se jedná o konstrukční ocel. Druhá skupina je tvořena číslicemi, jejichž význam závisí na první skupině. Pro konstrukční oceli tyto číslice udávají minimální mez kluzu v jednotkách megapascal, v našem případě tedy 460 MPa. Význam třetí skupiny znaků opět závisí na první, obecně ale udává dodatečné vlastnosti. U námi použité oceli písmeno M symbolizuje termomechanické válcování a písmeno C symbolizuje zvláštní tvařitelnost za studena. Případná čtvrtá skupina znaků blíže specifikuje použití konkrétní oceli. [21]

Jemnozrnné oceli S460MC jsou tvořeny jemnou feriticko-perlitickou strukturou a jsou vhodné pro konstrukční použití (nosníky), výrobu ohýbaných profilů a součástí energetických, přepravních a zvedacích zařízení. V rámci předchozích výzkumů byly při běžné pokojové teplotě (23°C) a průměru vzorku 7 mm zjištěny následující přibližné hodnoty mechanických vlastností [22]:

Mez kluzu R_e:	540 MPa
Mez pevnosti R_m:	630 MPa
Homogenní tažnost A_g:	13,15%

Chemické složení oceli S460MC, které bylo zjištěno pomocí spektrometru Q4 Tasman, zobrazuje Tab. 3.1.

Tab. 3.1 - Chemické složení oceli S460MC [22]

C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Mo [%]	Ni [%]
0,072	0,012	1,324	0,031	0,008	0,011	0,002	0,006
Cu [%]	Al [%]	Ti [%]	N [%]	Nb [%]	V [%]	W [%]	Fe [%]
0,020	0,031	0,004	0,006	0,051	0,080	0,039	zbytek

3.1.2 Polotovary pro svařování

Pásky základního materiálu o tloušťce 10 mm byly nařezány na stojiny o rozměrech 110x300 a pásnice o rozměrech 200x300 mm. V místech budoucích svarů byly polotovary řádně očištěny a následně pomocí metody TIG nabodovány ve vzájemně kolmé poloze, která je znázorněna na Obr. 3.1.



Obr. 3.1 - Vzájemné ustavení stojiny a pásnice

3.2 Svařování

Proces svařování byl prováděn za použití následujícího vybavení dílny a laboratoře KSP TU v Liberci:

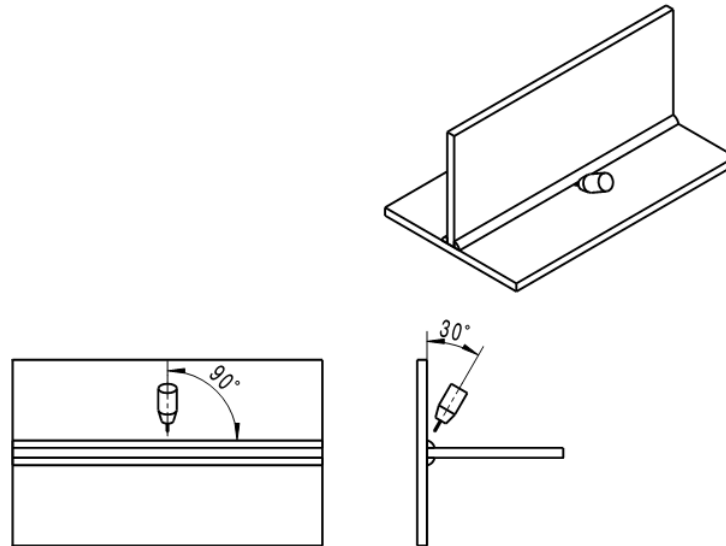
Svařovací zařízení: MIGATRONIC BDH Puls Sync 550 + lineární automat

Metoda svařování: MAG

Přídavný materiál: OK Autrod 12.51; průměr drátu 1,2 mm

Ochranný plyn: M21 (ISO 14175) - 82/18 Ar/CO₂; průtok 15 l.min⁻¹

Svařovací hubice byla při procesu nastavena tak, aby její osa svírala s pásnicí úhel 30° a přitom bylo využito vertikální svařování v poloze PA. Nastavení svařovací hubice vůči svařovanému materiálu je schematicky vyobrazeno na Obr. 3.2. Na Obr. 3.3 je vyfocený posuvný lineární automat (v popředí) a svařovací zdroj MIGATRONIC (v pozadí).



Obr. 3.2 - Ustavení svařovací hubice vůči svařenci [23]



Obr. 3.3 - Posuvné a svařovací zařízení

3.2.1 Svařovací parametry

Při provádění experimentu bylo navrženo a testováno celkem pět svařenců, do kterých bylo vnášeno různě velké měrné teplo. Jeho teoretická velikost byla odstupňována přibližně stejným krokem v rozmezí od 8 kJ.cm^{-1} do 14 kJ.cm^{-1} . Konkrétní hodnoty (bez zanesení účinnosti přenosu tepla, jejíž hodnota byla u všech vzorků uvažována 84%) jsou uvedeny v Tab. 3.2 až Tab. 3.6. V každé z tabulek jsou uvedeny jak nastavované parametry navržené teoreticky, tak skutečně změřené procesní parametry pro obě housenky.

Změna měrného vneseného tepla pro každý svar byla zajištěna rozdílnými svařovacími parametry, konkrétně svařovacím proudem a svařovací rychlostí. Proces svařování probíhal v synergickém režimu, hodnoty rychlosti podávání drátu a svařovacího napětí byly tedy automaticky upravovány dle délky oblouku. Za účelem monitorizace skutečných svařovacích parametrů byl využit software WeldMonitor.

Tab. 3.2 - Svařovací parametry prvního svařence

SVAR 1, HOUSENKA 1		
	Svařovací proud I [A]	Rychlost svařování v_s [m.min ⁻¹]
NASTAVENÉ PARAMETRY	260	0,51

SKUTEČNÉ PARAMETRY:

Ef. hodnota svařovacího proudu:	264,1	A
Rychlost svařování:	0,5	m.min ⁻¹
Vzdálenost kontaktní špičky:	15	mm
Skutečná délka svaru:	207	mm
Ef. hodnota svařovacího napětí:	25,5	V
Měrné vnesené teplo:	8,08	kJ.cm⁻¹
Způsob přenosu kovu v oblouku:	přechodový	

SVAR 1, HOUSENKA 2		
	Svařovací proud I [A]	Rychlost svařování v_s [m.min ⁻¹]
NASTAVENÉ PARAMETRY	260	0,51

SKUTEČNÉ PARAMETRY:

Ef. hodnota svařovacího proudu:	264,4	A
Rychlost svařování:	0,48	m.min ⁻¹
Vzdálenost kontaktní špičky:	14	mm
Skutečná délka svaru:	218	mm
Ef. hodnota svařovacího napětí:	25,5	V
Měrné vnesené teplo:	8,43	kJ.cm⁻¹
Způsob přenosu kovu v oblouku:	přechodový	

Tab. 3.3 - Svařovací parametry druhého svařence

SVAR 2, HOUSENKA 1		
	Svařovací proud I [A]	Rychlost svařování v_s [m.min ⁻¹]
NASTAVENÉ PARAMETRY	300	0,6

SKUTEČNÉ PARAMETRY:

Ef. hodnota svařovacího proudu:	324,1	A
Rychlost svařování:	0,59	m.min ⁻¹
Vzdálenost kontaktní špičky:	15	mm
Skutečná délka svaru:	220	mm
Ef. hodnota svařovacího napětí:	27,7	V
Měrné vnesené teplo:	9,13	kJ.cm⁻¹
Způsob přenosu kovu v oblouku:	bezzkratový	

SVAR 2, HOUSENKA 2		
	Svařovací proud I [A]	Rychlost svařování v_s [m.min ⁻¹]
NASTAVENÉ PARAMETRY	300	0,6

SKUTEČNÉ PARAMETRY:

Ef. hodnota svařovacího proudu:	321,3	A
Rychlost svařování:	0,6	m.min ⁻¹
Vzdálenost kontaktní špičky:	15	mm
Skutečná délka svaru:	220	mm
Ef. hodnota svařovacího napětí:	27,8	V
Měrné vnesené teplo:	8,93	kJ.cm⁻¹
Způsob přenosu kovu v oblouku:	bezzkratový	

Tab. 3.4 - Svařovací parametry třetího svařence

SVAR 3, HOUSENKA 1		
	Svařovací proud I [A]	Rychlost svařování v_s [m.min ⁻¹]
NASTAVENÉ PARAMETRY	260	0,4

SKUTEČNÉ PARAMETRY:

Ef. hodnota svařovacího proudu:	267,3	A
Rychlost svařování:	0,4	m.min ⁻¹
Vzdálenost kontaktní špičky:	15	mm
Skutečná délka svaru:	218	mm
Ef. hodnota svařovacího napětí:	25,5	V
Měrné vnesené teplo:	10,22	kJ.cm⁻¹
Způsob přenosu kovu v oblouku:	přechodový	

SVAR 3, HOUSENKA 2		
	Svařovací proud I [A]	Rychlost svařování v_s [m.min ⁻¹]
NASTAVENÉ PARAMETRY	260	0,4

SKUTEČNÉ PARAMETRY:

Ef. hodnota svařovacího proudu:	265,1	A
Rychlost svařování:	0,407	m.min ⁻¹
Vzdálenost kontaktní špičky:	15	mm
Skutečná délka svaru:	218	mm
Ef. hodnota svařovacího napětí:	25,6	V
Měrné vnesené teplo:	10,00	kJ.cm⁻¹
Způsob přenosu kovu v oblouku:	přechodový	

Tab. 3.5 - Svařovací parametry čtvrtého svařence

SVAR 4, HOUSENKA 1		
	Svařovací proud I [A]	Rychlost svařování v_s [m.min ⁻¹]
NASTAVENÉ PARAMETRY	240	0,3

SKUTEČNÉ PARAMETRY:

Ef. hodnota svařovacího proudu:	252,5	A
Rychlost svařování:	0,296	m.min ⁻¹
Vzdálenost kontaktní špičky:	14	mm
Skutečná délka svaru:	217	mm
Ef. hodnota svařovacího napětí:	23,1	V
Měrné vnesené teplo:	11,82	kJ.cm⁻¹
Způsob přenosu kovu v oblouku:	přechodový	

SVAR 4, HOUSENKA 2		
	Svařovací proud I [A]	Rychlost svařování v_s [m.min ⁻¹]
NASTAVENÉ PARAMETRY	240	0,3

SKUTEČNÉ PARAMETRY:

Ef. hodnota svařovacího proudu:	250,5	A
Rychlost svařování:	0,296	m.min ⁻¹
Vzdálenost kontaktní špičky:	14	mm
Skutečná délka svaru:	217	mm
Ef. hodnota svařovacího napětí:	23,2	V
Měrné vnesené teplo:	11,78	kJ.cm⁻¹
Způsob přenosu kovu v oblouku:	přechodový	

Tab. 3.6 - Svařovací parametry pátého svařence

SVAR 5, HOUSENKA 1		
	Svařovací proud I [A]	Rychlost svařování v_s [m.min ⁻¹]
NASTAVENÉ PARAMETRY	260	0,3

SKUTEČNÉ PARAMETRY:

Ef. hodnota svařovacího proudu:	267,4	A
Rychlost svařování:	0,291	m.min ⁻¹
Vzdálenost kontaktní špičky:	14	mm
Skutečná délka svaru:	221	mm
Ef. hodnota svařovacího napětí:	25,5	V
Měrné vnesené teplo:	14,06	kJ.cm⁻¹
Způsob přenosu kovu v oblouku:	přechodový	

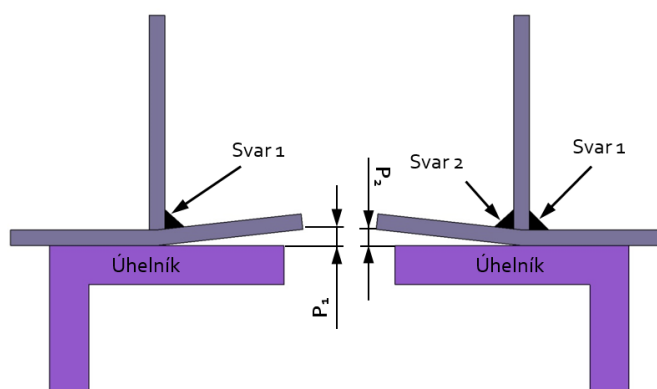
SVAR 5, HOUSENKA 2		
	Svařovací proud I [A]	Rychlost svařování v_s [m.min ⁻¹]
NASTAVENÉ PARAMETRY	260	0,3

SKUTEČNÉ PARAMETRY:

Ef. hodnota svařovacího proudu:	267,7	A
Rychlost svařování:	0,293	m.min ⁻¹
Vzdálenost kontaktní špičky:	14	mm
Skutečná délka svaru:	221	mm
Ef. hodnota svařovacího napětí:	25,6	V
Měrné vnesené teplo:	14,03	kJ.cm⁻¹
Způsob přenosu kovu v oblouku:	přechodový	

3.2.2 Deformace svařenců

Vlivem vnášení tepla do základního materiálu při procesu svařování dochází ke značné deformaci svarků. Jelikož byly svařené vzorky zatěžovány pouze ve směru pásnice, byla měřena pouze tato deformace (znázorněna na Obr. 3.4). První místo měření se nacházelo na počátku svarové housenky a každé další pak ve vzdálenosti 20 mm ve směru svařování. Změřené deformace jsou zaznamenány v Tab. 3.7 až Tab. 3.11.



Obr. 3.4 - Měření deformace pásnic [23]

Tab. 3.7 - Deformace pásnice prvního svařence

DEFORMACE PÁSNICE SVAŘENCE 1 ($Q_v= 8 \text{ kJ.cm}^{-1}$)			
Měření v místě	Vzdálenost od okraje [mm]	Deformace po housence 1 P1 [mm]	Deformace po housence 2 P2 [mm]
1	20	1,15	2,56
2	40	0,9	2,41
3	60	0,81	2,48
4	80	1,04	2,6
5	100	1,34	2,71
6	120	1,4	2,7
7	140	1,2	2,64
8	160	1,45	2,65
9	180	1,31	2,8
10	200	1,26	2,9
11	220	1,34	2,94
12	240	1,6	3,09
Průměrná deformace [mm]:			2,71

Tab. 3.8 - Deformace pásnice druhého svařence

DEFORMACE PÁSNICE SVAŘENCE 2 ($Q_v= 9 \text{ kJ.cm}^{-1}$)			
Měření v místě	Vzdálenost od okraje [mm]	Deformace po housence 1 P1 [mm]	Deformace po housence 2 P2 [mm]
1	20	1,29	2,7
2	40	1,2	2,75
3	60	1,26	2,93
4	80	1,16	3,12
5	100	1,44	3,2
6	120	1,49	3,16
7	140	1,51	3,35
8	160	1,53	3,28
9	180	1,43	3,5
10	200	1,61	3,5
11	220	1,63	3,55
12	240	1,61	3,62
Průměrná deformace [mm]:			3,22

Tab. 3.9 - Deformace pásnice třetího svařence

DEFORMACE PÁSNICE SVAŘENCE 3 ($Q_v= 10 \text{ kJ.cm}^{-1}$)			
Měření v místě	Vzdálenost od okraje [mm]	Deformace po housence 1 P1 [mm]	Deformace po housence 2 P2 [mm]
1	20	1,79	2,63
2	40	1,35	2,94
3	60	1,23	3,06
4	80	1,25	3,02
5	100	1,27	3,1
6	120	1,29	3,09
7	140	1,33	3,2
8	160	1,32	3,3
9	180	1,39	3,28
10	200	1,39	3,33
11	220	1,48	3,38
12	240	1,53	3,5
Průměrná deformace [mm]:			3,15

Tab. 3.10 - Deformace pásnice čtvrtého svařence

DEFORMACE PÁSNICE SVAŘENCE 4 ($Q_v= 12 \text{ kJ.cm}^{-1}$)			
Měření v místě	Vzdálenost od okraje [mm]	Deformace po housence 1 P1 [mm]	Deformace po housence 2 P2 [mm]
1	20	1,3	2,78
2	40	1,32	2,88
3	60	1,32	3
4	80	1,33	2,95
5	100	1,41	3,04
6	120	1,57	3,13
7	140	1,47	3,1
8	160	1,51	3,28
9	180	1,69	3,37
10	200	1,75	3,25
11	220	1,71	3,27
12	240	1,69	3,35
Průměrná deformace [mm]:			3,12

Tab. 3.11 - Deformace pásnice pátého svařence

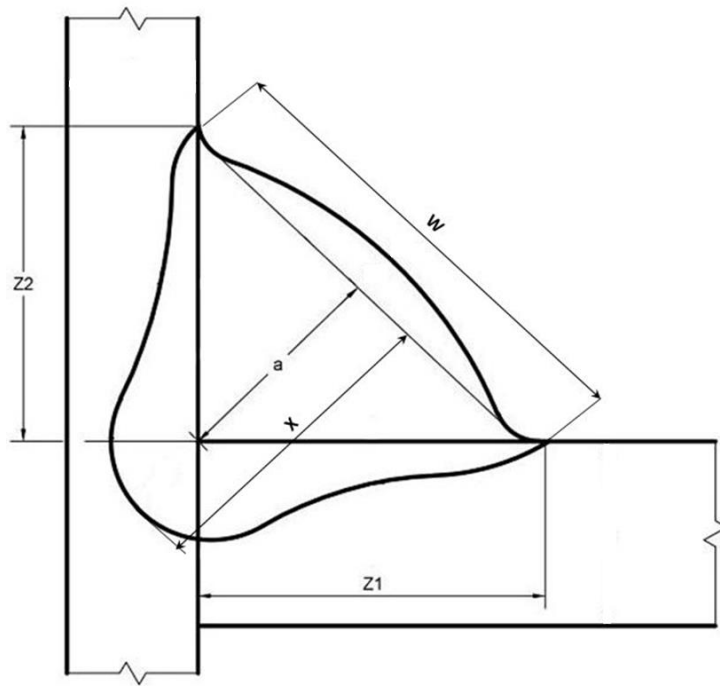
DEFORMACE PÁSNICE SVAŘENCE 5 ($Q_v = 14 \text{ kJ.cm}^{-1}$)			
Měření v místě	Vzdálenost od okraje [mm]	Deformace po housence 1 P1 [mm]	Deformace po housence 2 P2 [mm]
1	20	1,29	3,32
2	40	1,2	3,11
3	60	1,18	3,33
4	80	1,2	3,5
5	100	1,29	3,73
6	120	1,37	3,73
7	140	1,44	3,8
8	160	1,53	3,81
9	180	1,54	3,87
10	200	1,45	3,73
11	220	1,51	3,75
12	240	1,43	3,66
13	260	1,67	3,52
Průměrná deformace [mm]:			3,61

3.3 Metalografické vyhodnocení svarů

Za účelem porovnání vlivu hodnoty vneseného měrného tepla na geometrii svarové lázně byly provedeny metalografické výbrusy. V oblasti ustáleného svařování (konstantní průřez svaru) byl odříznut z každého svařence jeden vzorek, který byl následně pomocí lisu BUEHLER SimpliMet 1000 zalisován do hmoty Polyfast. Takto připravené vzorky byly následně broušeny, leštěny a nakonec leptány leptadlem Nital (3% roztok HNO_3 v lihu), které zajistilo dobrou viditelnost svarové lázně i tepelně ovlivněné oblasti. Výbrusy následně byly nafoceny a geometricky vyhodnoceny pomocí software NIS-Elements AR.

3.3.1 Geometrie svarové lázně

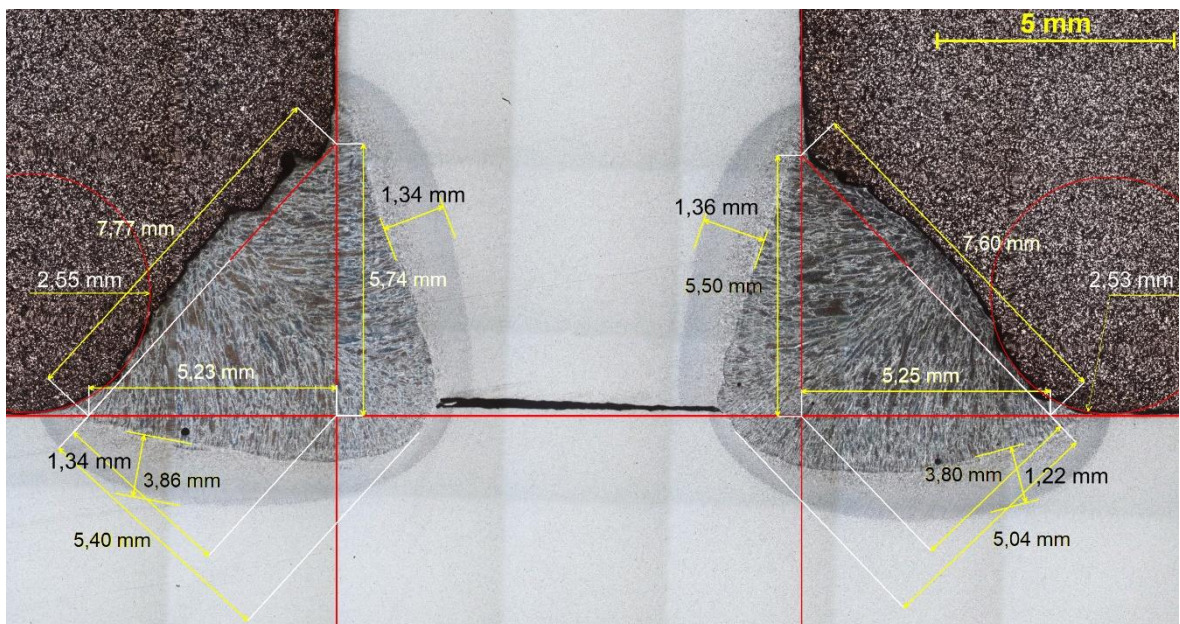
Měřené rozměry průřezu svarové lázně jsou patrné ze schematického Obr. 3.5. Mimo tyto parametry byla měřena také šířka tepelně ovlivněné oblasti (jejíž hodnota na pásnici bude označována **TOOp** a hodnota na stojině **TOOs**) a poloměr přechodu mezi základním materiálem a svarem na straně pásnice. Nejdůležitějším z geometrických parametrů je účinná výška svaru **a**, která je důležitá zejména pro návrh svarových spojů a jejich značení. Maximální hloubka svaru **x** a šířka svaru **w** se pak používají především pro popis zdroje tepla při simulačních výpočtech. Pomocí parametrů **z1** a **z2** se definuje směr a velikost vyosení svarového spoje od ideální polohy. [10]



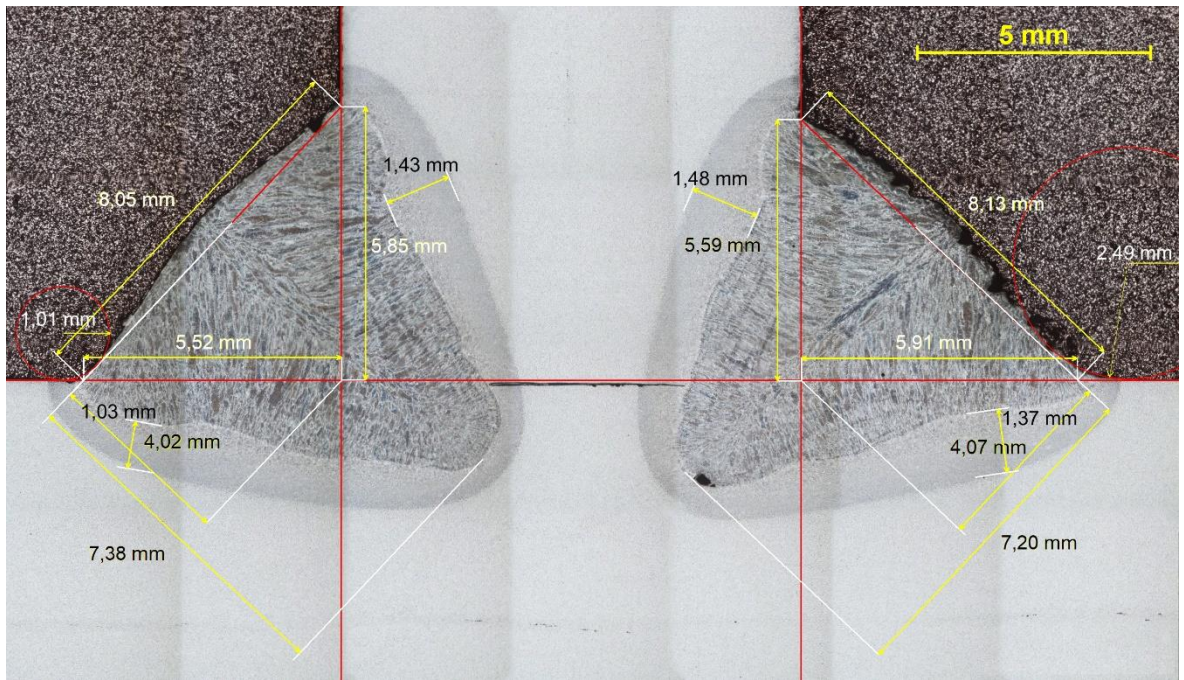
Obr. 3.5 - Měřené geometrické parametry svarové lázně [23]

3.3.2 Zpracované metalografické výbrusy

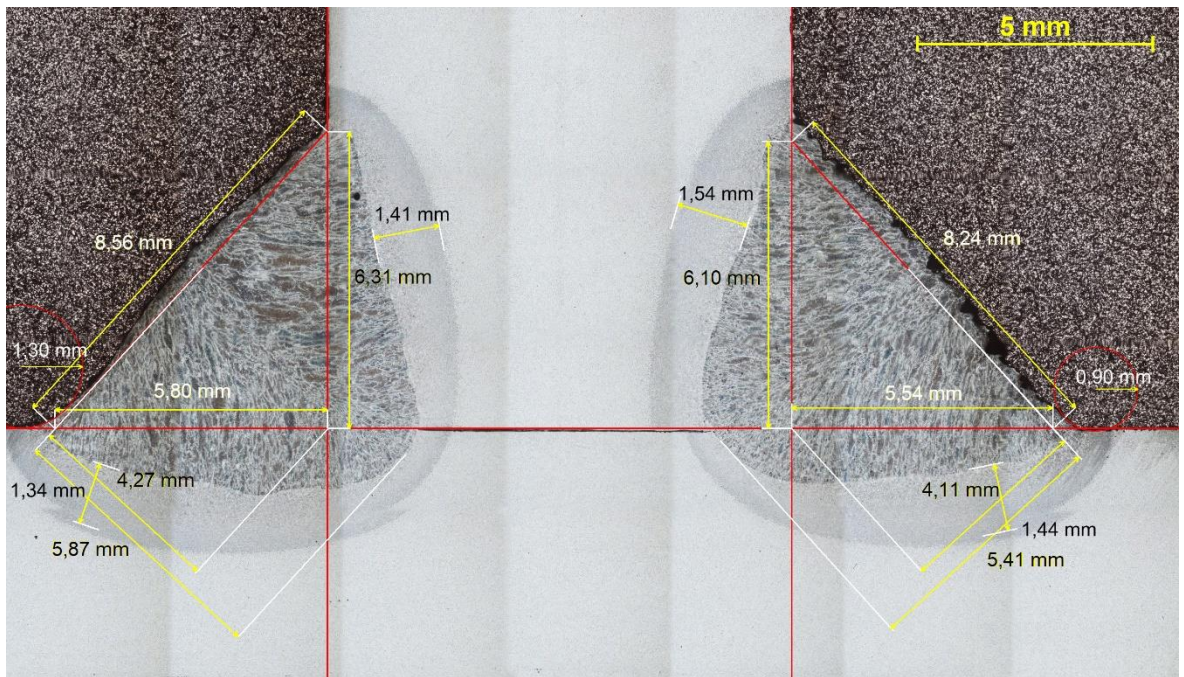
Na Obr. 3.6 až Obr. 3.10 jsou zpracované metalografické výbrusy se změřenými geometrickými parametry pro hodnoty měrného vneseného tepla $Q_v = 8; 9; 10; 12$ a $14 \text{ kJ}\cdot\text{cm}^{-1}$. Pro lepší přehlednost jsou pak všechny změřené geometrické parametry shrnuty spolu s vneseným teplem v Tab. 3.12.



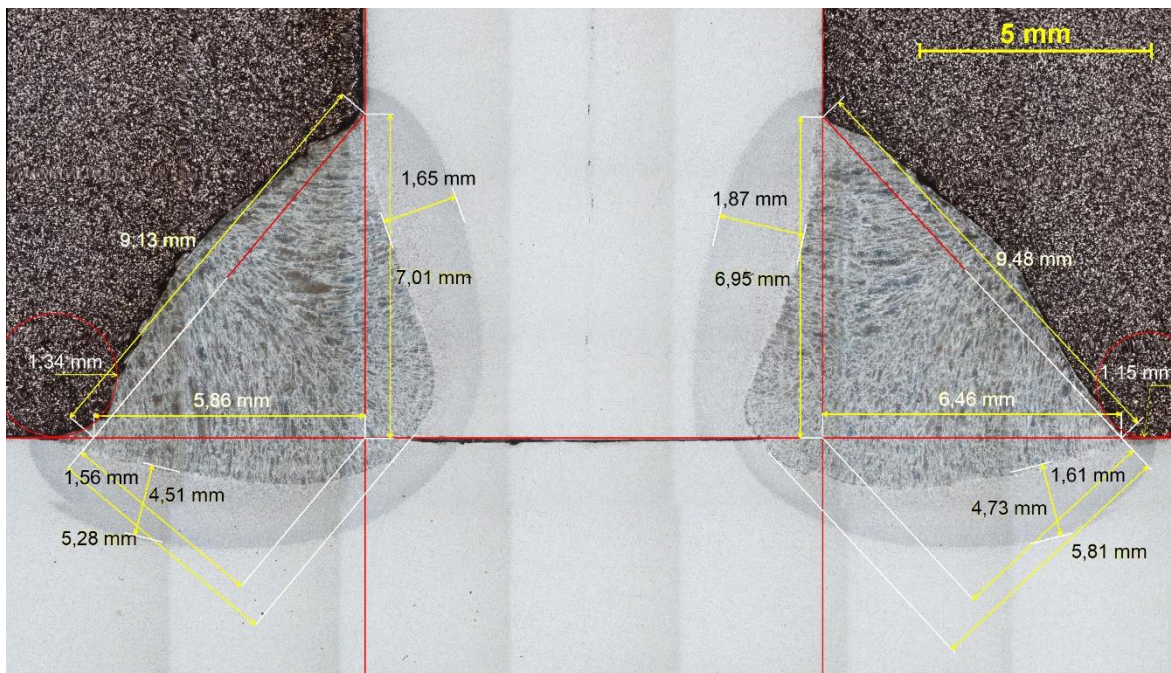
Obr. 3.6 - Metalografický výbrus prvního svaru ($Q_v = 8 \text{ kJ}\cdot\text{cm}^{-1}$) se změřenými geometrickými parametry, první housenka vpravo, druhá vlevo



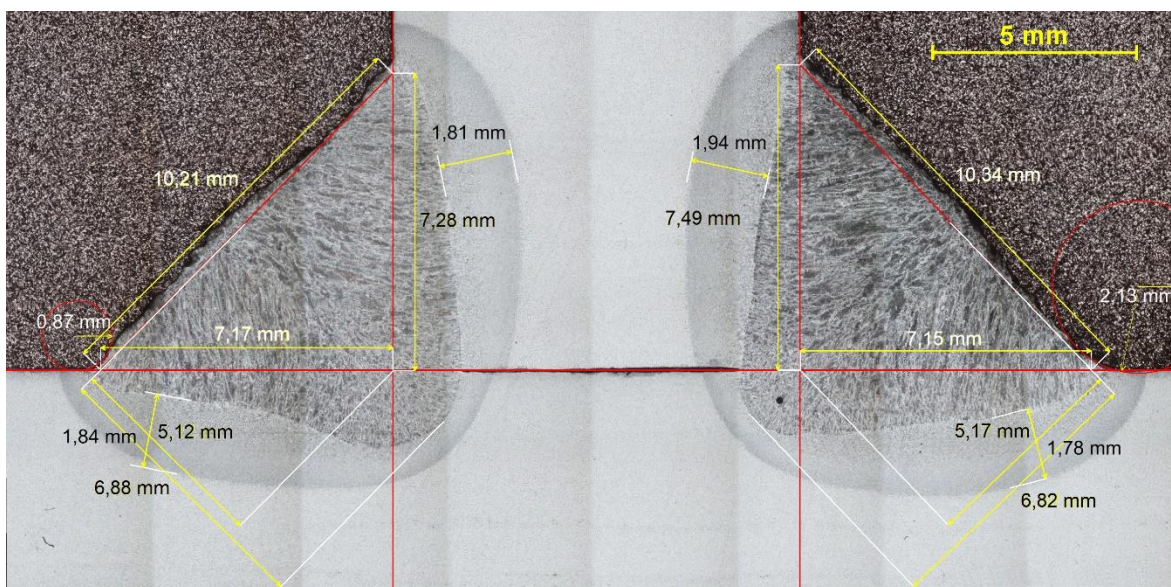
Obr. 3.7 - Metalografický výbrus druhého svaru ($Q_v = 9 \text{ kJ.cm}^{-1}$) se změřenými geometrickými parametry, první housenka vpravo, druhá vlevo



Obr. 3.8 - Metalografický výbrus třetího svaru ($Q_v = 10 \text{ kJ.cm}^{-1}$) se změřenými geometrickými parametry, první housenka vpravo, druhá vlevo



Obr. 3.9 - Metalografický výbrus čtvrtého svaru ($Q_v = 12 \text{ kJ.cm}^{-1}$) se změřenými geometrickými parametry, první housenka vpravo, druhá vlevo



Obr. 3.10 - Metalografický výbrus pátého svaru ($Q_v = 14 \text{ kJ.cm}^{-1}$) se změřenými geometrickými parametry, první housenka vlevo, druhá vpravo

Tab. 3.12 - Shrnutí naměřených geometrických parametrů

	Vnesené teplo [kJ.cm ⁻¹]	Měřený parametr [mm]							
		a	x	w	z1	z2	TOOs	TOOp	R
S1H1	8,08	3,80	5,04	7,60	5,50	5,25	1,36	1,22	2,53
S1H2	8,43	3,86	5,40	7,77	5,74	5,23	1,34	1,34	2,55
S2H1	9,13	4,07	7,20	8,13	5,59	5,91	1,48	1,37	2,49
S2H2	8,93	4,02	7,38	8,05	5,85	5,52	1,43	1,03	1,01
S3H1	10,22	4,11	5,41	8,24	6,10	5,54	1,54	1,44	0,90
S3H2	10,00	4,27	5,87	8,56	6,31	5,80	1,41	1,34	1,30
S4H1	11,82	4,73	5,81	9,48	6,95	6,46	1,87	1,61	1,15
S4H2	11,78	4,51	5,28	9,13	7,01	5,86	1,65	1,56	1,34
S5H1	14,06	5,12	6,88	10,21	7,28	7,17	1,81	1,84	0,87
S5H2	14,03	5,17	6,82	10,34	7,49	7,15	1,94	1,78	2,13

3.4 Měření Wöhlerových křivek svarových spojů

Jak již bylo dříve zmíněno, vlivem vnášeného tepla kolem svaru vzniká tepelně ovlivněná oblast, ve které hrubnou původně jemná zrna. Díky tomuto hrubnutí zrn materiál v TOO ztrácí mechanické vlastnosti a snižuje se jeho houževnatost. Cílem této části bylo zjistit, jak moc klesá únavová životnost spolu s rostoucím vnášeným měrným teplem do materiálu při svařování.

3.4.1 Příprava vzorků pro cyklické namáhání

Pro testování únavové životnosti a sestavení Wöhlerovy křivky je zapotřebí dostatečné množství vzorků. Za tímto účelem byly svařence v dostatečné vzdálenosti od počátku svaru rozřezány v rovinách kolmých na trajektorii svarové housenky po 10 mm. Pro jednodušší manipulaci byly vzorky zbaveny stojin ve vzdálenosti 5 až 10 mm od hrany svaru. Povrch ploch, které vznikly po rozřezání svařenců na vzorky, vykazoval relativně velikou drsnost. Aby se minimalizoval negativní účinek hrubého povrchu (vrubového účinku) na únavovou životnost, byly tyto plochy následně broušeny na magnetické brusce, jak lze vidět na Obr. 3.11 a Obr. 3.12. Tím se také docílilo stejné tloušťky ve všech místech vzorku.



Obr. 3.11 - Vzorek po rozřezání svařence



Obr. 3.12 - Vzorek po obroušení ploch

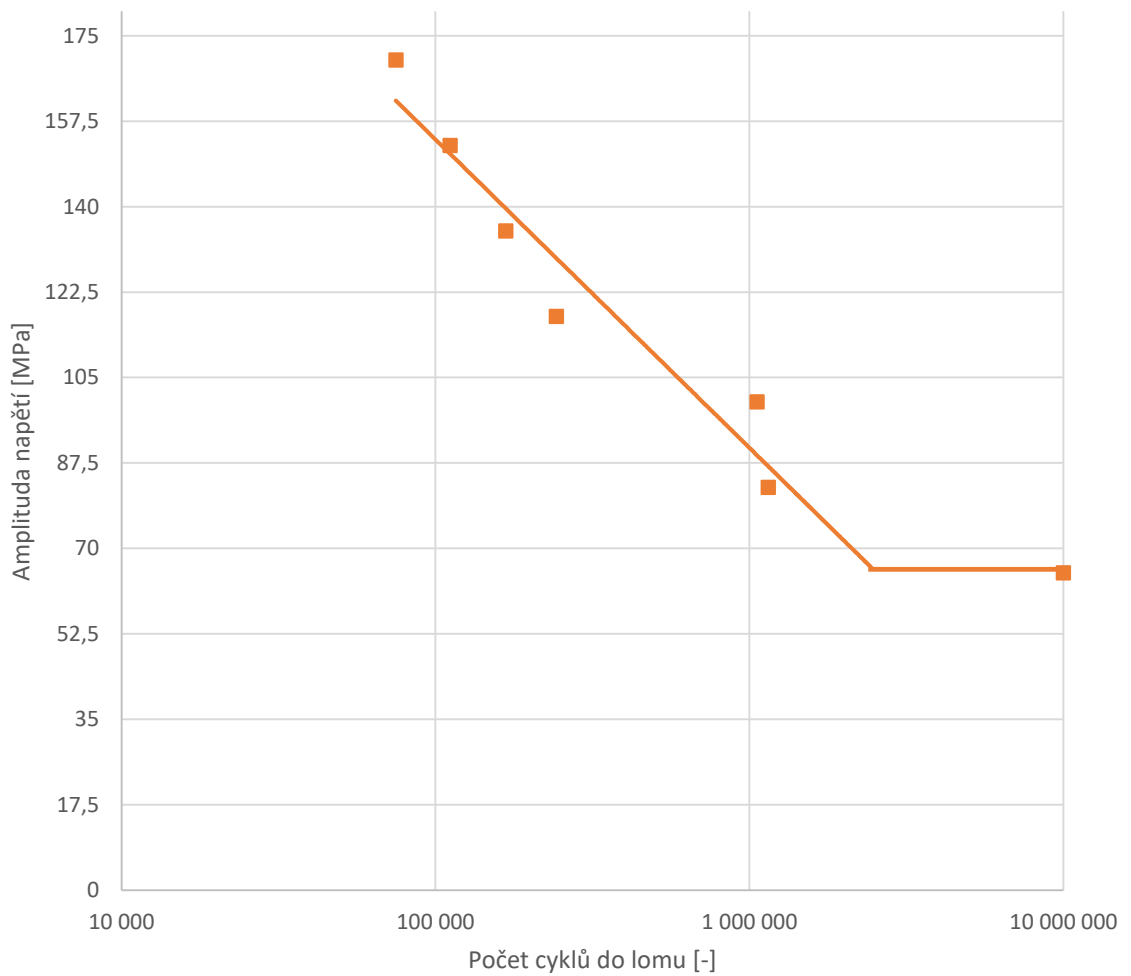
3.4.2 Testování

Pro simulaci cyklického namáhání bylo využito servo-hydraulické zkušební zařízení INOVA FU-O-1600-V2 s maximální dosažitelnou silou 100 kN v režimu řízené síly. Testování probíhalo s koeficientem asymetrie cyklu $R = -1$ na sedmi úrovních napětí: 65; 82,5; 100; 117,5; 135; 152,5 a 170 MPa, kromě čtvrtého svařence, u kterého bylo dosaženo 10^7 cyklů bez porušení už při hodnotě 82,5 MPa, a třetího svařence, který dosáhl tohoto počtu cyklů bez porušení až při hodnotě 60 MPa. Počty cyklů, které vzorky vydržely do únavového lomu, jsou uvedeny v Tab. 3.13 až Tab. 3.17. Výsledky tohoto měření jsou pak graficky zpracovány na Obr. 3.13 až Obr. 3.17 ve formě Wöhlerových křivek s lineární aproximací v oblasti časové pevnosti.

Tab. 3.13 - Počet zaznamenaných cyklů do únavového lomu v závislosti na amplitudě napětí u prvního svařence

SVAR 1 ($Q_v = 8 \text{ kJ.cm}^{-1}$)		
Vzorek č.	Amplituda napětí σ_a [MPa]	Počet cyklů do lomu N
1	170	74 840
2	152,5	111 389
3	135	167 536
4	117,5	242 359
5	100	1 057 662
6	82,5	1 147 041
7	65	$>10^7$

Wöhlerova křivka prvního svařence ($Q_v = 8 \text{ kJ.cm}^{-1}$)

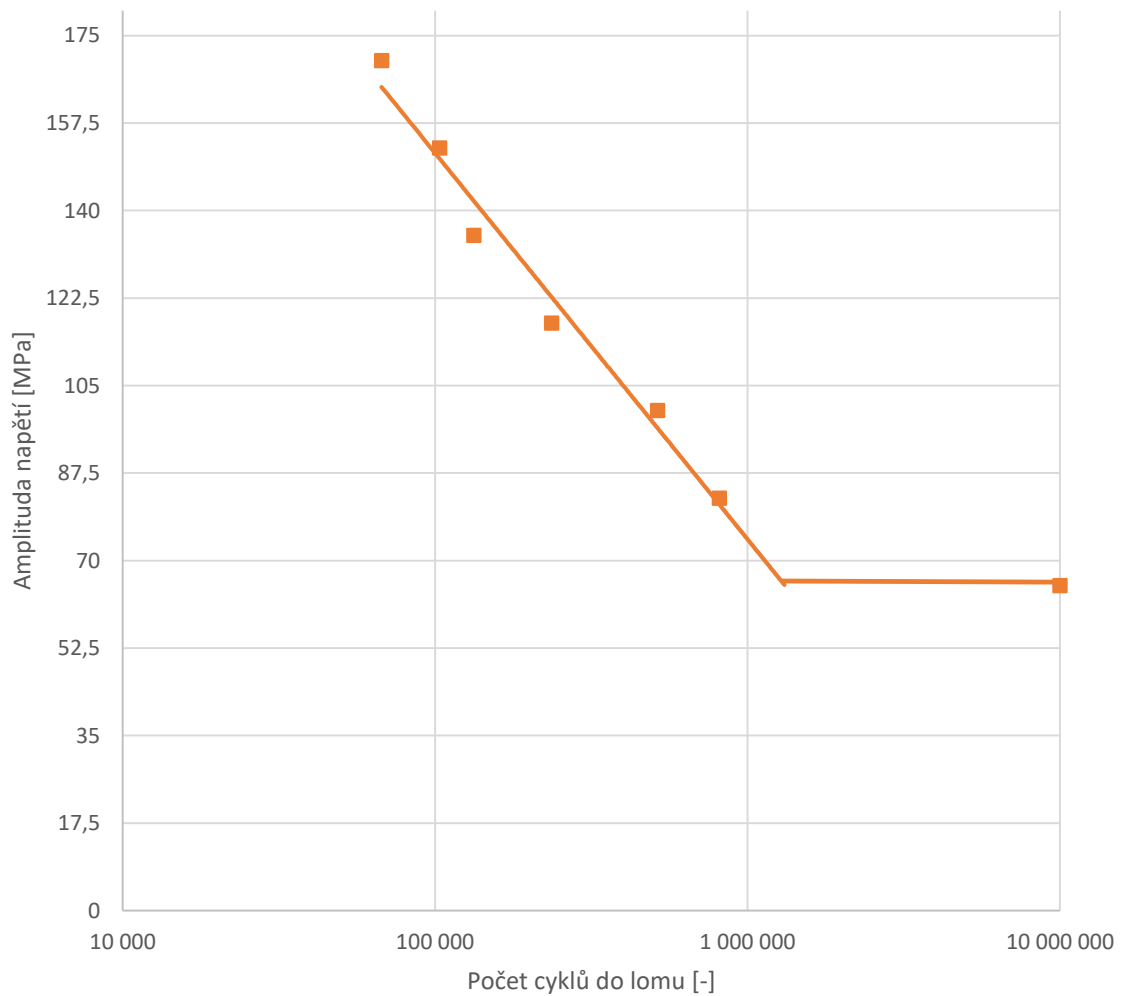


Obr. 3.13 - Wöhlerova křivka prvního svařence

Tab. 3.14 - Počet zaznamenaných cyklů do únavového lomu v závislosti na amplitudě napětí u druhého svařence

SVAR 2 ($Q_v = 9 \text{ kJ.cm}^{-1}$)		
Vzorek č.	Amplituda napětí σ_a [MPa]	Počet cyklů do lomu N
1	170	67 417
2	152,5	103 284
3	135	132 982
4	117,5	236 172
5	100	515 809
6	82,5	813 423
7	65	$>10^7$

Wöhlerova křivka druhého svařence ($Q_v = 9 \text{ kJ.cm}^{-1}$)

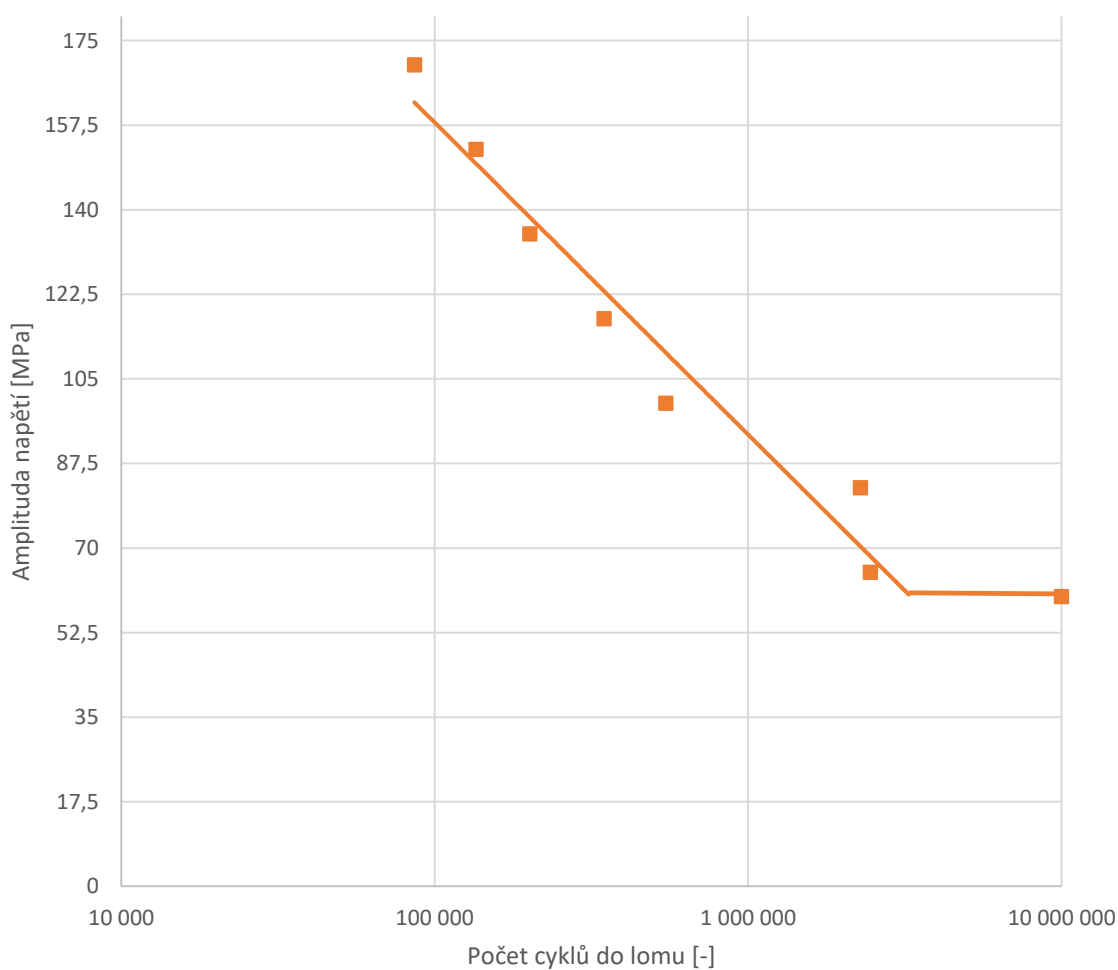


Obr. 3.14 - Wöhlerova křivka druhého svařence

Tab. 3.15 - Počet zaznamenaných cyklů do únavového lomu v závislosti na amplitudě napětí u třetího svařence

SVAR 3 ($Q_v = 10 \text{ kJ.cm}^{-1}$)		
Vzorek č.	Amplituda napětí σ_a [MPa]	Počet cyklů do lomu N
1	170	86 153
2	152,5	135 381
3	135	201 117
4	117,5	346 740
5	100	546 096
6	82,5	2 282 815
7	65	2 451 977
8	60	$>10^7$

Wöhlerova křivka třetího svařence ($Q_v = 10 \text{ kJ.cm}^{-1}$)

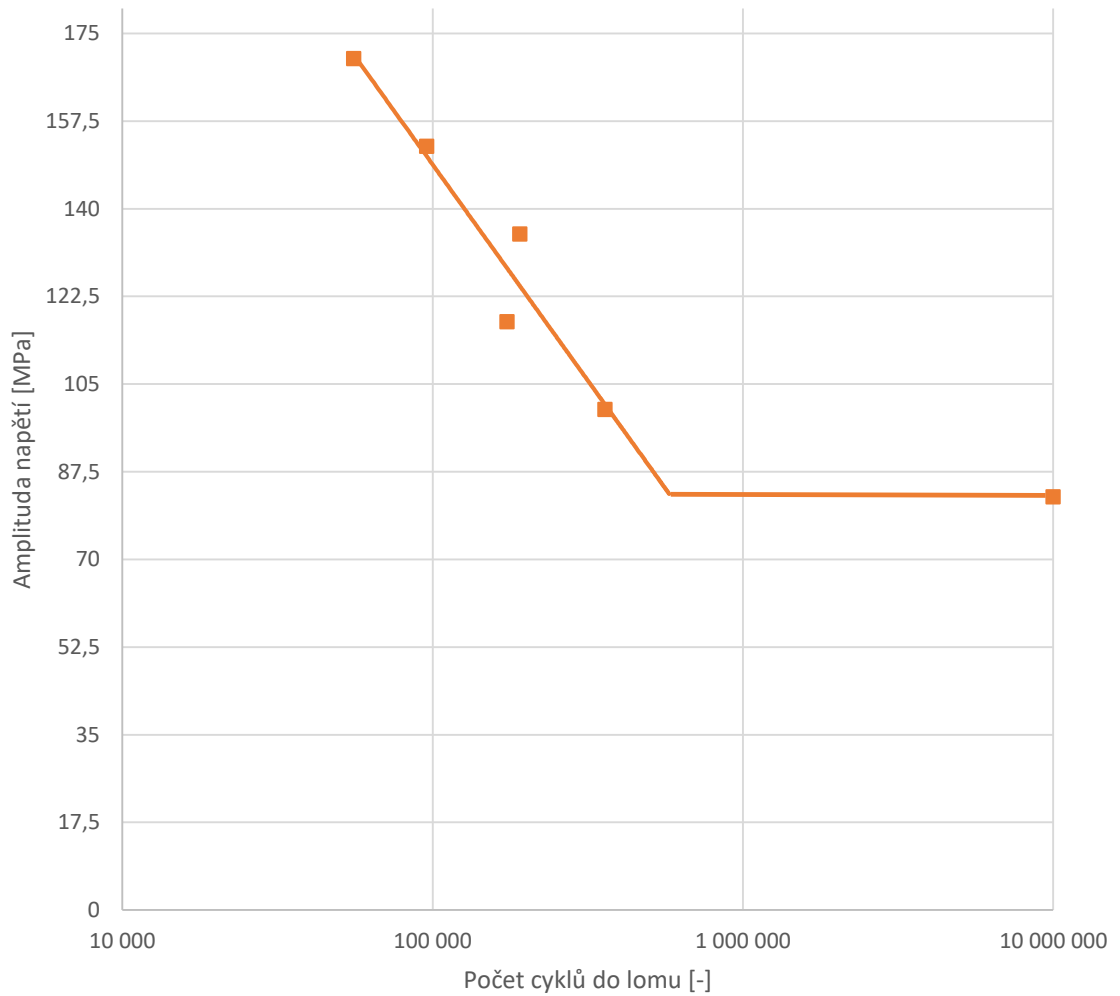


Obr. 3.15 - Wöhlerova křivka třetího svařence

Tab. 3.16 - Počet zaznamenaných cyklů do únavového lomu v závislosti na amplitudě napětí u čtvrtého svařence

SVAR 4 ($Q_v = 12 \text{ kJ.cm}^{-1}$)		
Vzorek č.	Amplituda napětí σ_a [MPa]	Počet cyklů do lomu N
1	170	55 668
2	152,5	95 676
3	135	190 961
4	117,5	173 615
5	100	359 291
6	82,5	$>10^7$

Wöhlerova křivka čtvrtého svařence ($Q_v = 12 \text{ kJ.cm}^{-1}$)

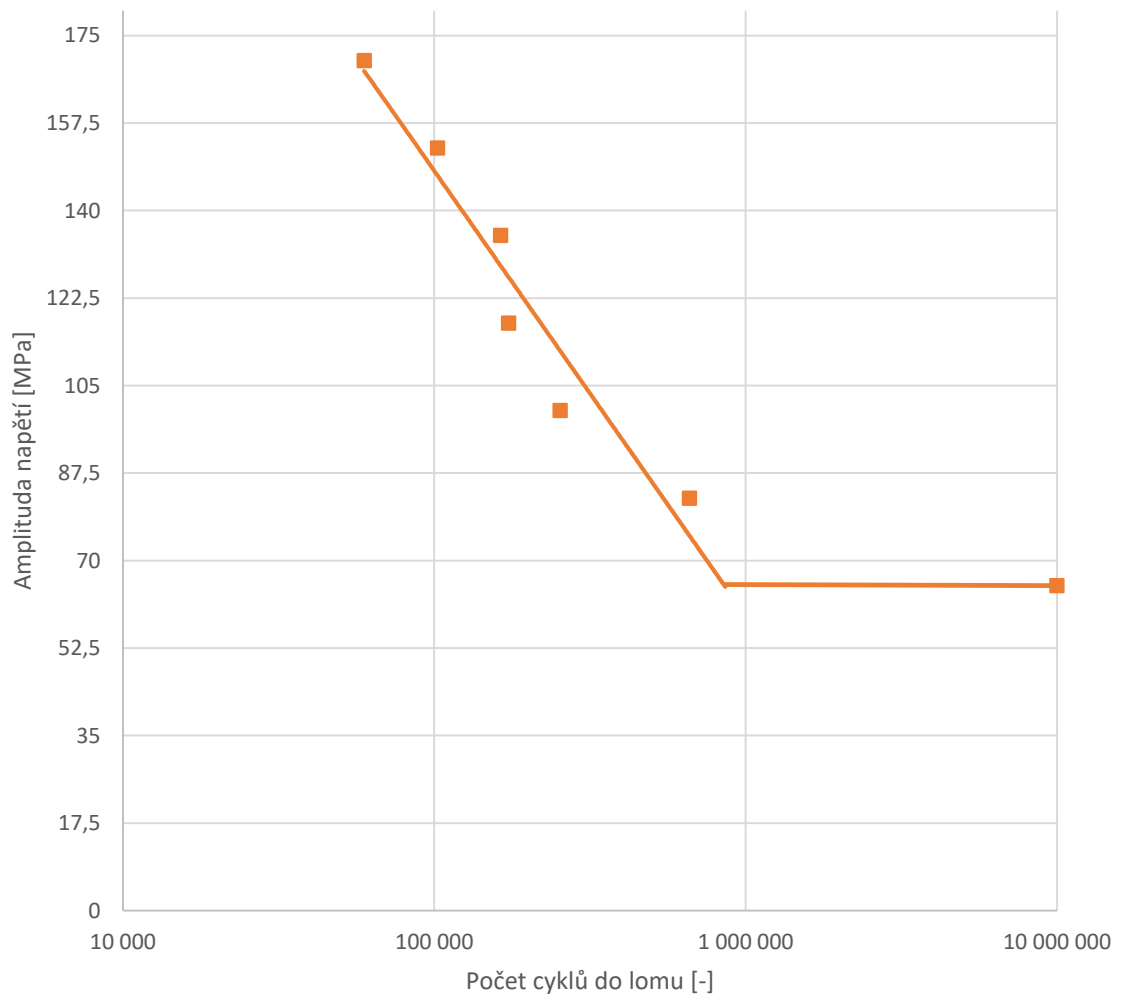


Obr. 3.16 - Wöhlerova křivka čtvrtého svařence

Tab. 3.17 - Počet zaznamenaných cyklů do únavového lomu v závislosti na amplitudě napětí u pátého svařence

SVAR 5 ($Q_v = 14 \text{ kJ.cm}^{-1}$)		
Vzorek č.	Amplituda napětí σ_a [MPa]	Počet cyklů do lomu N
1	170	59 627
2	152,5	102 477
3	135	163 448
4	117,5	173 397
5	100	253 974
6	82,5	660 143
7	65	$>10^7$

Wöhlerova křivka pátého svařence ($Q_v = 14 \text{ kJ.cm}^{-1}$)

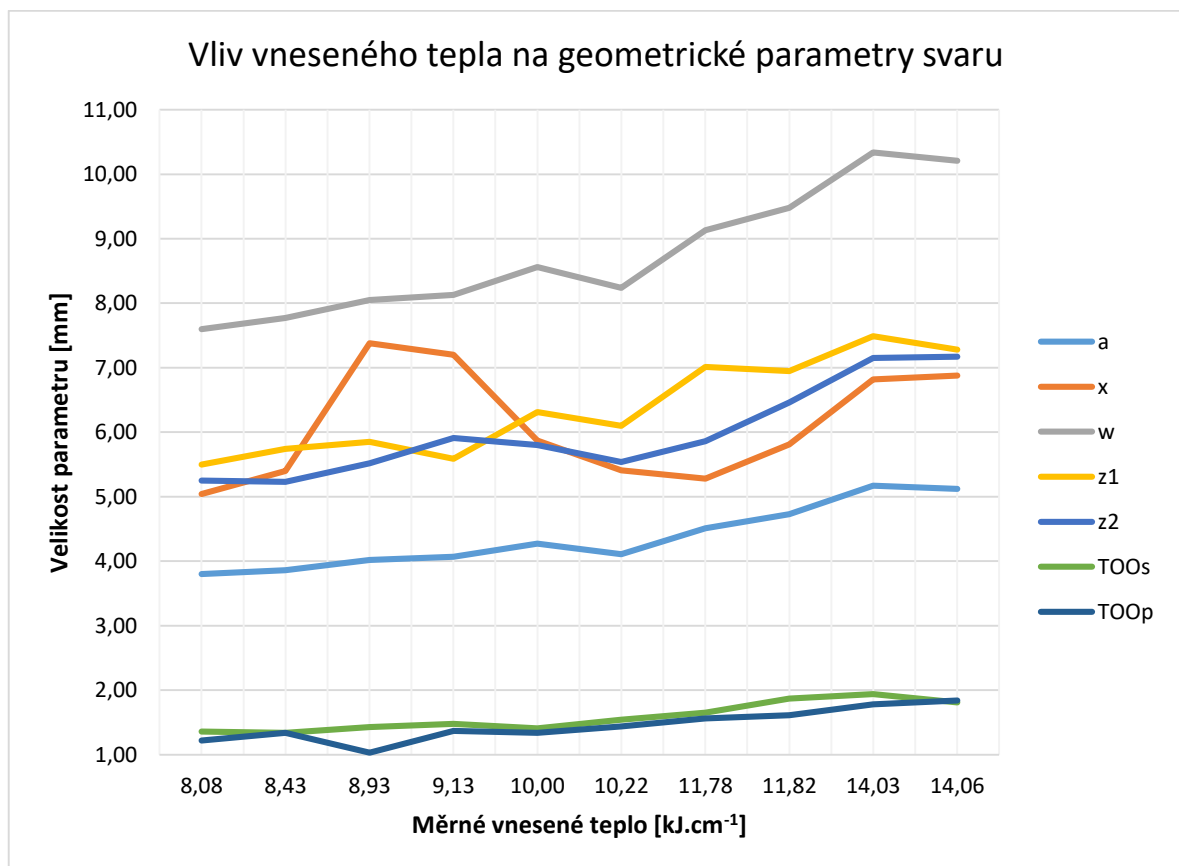


Obr. 3.17 - Wöhlerova křivka pátého svařence

4 Vyhodnocení a diskuse výsledků

4.1 Vyhodnocení svarů a jejich deformací

S větší hodnotou vneseného tepla se zvětšuje objem nataveného materiálu, roste odtavovací výkon, a tím tedy i plocha průřezu svarového spoje. Dokazují to snímky metalografických výbrusů spolu s Tab. 3.12, která shrnuje naměřené geometrické parametry, a také Obr. 4.1, kde je graficky znázorněno zvětšování plochy tvořené svarovým kovem spolu s rostoucím měrným vneseným teplem. Při porovnávání dvou vzorků s různým vneseným teplem je ale vhodné, aby byly zohledněny všechny rozměry svarové lázně, nikoli pouze některé z nich. Na tento fakt poukazuje například maximální hloubka svaru x , která u druhého svařence vlivem většího svařovacího proudu výrazně stoupla oproti ostatním vzorkům.

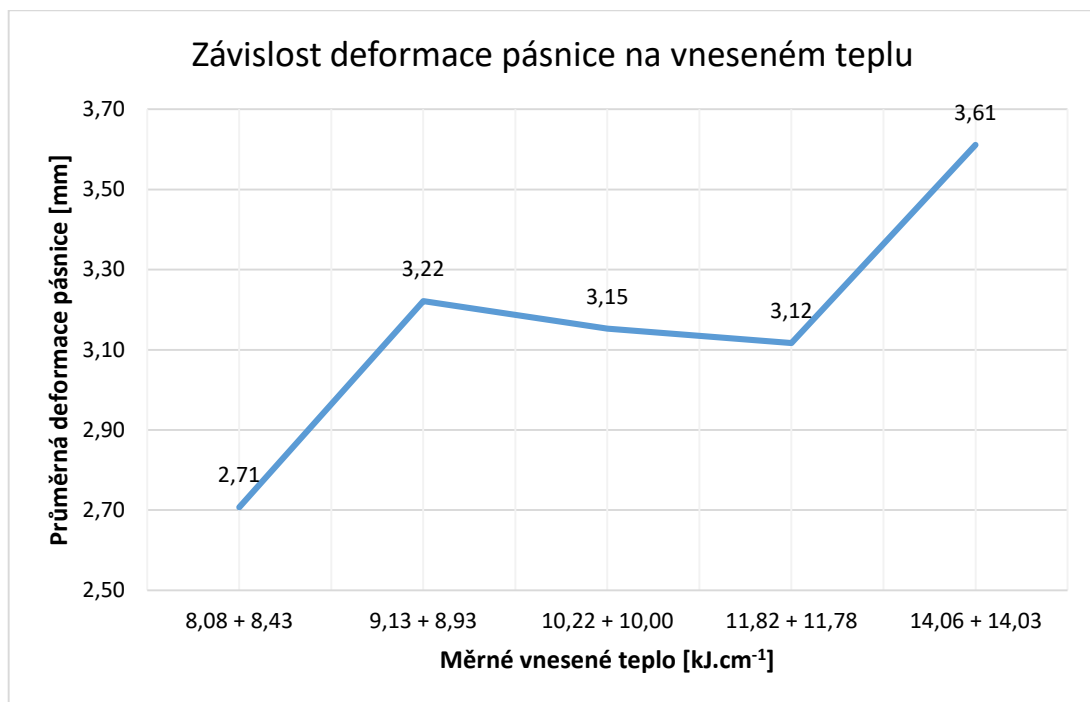


Obr. 4.1 - Grafické znázornění závislosti geometrických parametrů svarové lázně na vneseném teple

Na snímcích makrovýbrusů jednotlivých svarů je také velmi dobře patrná tepelně ovlivněná oblast, jejíž velikost, stejně jako velikost svarové lázně, roste s dodáváním většího množství tepla do svaru. Z výsledků je dále zřejmá jen nepatrná asymetrie svaru (parametry $z1$ a $z2$).

Křivka na Obr. 4.2 má stoupající trend a ukazuje, že také naměřené deformace se spolu s rostoucím množstvím vneseného tepla zvětšují, jak by se dalo předpokládat. Výjimkou je

opět svar s vneseným teplem 9 kJ.cm^{-1} , kde je deformace větší. Důvodem je celková hloubka svaru, která byla mnohem vyšší oproti ostatním svarům. Celkový rozdíl ve velikosti úhlové deformace mezi svarem s $Q_v = 8 \text{ kJ.cm}^{-1}$ a svarem s $Q_v = 14 \text{ kJ.cm}^{-1}$ činí 25%. Při porovnání naměřených deformací druhého, třetího a čtvrtého svařence je ale vidět, že ačkoliv hodnota vneseného tepla rostla, deformace pásnic dosahovaly přibližně stejných hodnot. Tvrzení, že s rostoucím vneseným teplem roste také velikost deformace svařence, platí tedy jen velmi obecně a na základě deformací bychom dokázali rozlišit pouze svařence, které mají výrazný rozdíl v hodnotách měrného vneseného tepla.

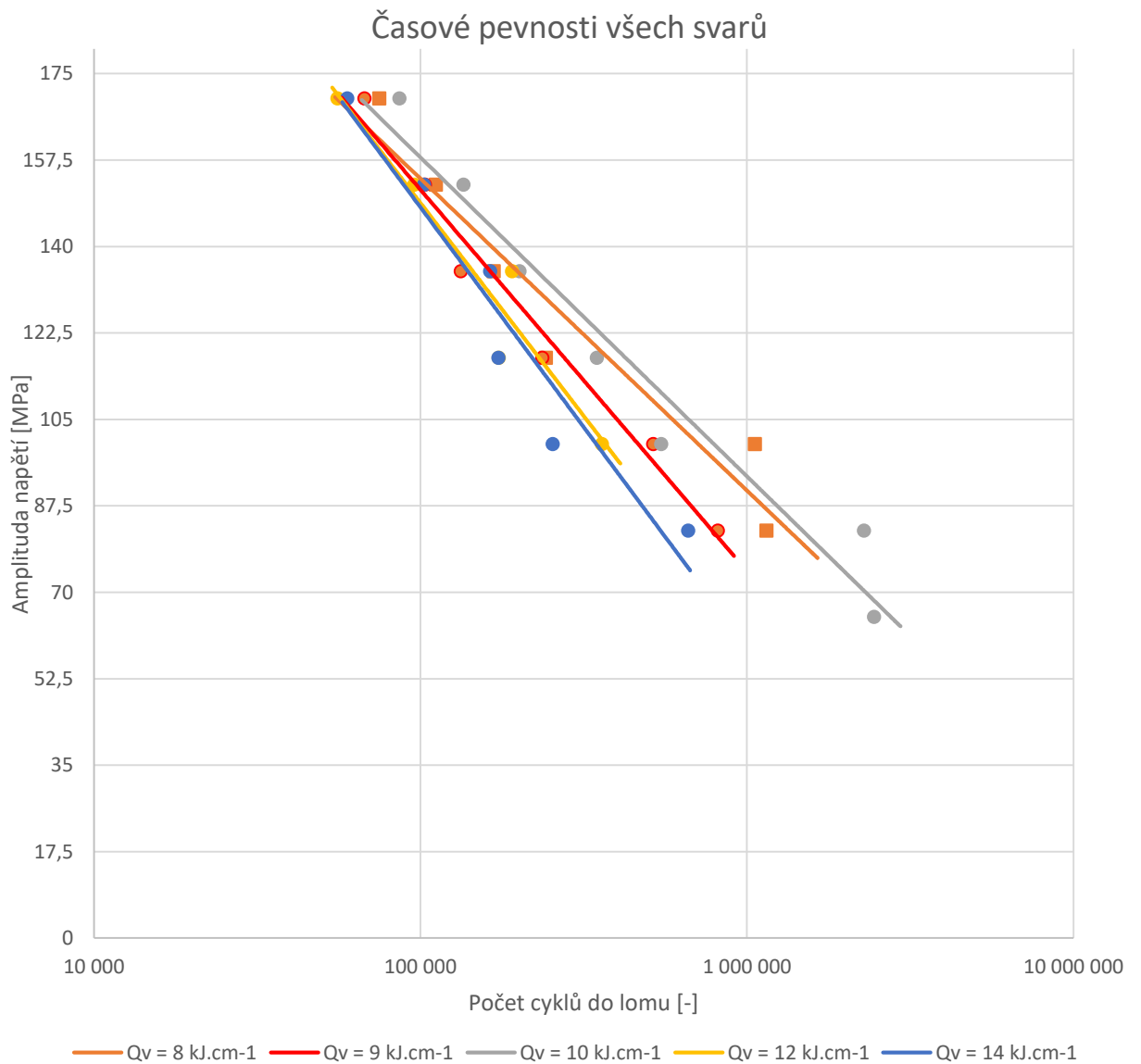


Obr. 4.2 – Grafické znázornění závislosti deformace pásnice na vneseném teple

4.2 Vyhodnocení únavové životnosti

Při porovnání Wöhlerových křivek svarů s různým měrným vneseným teplem je v oblasti časové pevnosti patrné, že s rostoucí hodnotou tepla vneseného na jednotku délky svaru dochází ke snížení počtu zatěžovacích cyklů do lomu. Zároveň se i lehce zvedá strmost proložené trendové přímky naměřenými hodnotami. Jedinou výjimkou je třetí svar s hodnotou měrného tepla $Q = 10 \text{ kJ.cm}^{-1}$. Při porovnání dosažených výsledků meze únavy jednotlivých svarů s hodnotou meze únavy neovlivněného základního materiálu, která je 340 MPa , je zřejmé, že mnohem větší vliv než změny, k nimž dochází v TOO, má vrubový účinek svaru v místě přechodu ze základního materiálu do svarového kovu. Díky němu se hodnota meze únavy pro svary s hodnotami měrného tepla mezi 8 a 14 kJ.cm^{-1} pohybuje v rozmezí od 60 do $82,5 \text{ MPa}$. Dochází tedy k poklesu meze únavy o 76% , respektive 83% . Změnou hodnoty měrného vneseného tepla došlo tedy ke snížení únavové pevnosti pouze

o 7%, je-li vztažena tato hodnota k základnímu materiálu. Při svařování dynamicky zatěžovaných koutových svarových spojů je tedy mnohem důležitější posoudit geometrické přechody ze základního materiálu do svarového kovu. Graf na Obr. 4.3 porovnává Wöhlerovy křivky v oblastech časové pevnosti všech svarů.



Obr. 4.3 - Porovnání časových pevností všech svarů

5 Závěr

Svařování je technologický proces, který je velmi obtížně predikovatelný, neboť na tvorbu svarových spojů má vliv velmi velké množství parametrů, které se vzájemně ovlivňují. Vyhodnocení geometrie svarové lázně na základě metalografických výbrusů potvrzuje, že tvar průřezu je nejvíce ovlivněn hodnotou svařovacího proudu, s jehož velikostí roste hloubka závaru. Vliv rychlosti svařování a hodnoty svařovacího napětí se na tvar vzhledem k svařovacímu proudu neprojevil tak výrazně. Výsledky testování únavové životnosti potvrdily původní předpoklad, že mechanické vlastnosti svařovaných součástí z jemnozrné oceli S460MC se při cyklickém zatěžování zhoršují s nárůstem hodnoty měrného vneseného tepla do svarového spoje. Tento vliv je však v porovnání s vrubovým účinkem svaru nepatrný a činil pouze 7%. Naproti tomu výsledky práce poukazují na důležitost vlivu geometrických parametrů svarové lázně, z nichž je v tomto ohledu pravděpodobně nejvýznamnější poloměr vrubu, který je tvořen přechodem mezi základním materiálem a svarem. Dalším faktorem, který také ovlivňuje únavovou životnost, je deformace svařovaných součástí rostoucí spolu s většími hodnotami dodávaného tepla. Úhlové deformace totiž k cyklickému zatěžování tahovým a tlakovým napětím přidávají navíc ohybovou složku.

Zkoumání únavové životnosti velmi znesnadnil fakt, že dodržet naprosto identický průřez svarové lázně po celé délce svaru je velmi náročné, ne-li nemožné. Pro zpřesnění výsledků testování únavových vlastností by bylo zapotřebí mnohem větší množství vzorků pro každou hodnotu vneseného tepla, což by v rámci této práce bylo z časových důvodů nerealizovatelné. Pokud by další výzkumy byly zaměřeny pouze na únavovou životnost, nikoliv na geometrii svarové lázně, bylo by na místě vrubový účinek svaru eliminovat (například obrobením svarové housenky). Za účelem docílení delší životnosti výrobku či konstrukce by totéž bylo vhodné provádět při svařování součástí z jemnozrné oceli v praxi, je však pochopitelné, že to není vždy možné – ať už z konstrukčních či ekonomických důvodů. Namísto úplného obrobení svarové housenky by tak mohlo postačit vhodně zvolit svařovací podmínky tak, aby byl přechod mezi povrchem základního materiálu a svarové housenky co nejplynulejší.

Na úplný závěr této práce je důležité podotknout, že celý experiment byl založen na cyklickém namáhání jemnozrné oceli S460MC s koeficientem asymetrie $R = -1$. Pro proces svařování byla využita metoda MAG, ochranný plyn Ar/CO_2 v poměru 82/18, jehož průtok byl $15 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$, a jako přídatný drát byl použit OK Autrod 12.51 o průměru 1,2 mm. Závěry z této práce nejsou aplikovatelné všeobecně, jiná kombinace svařovacích podmínek by s velkou pravděpodobností přinesla odlišné výsledky.

Citovaná literatura

[1] **Kolektiv autorů.** *Materiály a jejich svařitelnost.* Ostrava: Zerros, 1999. ISBN 80-85771-63-2.

[2] **Anonym.** Vysoce pevné mikrolegované oceli. *SVV Praha, s.r.o.* [Online] [Citace: 25. Únor 2019.] <http://svv.cz/files/2.11.vysocepevnmikroleg.ocelipdf.pdf>.

[3] **Moravec, Jaromír.** *Kinetika růstu austenitického zrna.* Liberec: TU v Liberci, Habilitační práce, 2016.

[4] **ČSN EN 10027-1.** *Systémy označování ocelí - část 1: Stavba značek ocelí.* Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.

[5] **Langmajerová, Danuše.** *Termomechanické zpracování vícefázových vysokopevných ocelí.* Plzeň: ZČU v Plzni, Disertační práce, 2013.

[6] **Kolektiv autorů.** *Technologie svařování a zařízení.* Ostrava: Zerros, 2001. ISBN 80-85771-81-0.

[7] **Anonym.** Svařování elektrickým obloukem. *Elektronické učebnice.* [Online] [Citace: 9. Duben 2019.] <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1806>.

[8] **Kopřiva, Róbert.** *Technológia zvaranie v ochranných plynoch metódou MIG/MAG.* Ostrava: Zerros, 1993. ISBN 80-85771-004-4.

[9] **Boček, Martin.** *Svařování objímky z C-Mn oceli.* Brno: VUT v Brně, Diplomová práce, 2017.

[10] **Moravec, Jaromír.** *Vliv procesních parametrů na geometrii svarové lázně při svařování v ochranných atmosférách.* Liberec: TU v Liberci, 2011. ISBN 978-80-7372-805-2.

[11] **Drápela, Pavel.** *Vliv vybraných parametrů na geometrii svarů u MAG procesu svařování.* Liberec: TU v Liberci, Diplomová práce, 2008.

[12] **Anonym.** Svařování elektrickým obloukem v ochranných atmosférách. *Elektronická učebnice.* [Online] [Citace: 14. Duben 2019.] <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1807>.

[13] **Hrstka, David.** *Vliv směsi plynu na efektivitu provedení svaru a stabilitu procesu MAG.* Liberec: TU v Liberci, Diplomová práce, 2007.

[14] **Anonym.** Svařovací zdroj. *Wikipedie.* [Online] [Citace: 14. květen 2019.] https://cs.wikipedia.org/wiki/Sva%C5%99ovac%C3%AD_zdroj.

- [15] **Hrstka, David.** *Monitorování svařovacích parametrů u metody svařování MAG jako prostředek zajištění kvality svaru.* Liberec: TU v Liberci, Disertační práce, 2010.
- [16] **Jágrová, Jitka a Čapek, Lukáš.** *Dynamická únavnost a životnost.* Liberec: TU v Liberci, 2014. ISBN 978-80-7494-135-1.
- [17] **Zapletal, Josef.** *Nízkocyklové a vysokocyklové únavové vlastnosti ADI.* Brno: VUT v Brně, Doktorská práce, 2011.
- [18] **Svoboda, Jaroslav.** Cyklické namáhání, druhy cyklických namáhání, stanovení meze únavy vzorku . [Online] SPŠ a VOŠT Brno, 2013. [Citace: 21. květen 2019.] http://domes.spssbrno.cz/web/DUMy/SPS,%20MEC,%20CAD/VY_32_INOVACE_11-18.pdf.
- [19] **Růžička, Milan.** *Dynamická pevnost a životnost.* Praha: ČVUT, 1989.
- [20] **Anonym.** Únavová křivka napětí (S-N křivka) - určení, parametry, matematické modely. [Online] VŠB - TU Ostrava. [Citace: 21. květen 2019.] <https://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/330/.content/files/prednaska8.pdf>.
- [21] **Moravec, Jaromír.** *Systémy označování ocelí ; Stavba značek dle ČSN EN 10027-1,2; Klasifikace ocelí (ISO/TR 15608); Inspekční certifikát (EN 10204).* [prezentace] Liberec: TU v Liberci.
- [22] **Moravec, Jaromír.** *Měření mechanických vlastností materiálu S460MC při různých podmínkách ohřevu a ochlazování .* Liberec: TU v Liberci, 2017.
- [23] **Moravec, Jaromír.** *Svařování koutových svarů z materiálu S460MC pro simulace a zkoušky únavové životnosti.* Liberec: TU v Liberci, 2017.
- [24] **Hlavatý, Ivo.** Svařování metodou MIG (131) a MAG (135). [Online] VŠB - Technická univerzita Ostrava. [Citace: 13. květen 2019.] <http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/07-08-131-135.pdf>.
- [25] **Kříž, Antonín.** Zkoušky mikrolegovaných ocelí DOMEX 700MC. *Oddělení povrchového inženýrství – Západočeská univerzita v Plzni.* [Online] [Citace: 25. Únor 2019.] https://www.opi.zcu.cz/fraktografie_prednaska1.pdf.