



Vliv procesu svařování na změny únavové životnosti spojů z jemnozrnné oceli S460MC

Bakalářská práce

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





Zadání bakalářské práce

Vliv procesu svařování na změny únavové životnosti spojů z jemnozrnné oceli S460MC

Jméno a příjmení: **Jan Novák**
Osobní číslo: S15000132
Studijní program: B2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojní inženýrství
Zadávající katedra: Katedra strojírenské technologie
Akademický rok: **2018/2019**

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se teoreticky s metodou svařování MAG (fyzikální podstata procesu, svařovací parametry a jejich vliv na tvar svarové lázně).
2. Seznamte se teoreticky s podstatou procesů při únavovém zatěžování (nízko a vysokocyklová únava).
3. Seznamte se s ovládáním systému WeldMonitor pro monitorování parametrů svařovacího procesu.
4. Navrhněte a proveďte oboustranný koutový svar na materiálu S460MC a připravte vzorky pro únavové zatěžování a proveďte je.
5. Navrhněte a proveďte tupý svar na materiálu S460MC a připravte vzorky pro únavové zatěžování a proveďte je.
6. Proveďte naměření Wöhlerovy křivky pro tupé a koutové svary ocel S460MC.
7. Proveďte porovnání získaných výsledků ze zkoušek únavy svarových spojů s Wöhlerovou křivkou pro základní materiál a dosažené výsledky zhodnoťte.

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, 12, 1995, 406- 416 s.
- [4] AWS 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

Datum zadání práce: 31. října 2018

Předpokládaný termín odevzdání: 30. dubna 2020

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan



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

V Liberci 1. listopadu 2018

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.

5. 6. 2019

Jan Novák

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou únavové životnosti svarových spojů z jemnozrnné oceli S460MC. V teoretické části práce je hlavní pozornost věnována vlivu procesních parametrů na geometrii svarové lázně a způsobu přenosu svarového kovu, který patří mezi základní charakteristiky metod svařování elektrickým obloukem.

Cílem experimentální části je stanovení vlivu procesu svařování na únavovou životnost navržených koutových a tupých svarů provedených metodou MAG – 135 dle ISO 4063. V závislosti na kvalitě výsledného spoje byly nejprve navrženy procesní parametry tak, aby bylo zajištěno správné převýšení svaru a provaření kořene svarového spoje. Ze svarových spojů byly odebrány vzorky pro testy vysokocyklové únavy, jejichž výstupem byla data pro sestavení Wöhlerových křivek jednotlivých typů svarů. Tyto výsledky byly konfrontovány s Wöhlerovou křivkou základního materiálu.

Klíčová slova: ocel S460MC, MAG, geometrie svaru, vnesené teplo, únavová životnost

Annotation

This bachelor thesis deals with the problem of fine-grained steel S460MC welded joints fatigue life. In the theoretical part, the main attention is paid to the influence of process parameters on the weld pool geometry and to the method of weld metal transfer, which is one of the basic characteristics of electric arc welding.

The aim of the experimental part is to determine the influence of welding process on the fatigue life of the proposed fillet and butt welds, performed by method MAG – 135 according to ISO 4063. Depending on the quality of the final joint, the process parameters were designed to ensure correct weld excess and root penetration. From welded joints were taken samples for high-cycle fatigue tests to measure data for construction Wöhler curves of each weld type. These results were confronted with the Wöhler curve of the base material.

Keywords: Steel S460MC, MAG, Weld Geometry, Heat Input, Fatigue Life

Poděkování

Rád bych touto cestou vyjádřil poděkování doc. Ing. Jaromíru Moravcovi, Ph.D. za jeho cenné rady, doporučení a pomoc s přípravou a uskutečněním experimentů během řešení této bakalářské práce.

Obsah

Seznam použitých zkratek a symbolů.....	8
1 Úvod	9
2 Teoretická část.....	10
2.1 Svařování metodou MAG	10
2.2 Vliv procesních parametrů na geometrii svarové lázně	12
2.2.1 Vliv velikosti svařovacího proudu na geometrii svarové lázně.....	13
2.2.2 Vliv velikosti napětí na geometrii svarové lázně	14
2.2.3 Vliv rychlosti svařování na geometrii svarové lázně.....	15
2.3 Způsob přenosu svarového kovu.....	16
2.3.1 Oblouk se zkratovým přenosem kovu	16
2.3.2 Oblouk s bezzkratovým přenosem kovu	16
2.4 Monitorizace svařovacích parametrů.....	17
2.5 Únava materiálu	18
2.5.1 Kmitavá zatížení.....	18
2.5.2 Wöhlerova křivka.....	20
3 Experimentální část	22
3.1 Testovaný materiál.....	22
3.2 Svařování vzorků pro zkoušky únavové životnosti svarů	25
3.2.1 Příprava vzorků pro svařování koutových svarů.....	25
3.2.2 Svařování a monitorizace koutových svarů.....	26
3.2.3 Metalografické vyhodnocení a měření deformací koutových svarů.....	29
3.2.4 Příprava vzorků pro svařování tupých svarů	33
3.2.5 Předběžné testy k optimalizaci procesních parametrů tupých svarů	35
3.2.6 Svařování a monitorizace tupých svarů.....	37
3.2.7 Metalografické vyhodnocení a měření deformací tupých svarů.....	38
3.3 Zkoušky vysokocyklové únavy	42
4 Diskuse výsledků.....	48

5 Závěr	50
6 Seznam použité literatury	51

Seznam použitých zkratk a symbolů

TOO	- tepelně ovlivněná oblast	
MAG	- svařování tavící se elektrodou v aktivní ochranné atmosféře	
Q_v	- měrné vnesené teplo	[J.m ⁻¹]
η_0	- účinnost přenosu elektrického oblouku	[1]
I	- svařovací proud	[A]
U	- svařovací napětí	[V]
v_s	- rychlost svařování	[m.s ⁻¹]
σ_h	- horní napětí kmitu	[Pa]
σ_d	- dolní napětí kmitu	[Pa]
σ_m	- střední napětí kmitu	[Pa]
σ_a	- amplituda napětí (výkmit)	[Pa]
$\Delta\sigma$	- rozkmit napětí ($\Delta\sigma = 2 \cdot \sigma_a$)	[Pa]
T	- perioda kmitu	[s]
R	- asymetrie cyklu	[1]
σ_c	- mez únavy	[Pa]
N	- počet kmitů	[1]
N_c	- počet kmitů na mezi únavy	[1]
HV5	- zkouška tvrdosti dle Vickerse při nominálním zatížení 49,03 N	

1 Úvod

Proces svařování ovlivňuje svařovaný materiál z hlediska jeho mechanických, fyzikálních a částečně i chemických vlastností. O míře ovlivnění materiálu rozhoduje použitá svařovací metoda a zvolené procesní parametry. Především se jedná o velikost svařovacího proudu, svařovacího napětí a rychlosti svařování, které definují množství tepla vneseného do materiálu.

Tvorba svarového spoje a veškeré změny v materiálu s ní spojené, mají mimo jiné, za následek i změnu únavové životnosti tohoto spoje. Hlavním faktorem ovlivňujícím tuto životnost je geometrie provedeného svaru (zejména v místě přechodu ze základního materiálu) a dále pak změny, k nimž dochází v TOO. V důsledku aplikace teplotního cyklu dochází k deformacím základního materiálu, ke vzniku vnitřních napětí a ke vzniku tepelně ovlivněné oblasti, což jsou základní prvky ovlivňující únavovou životnost svarového spoje.

Cílem této bakalářské práce je stanovení vlivu procesu svařování na únavovou životnost svarových spojů z jemnozrnné oceli S460MC. V rámci experimentu budou získány údaje o procesních parametrech při svařování koutových a tupých svarů provedených metodou MAG – 135 dle ISO 4063, a průběhy Wöhlerových křivek základního materiálu a vybraných svarových spojů. Získané údaje mohou posloužit k základní představě o tom, jak moc bude materiál technologicky ovlivněn, ale lze je také využít k definování simulačních modelů. Ty lze následně aplikovat při návrhu svarových spojů a jejich prvotní kontrole na únavovou životnost. Na základě získaných výsledků lze poté provést dimenzování součásti nebo konstrukce tak, aby byla zajištěna její maximální funkčnost.

Konstrukční návrhy při dimenzování dynamicky namáhaných svařovaných konstrukcí v současnosti vycházejí především z hodnot únavové životnosti základního materiálu. Přestože se snaží postihnout vliv procesu použitím konstant bezpečnosti vrubového účinku svaru i vlastního procesu, jde pouze o teoretický odhad. Stejně tak při využití numerických simulací návrhu svarového spoje, vycházejících pouze z teoretických předpokladů a znalosti únavové životnosti základního materiálu, dochází velice často k předdimenzování, nebo i k poddimenzování výsledného konstrukčního návrhu. Výsledkem je pak buď příliš robustní a těžká konstrukce, která je zejména při aplikaci v automobilovém průmyslu neakceptovatelná, nebo naopak dochází k praskání dílů dříve, než je při namáhání dosaženo jejich plánované životnosti. Účelem této práce je proto částečně ukázat chování reálných typů svarů při dynamickém zatěžování.

2 Teoretická část

Svařování je jedním z technologických procesů, které umožňují spojování kovových i některých nekovových materiálů do jednoho celku. Spolu s tvářením a slévárenstvím patří k nejstarším technologiím zpracování kovů. V dnešní době je k dispozici již celá řada metod svařování, které umožňují spojování širokého spektra materiálů. Přesto platí, že jakýkoliv svarový spoj vytváří v konečném výrobku určitou nehomogenitu a vnáší tak určitá rizika z hlediska jeho provozního využití. [1]

Obecně lze říci, že svařování je proces vyhotovení nerozebíratelných spojů dosažením meziatomových vazeb mezi spojovanými částmi při jejich ohřevu, nebo plastické deformaci, nebo při společném působení jednoho i druhého. [2]

Svařování tak dělíme do dvou hlavních skupin – svařování tlakové a svařování tavné. Tlakové svařování zahrnuje veškeré metody svařování, při kterých se používá vnější síla k vytvoření plastických deformací obou styčných ploch. Tavné svařování pak zahrnuje metody, při kterých dochází k natavení styčných ploch. Ve většině případů se zde také přidává natavený přídavný materiál, který se poté podílí na tvorbě samotného svarového spoje.

Z výše uvedeného vyplývá, že pro vytvoření svarového spoje je třeba vydat dostatečné množství energie ve formě tepla, síly, nebo případně obojího. Přenos této energie je zprostředkován pomocí nositelů energie. Při svařování se jedná o nositele energie ve formě pevného tělesa, kapaliny, plynu, elektrického oblouku, záření, pohybu hmoty, elektrického proudu nebo nespecifikovaného nositele. [1]

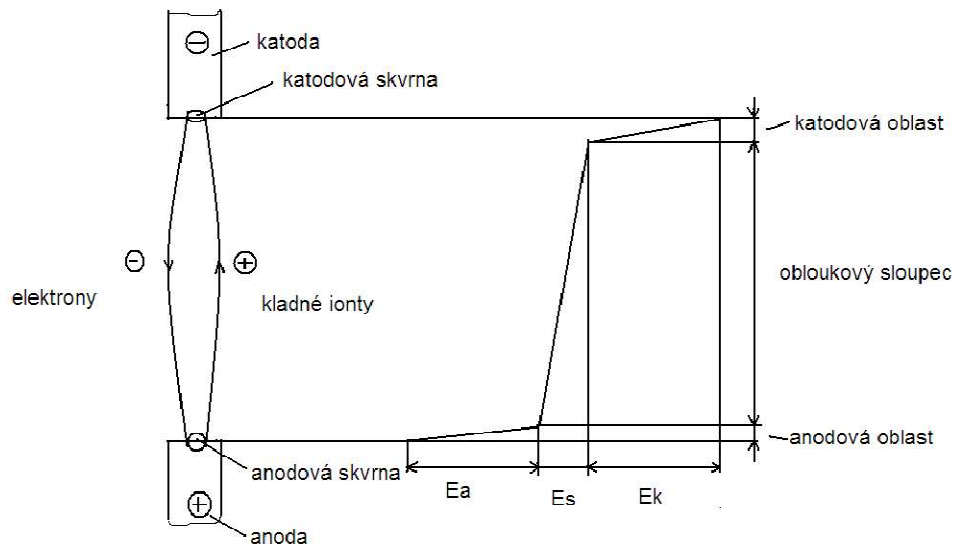
Vzhledem k tomu, že v experimentální části práce je použita metoda tavného svařování v aktivní ochranné atmosféře (MAG), je následující kapitola věnována této metodě.

2.1 Svařování metodou MAG

Svařování metodou MAG se řadí mezi technologie tavného svařování. Natavením svarových ploch základního materiálu a odtavením elektrody dochází ke vzniku svarové lázně, která po ztuhnutí tvoří požadovanou fyzikální vazbu spojovaných materiálů. [6]

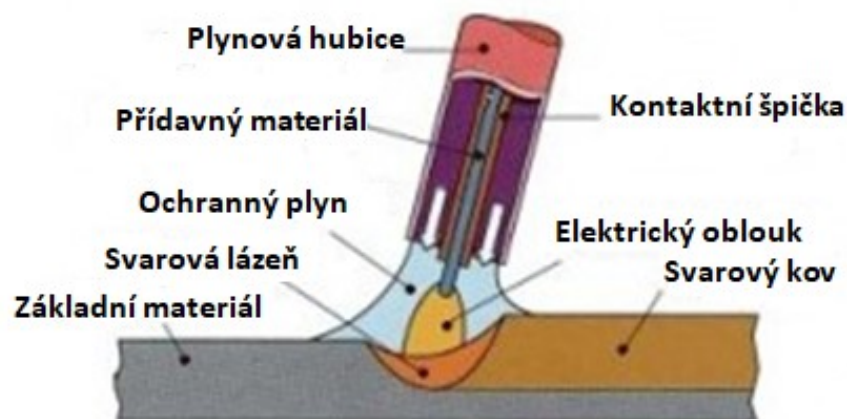
Při svařování touto metodou je nositelem energie elektrický oblouk, viz obr. 2.1. Jedná se o nízkonapěťový elektrický vysokotlaký výboj, který hoří v prostředí ionizovaného plynu mezi odtavující se elektrodou a základním materiálem. Aktivní plošky elektrod, mezi kterými hoří elektrický oblouk, se nazývají katodová a anodová oblast. To je důležité z hlediska způsobu zapojení zdroje, neboť v případě přímé polarizace zdroje se přivádí záporný pól na elektrodu a kladný pól na základní materiál, v případě nepřímé polarizace je tomu naopak. Následkem přímé polarizace je dosažení vyšší teploty na základním materiálu (anodě) a nižší teploty na elektrodě (katodě). Při svařování metodou MAG se

nejčastěji používá stejnosměrný proud s nepřímou polaritou, kde elektroda je zapojena na kladný pól zdroje a základní materiál na záporný pól zdroje. Při tomto typu zapojení se tvar svarové lázně vyznačuje zvýšenou hloubkou protavení materiálu, nízkou hodnotou převýšení svaru a poměrně širokou svarovou lázní. Tím je zajištěn poměrně stabilní svařovací proces s relativně konstantním odtavováním elektrody. [6,7]

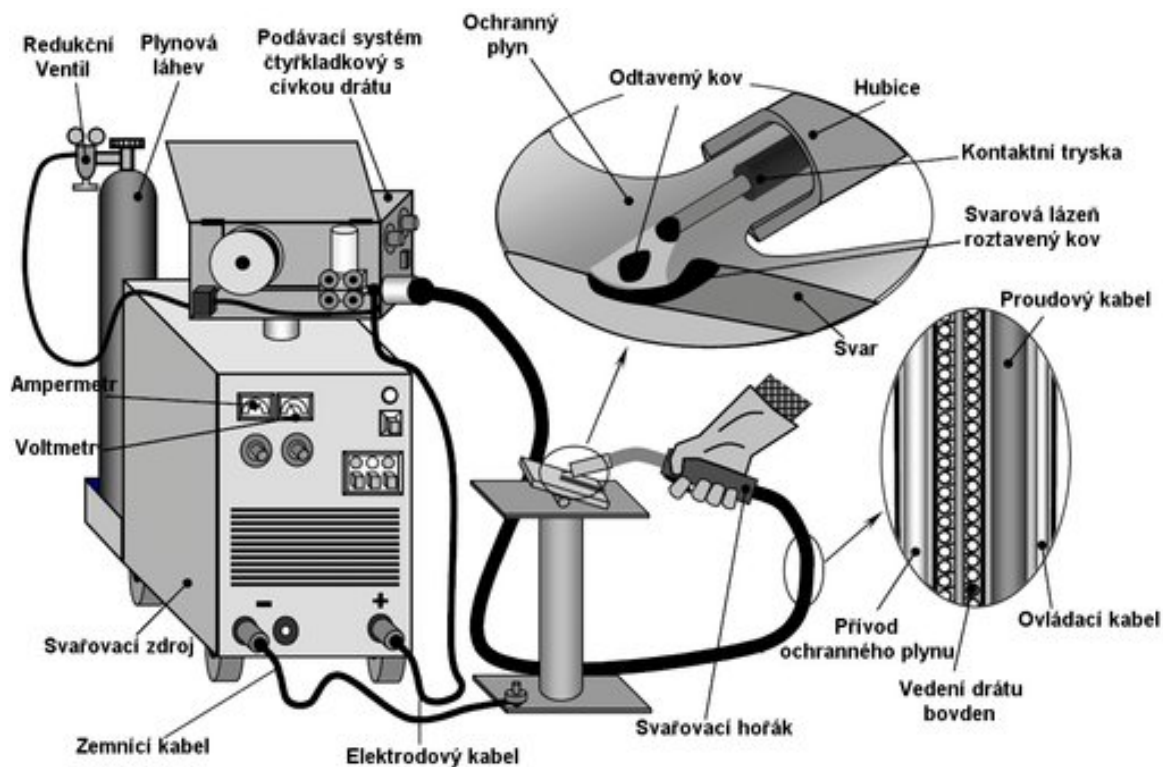


Obr. 2.1 Schéma elektrického oblouku [3]

Celý proces svařování metodou MAG probíhá v aktivní ochranné atmosféře. Ta je zpravidla tvořena směsí argonu a oxidu uhličitého a jejím úkolem je ochránit tavící se elektrodu, hořící oblouk a svarovou lázeň před kontaminací okolní atmosférou. Také se podílí na metalurgických procesech, které se odehrávají ve svarové lázni během procesu svařování. Schematické znázornění svařování metodou MAG je ukázáno na obr. 2.2 a obr. 2.3.



Obr. 2.2 Svařování metodou MAG [4]



Obr. 2.3 Schéma zařízení pro svařování metodou MAG [5]

Tavné svařování obloukovými metodami je charakteristické velkým množstvím proměnných ovlivňujících výslednou geometrii svarové lázně. Proměnné jsou rozděleny do tří základních skupin na procesní, technologické a fyzikálně-chemické vstupní parametry. Některé z nich je možné zásadně ovlivňovat, některé méně. Vhodnou volbou parametrů lze pak zajistit stabilitu procesu a požadovanou výslednou geometrii svaru. Největší vliv mají procesní parametry, které lze výrazně ovlivňovat, a proto bude další pozornost věnována právě jim.

2.2 Vliv procesních parametrů na geometrii svarové lázně

Procesní parametry jsou charakteristické tím, že se nastavují před začátkem samotného procesu svařování a jsou závislé především na konstrukci a charakteristice svařovacího zdroje. Rozlišují se tři hlavní procesní parametry – svařovací proud, svařovací napětí a rychlost svařování.

Tyto hlavní parametry umožňují vyjádřit důležitou fyzikální veličinu užívanou při svařování, tj. měrné vnesené teplo. Tato veličina určuje množství vneseného tepla na jednotku délky svaru a je dána celkovou tepelnou bilancí svaru. Z hodnot měrného vneseného tepla je možné odhadovat velikost tepelného ovlivnění materiálu, velikost deformačních a napěťových polí a v neposlední řadě udává tato veličina také limitní hodnoty při svařování různých materiálů. Měrné vnesené teplo lze vypočítat dle vzorce (2.1). [6]

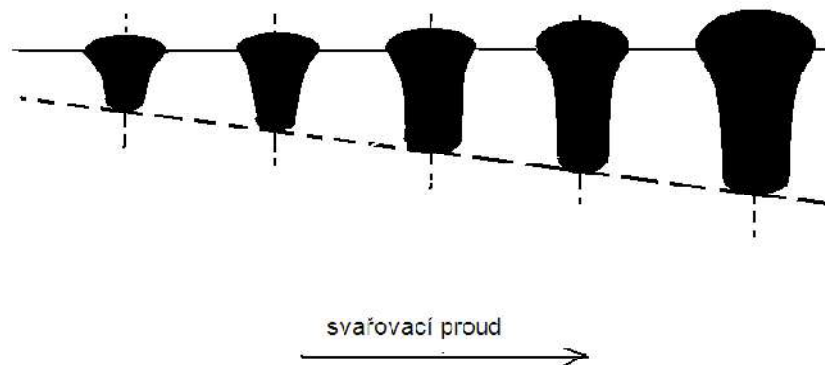
$$Q_v = \eta_0 * \frac{U * I}{v_s} \quad (2.1)$$

Kde značí:	Q_v	-	měrné vnesené teplo [$J \cdot m^{-1}$],
	η_0	-	účinnost přenosu elektrického oblouku [1],
	I	-	svařovací proud [A],
	U	-	svařovací napětí [V],
	v_s	-	rychlost svařování [$m \cdot s^{-1}$].

Mimo výše uvedených hlavních procesních parametrů svařování se na ovlivnění geometrie svarové lázně podílí také další parametry. Mezi ně patří především rychlost podávání drátu, polarita na elektrodě, proudová hustota, typ a průtočné množství ochranného plynu, typ přenosu kovu v elektrickém oblouku, sklon hořáku vůči povrchu svařovaného materiálu a tvar a rozměry svarových ploch. [6]

2.2.1 Vliv velikosti svařovacího proudu na geometrii svarové lázně

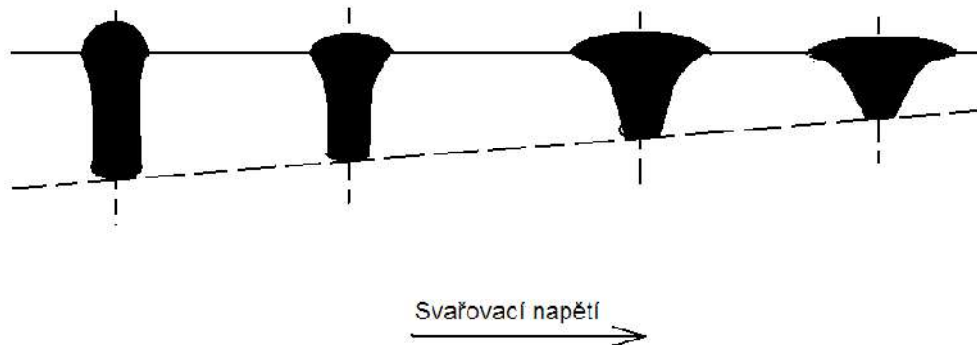
Velikost svařovacího proudu má ze všech uvedených procesních parametrů největší vliv na geometrii svarové lázně. Přímo nebo nepřímo ovlivňuje způsob přenosu kovu v oblouku, velikost proudové hustoty a tekutost svarové lázně. Se vzrůstající hodnotou svařovacího proudu se zvyšuje rychlost odtavování, mění se způsob přenosu kovu v oblouku a také roste gradient teploty a mění se dominantní způsob přenosu tepla ve svarové lázni. To má za následek zvýšení rychlosti proudění ve svarové lázni a změnu jeho směru, v důsledku čehož roste hloubka protavení. Kromě zvýšení hloubky protavení dochází také ke zvětšení šířky housenky a k nárůstu převýšení svaru, viz obr. 2.4. [6]



Obr. 2.4 Vliv velikosti svařovacího proudu na geometrii svarové lázně [7]

2.2.2 Vliv velikosti napětí na geometrii svarové lázně

Napětí při svařování představuje rozdíl potenciálů mezi elektrodou (drátem přídavného materiálu) a povrchem svarové lázně. Mění se v závislosti na délce oblouku. S rostoucím napětím se zvětšuje šířka svarové lázně. Současně dochází ke snižování velikosti převýšení svaru a hloubky protavení materiálu, viz obr. 2.5. [6,8]



Obr. 2.5 Vliv velikosti svařovacího napětí na geometrii svarové lázně [7]

Napětí na oblouku má také velký vliv na dosažení optimálních podmínek samoregulace oblouku. U metod svařování tavící se elektrodou v ochranném plynu se z důvodu samoregulace délky oblouku používají zdroje s plochou voltampérovou charakteristikou. Díky tomu jsou schopny automaticky reagovat na změnu délky oblouku a v případě jeho prodloužení automaticky sníží velikost svařovacího proudu. Tím dochází ke snížení rychlosti odtavení a k následnému navrácení délky oblouku do optimálního nastavení. Čím je změna proudu větší, tím rychleji proběhne samoregulace délky oblouku. [6]

K dosažení dobré kvality svarů je nutno zajistit, aby svařovací proces probíhal v tzv. oblasti stability hoření oblouku. Jelikož je velikost napětí závislá na velikosti svařovacího proudu, nelze jeho hodnotu nastavit předem. Z toho důvodu se nastavuje pouze hodnota napětí naprázdno. Toto napětí poté zpravidla po zapálení oblouku klesne na hodnotu odpovídající velikosti svařovacího proudu při daném odporu soustavy. [9]

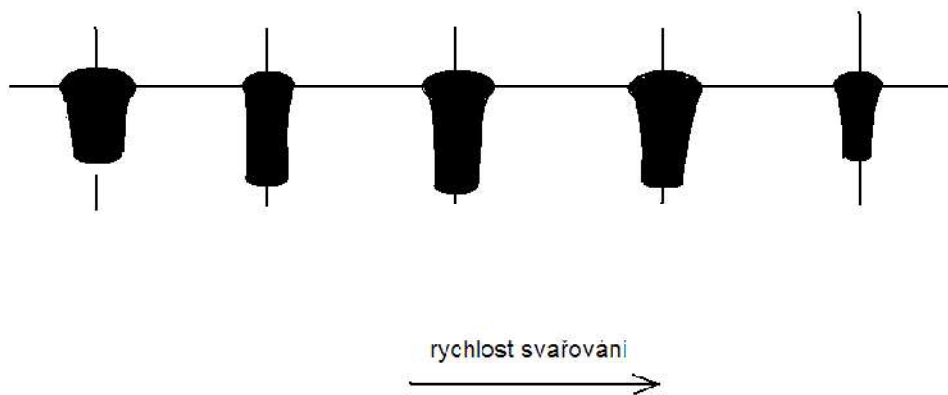
Pro stabilitu procesu svařování je dále nutné, aby se toto zmíněné napětí dostalo do toleranční oblasti pracovního pole. To zajišťují zdroje, které v sobě mají nahrány knihovny pracovních oblastí pro kombinace různých vstupních podmínek a umožňují tak svařování v režimu tzv. synergie. Řídící jednotka pak na základě vybrané kombinace vstupních podmínek sama upravuje další procesní parametry (napětí, rychlost podávání přídavného materiálu) tak, aby byl proces pro zvolený tepelný výkon maximálně stabilní. [9]

Příliš vysoké napětí má v důsledku nárůstu délky oblouku za následek propal legujících prvků v kovu přenášeném obloukem, i legujících prvků ve svarové lázni. Přenos kovu po delší dráze s sebou nese i další negativa. V důsledku intenzivnějších metalurgických reakcí dochází ke změnám chemického složení svarového kovu. Svarový kov je oksidován a výsledné svary poté mají tendenci pórovat. Aby k tomuto jevu nedocházelo, je nutné, aby legující prvky v elektrodě i v základním materiálu byly schopny vázat kyslík. Ten je pak následně společně s nimi vyplaven na povrch svarové housenky ve formě strusky. Dále také dochází ke zvýšení rozstřiku kovu.

Při nízkých hodnotách napětí dochází k nestabilitě procesu svařování, vzniká úzká svarová lázeň s vysokým převýšením a dochází k nedokonalému natavování svarových hran. [6]

2.2.3 Vliv rychlosti svařování na geometrii svarové lázně

Zvětšující se rychlost svařování má na tvar svarové lázně stejný vliv, jako rostoucí svařovací proud a vliv opačný, než rostoucí svařovací napětí. To ovšem platí pouze za předpokladu, že ještě stále dochází k natavování svarových ploch. Se zvyšující se rychlostí svařování se zužuje svarová lázeň a roste převýšení svaru. Dochází ke snižování měrného vneseného tepla, teplo se rychleji odevzdává a zmenšuje se teplo potřebné pro předehřev svarových ploch. Závislost rychlosti svařování na geometrii svarové lázně je zobrazena na obr. 2.6. [6]



Obr. 2.6 Vliv velikosti rychlosti svařování na geometrii svarové lázně [7]

S rostoucí rychlostí svařování se nejprve zvyšuje hloubka závaru, ale pouze do hodnoty svařovací rychlosti, při které ještě dochází k natavování svarových ploch. Po překročení této hodnoty naopak dochází ke snižování hloubky závaru. Hodnotu maximálního protavení ovlivňuje mnoho faktorů, a proto se určuje experimentálně pro daný konkrétní případ. [6]

2.3 Způsob přenosu svarového kovu

Způsob přenosu kovu v oblouku patří mezi základní charakteristiky metod svařování elektrickým obloukem a závisí zejména na procesních parametrech svařování. Způsob přenosu kovu v oblouku také ovlivňuje použitý ochranný plyn svým složením. [7]

Svarový kov může být přenášen obloukem několika způsoby. Důležitý je způsob natavování konce drátu (elektrody) a pohyb odděleného tekutého kovu od tavicí se elektrody až po jeho splnutí se svarovou lázní. Způsob oddělování kapek tekutého kovu od elektrody a jejich pohyb v oblouku je dán výslednicí na ně působících sil. Mezi působící síly se řadí gravitační síla, Lorentzova síla, síla povrchového napětí, dynamické síly a síly odpařujících se kovů. Podle podílu jednotlivých sil na přenosu tekutého kovu se následně mění charakter tohoto přenosu. Mezi nejvýznamnější síly, určující výsledný vektor sil působících na kapku, se řadí především síla Lorentzova, a v závislosti na poloze svařování a typu ochranného plynu také síla tíhová. [6]

2.3.1 Oblouk se zkratovým přenosem kovu

Ke zkratovému přenosu kovu dochází při nižších hodnotách svařovacího proudu (cca. od 60 do 180 A) a při hodnotách svařovacího napětí od 14 do 22 V. Tento rozsah odpovídá svařování konstrukčních ocelí v ochranné atmosféře směsného plynu typu M21 dle ČSN EN ISO 14175. Na obr. 2.7 je znázorněn přenos kovu obloukem při zkratu, těsně před dotykem natavené kapky kovu se svarovou lázní. Při tomto přenosu kovu dochází k přerušování oblouku zkratem, při kterém se odděluje část kovu elektrody. Vlivem posuvu se konec nataveného drátu přiblíží ke svarové lázni a při dotyku a zkratu se kapka nataveného kovu oddělí od elektrody a vlivem povrchového napětí taveniny se rovnoměrně rozptýlí ve svarové lázni. [6,7]

2.3.2 Oblouk s bezzkratovým přenosem kovu

K bezzkratovému přenosu kovu dochází při hodnotách svařovacího proudu od 200 do 500 A, a při hodnotách svařovacího napětí od 26 do 38 V (platí opět pro ochranný plyn typu M21). Výkon odtavení je asi čtyřikrát vyšší než u přenosu zkratového. Na obr. 2.8 je znázorněn sprchový přenos kovu při přechodu roztavené kapky od tavicí se elektrody do svarové lázně. Tento typ přenosu kovu je možno realizovat se směsnými ochrannými plyny (Ar + CO₂, Ar + O₂). Za použití čistého CO₂ nelze tento přenos kovu realizovat, neboť z důvodu vyšších hodnot povrchového napětí nelze získat dostatečně drobné kapky svarového kovu. [7]

Oblouk při tomto typu přenosu kovu nezhasíná. Z toho důvodu se do základního materiálu přenáší větší množství tepla. Pro sprchový přenos je charakteristická velká hloubka protavení, která se zvětšuje s rostoucí hodnotou svařovacího proudu. Výsledná svarová housenka je hladká a čistá. Z důvodu větší velikosti svarové lázně je však tento typ přenosu kovu obtížně využitelný při svařování

v různých polohách, neboť na svarovou lázeň poté působí především tíhová síla, která může mít v různých polohách za následek špatné propojení svarové lázně se základním materiálem, a tím i negativní vliv na kvalitu výsledného svarového spoje. [6]



Obr. 2.7 Zkratový přenos kovu [10]



Obr. 2.8 Bezzkratový přenos kovu [10]

2.4 Monitorizace svařovacích parametrů

Pro zajištění reprodukovatelnosti svarových spojů ve vysoké kvalitě se v průmyslové praxi proces svařování monitoruje a dokumentuje. To s sebou přináší zefektivnění a optimalizaci výroby. V rámci experimentu bude za tímto účelem využíván systém WeldMonitor.

System jako takový je složen z hardwaru a softwaru. Hardware lze připojit k libovolnému svařovacímu zdroji a je tvořen jednotlivými snímači, viz obr. 2.9, které zaznamenávají hodnoty snímaných veličin.



Obr. 2.9 Hardware Weldmonitoru [11]

V základním provedení monitoruje průběh svařovacího proudu a napětí. V reálném čase měří efektivní hodnoty těchto veličin a počítá velikost vneseného tepla. Díky svému frekvenčnímu rozsahu 12,5 kHz (v případě univerzitní verze TUL až s frekvencí 25 kHz) umožňuje spolehlivou diagnostiku způsobu přenosu kovu do svarové lázně. V pokročilém provedení umožňuje hardware mimo sledování svařovacího proudu a napětí také sledování rychlosti svařování, měrného tepelného příkonu, teploty materiálu a okolí, spotřeby drátu, ochranných plynů a energie. [11]

Software WeldMonitoru umožňuje zobrazení zaznamenaných dat a následnou práci s nimi. Je v něm zakomponována otevřená databáze firem, svářečů, zdrojů podléhajících validaci a kalibraci, základních i přídatných materiálů, plynů, postupů svařování a záznamů průběhů svařování jednotlivých svarů. [11]

2.5 Únava materiálu

Únava materiálu je proces, při kterém dochází při zatěžování kmitavým napětím k jeho strukturním změnám, a tím i ke změně vlastností tohoto materiálu. Mezním stavem únavy materiálu je definován stav, při kterém v důsledku působení časově proměnných dynamických zatížení dojde k poruše funkční způsobilosti součásti. Pro tento proces je charakteristické, že k této poruše dochází při mnohem nižší maximální hladině kmitavého napětí, než je statická pevnost daného dílu. [12]

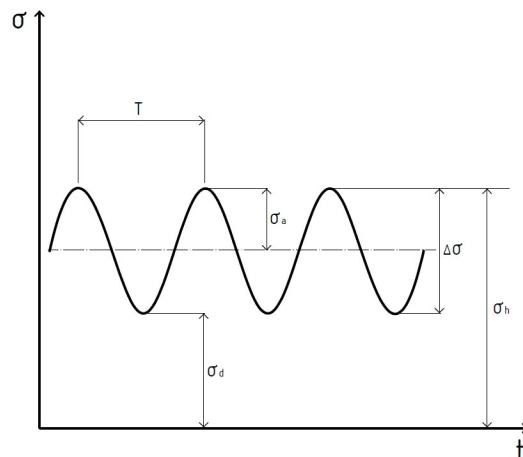
Při zkoumání únavy materiálu se vychází z pěti základních empirických závěrů, učiněných německým inženýrem Augustem Wöhlerem v 19. století a majících platnost dodnes: [12]

- 1) Pro lom součásti, který vzniká v důsledku cyklického zatěžování, je rozhodující počet změn zatížení, nikoli doba provozu.
- 2) Poškození materiálu závisí na rozdílu maximálního a minimálního napětí v nebezpečném místě. Velikost absolutního napětí má až druhořadý vliv.
- 3) Výsledky zkoušek únavy lze znázornit křivkami v souřadnicích napětí a počtu cyklů (Wöhlerova křivka).
- 4) Z experimentálních výsledků lze stanovit takové mezní napětí, pod nímž k únavovým lomům již nedochází (lze stanovit mez únavy materiálu).
- 5) Geometrické vruby snižují únavovou pevnost o hodnotu závislou na tvaru vrubu a typu materiálu.

2.5.1 Kmitavá zatížení

Kmitavá zatížení, jimiž jsou v reálném provozu konstrukce namáhány, mají většinou složitý časový průběh. U točivých strojů se může jednat o průběh cyklický, často však s náhodnou složkou zatížení. U většiny konstrukcí a strojů však převládá náhodný průběh zatížení. V této kapitole jsou uvedeny pouze základní cyklické průběhy napětí, využívané například při testování životnosti

součástí. Typické cyklické napětí, které se vyskytuje např. v rotujícím hřídeli, je zobrazeno na obr. 2.10.



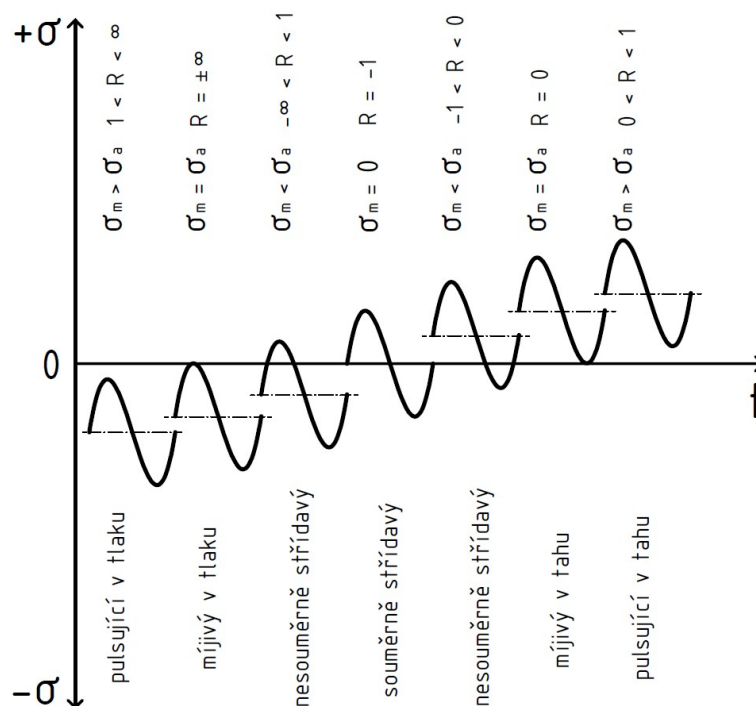
σ_h - horní napětí kmitu [Pa], σ_d - dolní napětí kmitu [Pa], σ_m - střední napětí kmitu [Pa],
 σ_a - amplituda napětí (výkmit) [Pa], $\Delta\sigma$ - rozkmit napětí ($\Delta\sigma = 2 \cdot \sigma_a$) [Pa], T - perioda kmitu [s]

Obr. 2.10 Cyklické napětí

Velikost kmitu lze jednoznačně určit pomocí dvou hodnot σ_a , σ_m , případně pomocí σ_h , σ_d . Velice často se také k popisu zatížení užívá koeficientu asymetrie cyklu R , který lze určit ze vztahu dle vzorce (2.2).

$$R = \frac{\sigma_d}{\sigma_h} \quad (2.2)$$

Na obr. 2.11 jsou znázorněny různé typy kmitavých napětí a jejich velikosti středního napětí σ_m a asymetrie cyklu R .



Obr. 2.11 Typy kmitů dle asymetrie cyklu [12]

Při dimenzování a únavové kontrole součástí se obvykle pracuje se středním napětím kmitu σ_m a amplitudou napětí σ_a . Pro ně platí následující vztahy (2.3) a (2.4).

$$\sigma_m = \frac{1}{2}(\sigma_h + \sigma_d) = \frac{\sigma_h}{2}(1 + R) \quad (2.3)$$

$$\sigma_a = \frac{1}{2}(\sigma_h - \sigma_d) = \frac{\sigma_h}{2}(1 - R) \quad (2.4)$$

Při únavových zkouškách součástí či konstrukcí se mimo jednostupňových zkoušek, které probíhají při konstantní střední hodnotě napětí a za konstantní amplitudy, užívají i zkoušky vícestupňové, které probíhají na několika napětěvých hladinách. [12]

2.5.2 Wöhlerova křivka

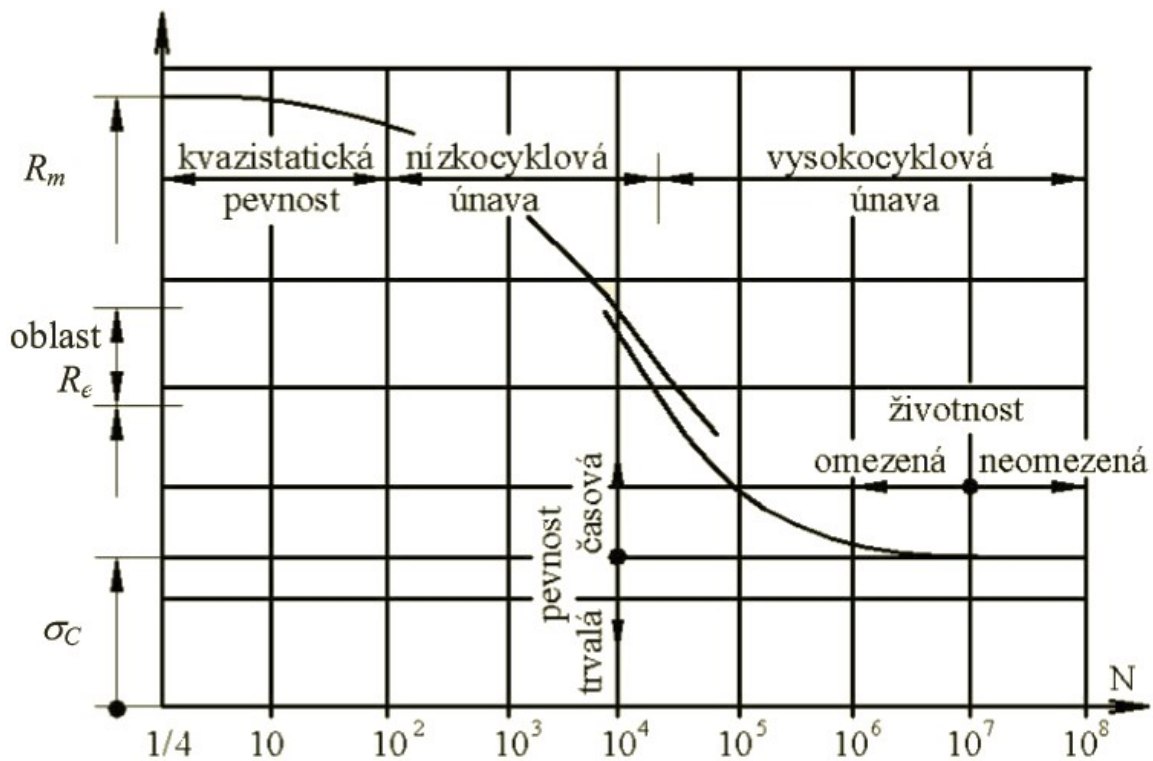
Statisticky vyhodnocená experimentální únavová křivka napětí, získaná při amplitudě nominálního napětí σ_a , s počtem kmitů při poruše vzorku N , je nazývána jako Wöhlerova křivka. Tato křivka je prvotní informací o únavových vlastnostech daného materiálu, a to včetně meze únavy daného materiálu σ_c . Výhodně se znázorňuje v semilogaritmickém systému souřadnic, kde se zpravidla vynáší na svislou osu amplituda nominálního napětí σ_a a na vodorovnou osu logaritmus počtu kmitů při poruše vzorku $\log(N)$. Případně se může znázorňovat i v logaritmickém systému souřadnic. Takto znázorněné základní křivky únavového života jsou výsledkem zátěžových zkoušek se stálou hodnotou středního napětí σ_m , nebo se stálým koeficientem asymetrie cyklu R .

Na obr. 2.12 je uvedena Wöhlerova křivka v základních souřadnicích. Tato křivka vymezuje dvě oblasti. První oblastí je oblast trvalé pevnosti (dlouhodobé), druhou je oblast časované pevnosti. Hranice mezi těmito oblastmi je tvořena mezí únavy daného materiálu σ_c . Mez únavy je kmitavé napětí $\sigma_m \pm \sigma_a$ příslušející meznímu výkmitu σ_a , při daném středním napětí kmitu σ_m . Mezní výkmit je amplituda napětí na mezi únavy, při němž při konstantní hodnotě středního napětí zkušební vzorek ještě vydrží předepsaný počet kmitů. Ten bývá stanoven smluvně, často však bývá požadována neomezená životnost součásti, proto se většinou za předepsaný počet kmitů volí hodnota na hranici mezi omezenou a neomezenou životností $N_c = 10^7$ kmitů. Tato hodnota se používá pro stanovení meze únavy ocelí, litin, mědi a jejich slitin a je doporučena normou ČSN 42 0363. [13]

Časované a trvalé pevnosti odpovídá na vodorovné ose tzv. omezená a neomezená životnost. Druhé kritérium rozděluje únavu z hlediska počtu kmitů do poruchy na tři oblasti, viz obr. 2.12. Jedná se o následující oblasti [12]:

- 1) **Oblast kvazistatického lomu** – V této oblasti dochází k porušení vzorku již při prvním výkmitu zatížení nebo nejvýše po několik desítkách cyklů. Nejedná se zde o únavový proces, neboť růst lomové plochy je velice rychlý. Plocha nese znaky tvárného lomu, stejně jako při statickém porušení.

- 2) **Oblast nízkocyklové únavy** – Do této oblasti spadají životnosti v rozmezí 10^2 až $5 \cdot 10^4$ kmitů. Napětí ve vzorku jsou tak velká, že vznikají cyklické plastické deformace materiálu. Na horní hranici této oblasti dochází k nespojitosti Wöhlerovy křivky v oblasti meze kluzu materiálu, viz obr. 2.12, která svědčí o odlišnostech mechanismu porušování materiálu. Nízkocyklový únavový lom má pod mikroskopem pozorovatelnou zpravidla hrubší strukturu s interkrystalickým průběhem lomu a s výraznými stopami po plastické deformaci.
- 3) **Oblast vysokocyklové únavy** – Tato oblast zahrnuje životnosti vyšší než přibližně $5 \cdot 10^4$ kmitů. Pokud dojde k únavovému lomu, je pro něj charakteristický hladký vzhled s transkrystalickou strukturou bez patrných známek plastické deformace. Je velice snadno odlišitelný od zbylé části lomové plochy, která se vytvoří náhlým kvazistatickým dotržením průřezu s podílem plastických deformací.



Obr. 2.12 Oblasti únavy materiálu [12]

3 Experimentální část

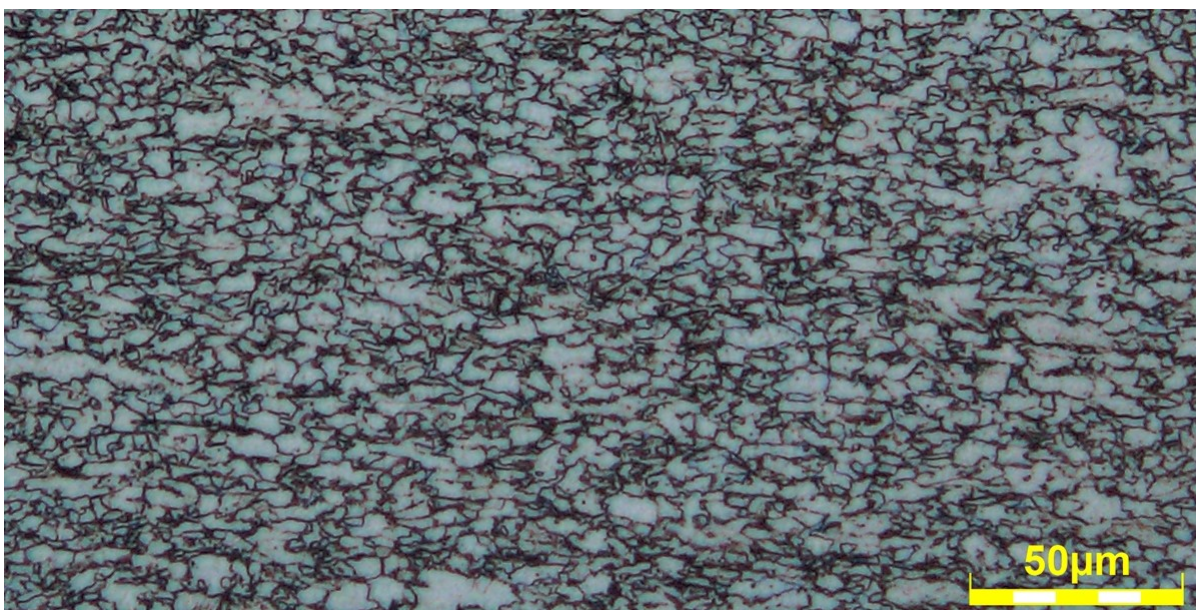
Experimentální část byla zaměřena na zkoumání míry vlivu procesu svařování na změny únavové životnosti svarového spoje u testovaného materiálu S460MC. Posuzování tohoto vlivu bylo provedeno u dvou typů svarových spojů, a to u svarových spojů koutových a svarových spojů tupých. Samotný experiment se zabíral přípravou polotovarů pro svařování, navržením samotných svarových spojů, procesních parametrů svařování a následným vyhodnocováním kvality svarových spojů z pohledu jejich geometrie. Takto zhotovené svarové spoje byly poté testovány na únavovou životnost.

3.1 Testovaný materiál

Jako základní materiál byla na veškeré experimenty použita ocel S460MC. Jedná se o ocel konstrukční, termomechanicky zpracovanou, jemnozrnnou. Tento materiál byl vybrán na základě širokého spektra jeho využití, a v neposlední řadě taktéž z hlediska jeho chemického složení, které zaručuje dobrou svařitelnost. Chemické složení materiálu zjištěné na spektrometru Q4 TASMAN je uvedeno v tab. 3.1. Struktura základního materiálu je zobrazena na obr. 3.1.

Tab. 3.1 Chemické složení materiálu S460MC

Chemické prvky	C	Mn	Si	P	S	Nb	W	Ni	V	Cu	Al	Pb	Cr	Ti
Koncentrace [hm. %]	0,07	1,32	0,01	0,03	0,01	0,05	0,04	0,04	0,08	0,02	0,03	0,05	0,01	0,01



Obr. 3.1 Struktura základního materiálu S460MC

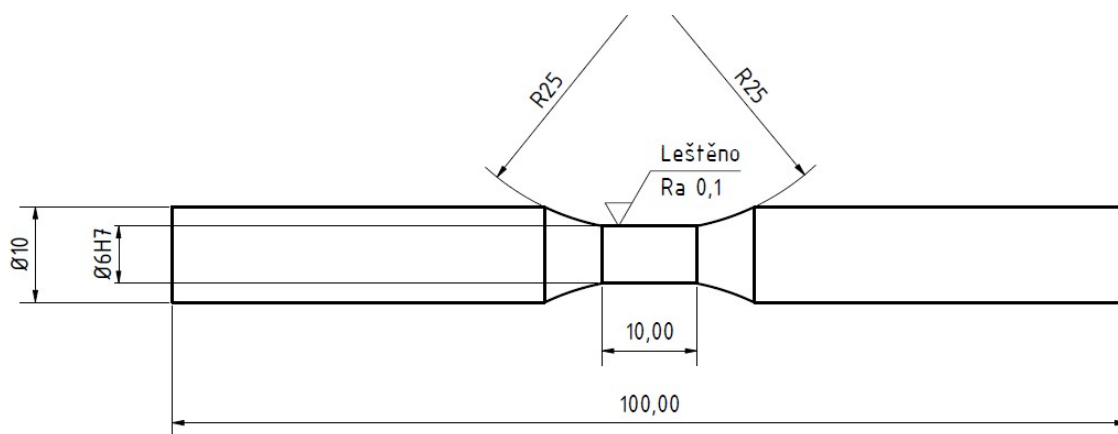
Zjištěné hodnoty ze spektrometru jsou v souladu s normou ČSN EN 10149-2 udávající chemické složení tavby konstrukčních termomechanicky zpracovaných ocelí. Dále byla provedena zkouška tahem pro zjištění mechanických vlastností dodaného materiálu. Výsledky této zkoušky jsou uvedeny a porovnány s mezními hodnotami mechanických vlastností uvedených v normě ČSN EN 10149-2, viz tab. 3.2.

Tab. 3.2 Mechanické vlastnosti materiálu S460MC

	Mez kluzu Re_H [MPa]	Mez pevnosti R_m [MPa]	Homogenní tažnost A_g [%]	Tažnost A [%]
Hodnoty uváděné normou	min. 460	520 - 670	-	min. 17
Hodnoty získané ze zkoušky tahem	544	629	13,15	29,03

Ocel byla dodána ve formě plechu o velikosti 3000 x 1500 x 10 mm, z něhož byly pomocí plazmového dělení připraveny pásy jmenovitých rozměrů 1500 x 250 x 10 mm. Tyto pásy byly dále rozřezány na pásové pile a frézovány tak, aby bylo docíleno výsledného tvaru a požadovaných rozměrů polotovarů pro následné svařování. Rozměry a příprava vzorků pro svařování jsou uvedeny v kapitole 3.2.

Aby bylo možné posoudit vliv svařovacího cyklu na změny únavové životnosti spoje, musela být nejprve stanovena únavová životnost neovlivněného základního materiálu. Proto byla nejprve změřena Wöhlerova křivka základního materiálu S460MC. Pro experimenty byly navrženy vzorky kruhového průřezu v souladu s normou ČSN EN 3987, viz obr. 3.2.



Obr. 3.2 Zkušební těleso pro testy vysokocyklové únavy

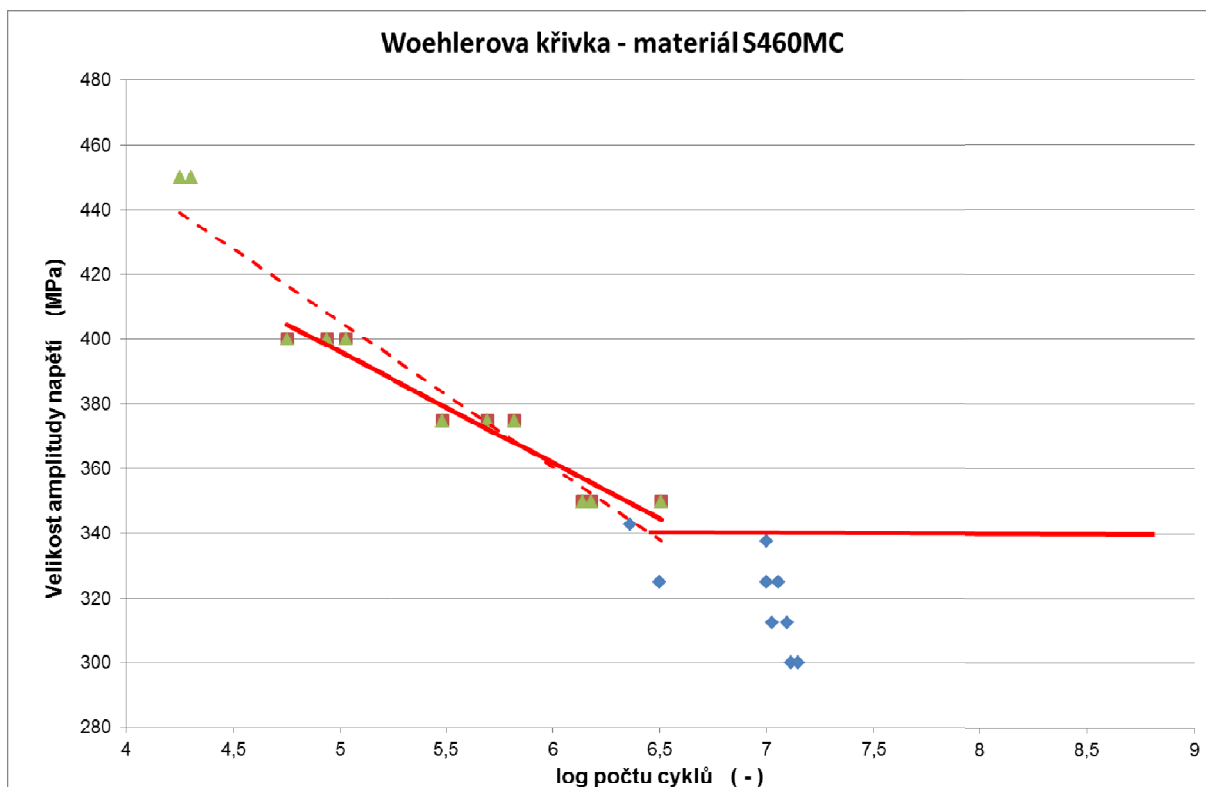
Veškeré cyklické testy základního materiálu byly provedeny na servohydraulickém zkušebním zařízení INOVA FU-O-1600-V2, s maximálně dosažitelným silovým zatížením 100 kN v režimu řízené síly. Vzorky byly testovány na vybraných napětových hladinách střídavým symetrickým průběhem namáhání s asymetrií cyklu $R = -1$. Velikost amplitudy napětí byla udržována konstantní pro každou

napětovou hladinu. Kritérium pro ukončení testu bylo lomové porušení vzorku, nebo případné překonání desetimilionové hranice počtu cyklů, kde již lze vzorek považovat za nekonečně trvanlivý.

Zvolené napěťové hladiny a hodnoty naměřené při cyklickém zatěžování základního materiálu jsou uvedeny v tab. 3.3. Získané výsledky byly zpracovány graficky ve formě Wöhlerovy křivky základního materiálu tak, jak je ukázáno na obr. 3.3. Na základě dosažených výsledků byla stanovena mez únavy $\sigma_c = 340$ MPa základního materiálu S460MC.

Tab. 3.3 Výsledky měření vysokocyklové únavy základního materiálu

Vzorek	Ød [mm]	Zatížení			Počet cyklů [1]	Porušení vzorku
		σ_H [MPa]	σ_A [MPa]	$\Delta\sigma$ [MPa]		
1	6,02	0,00	300,00	600,00	> 13 000 000	Ne
2	6,01	0,00	300,00	600,00	> 14 000 000	Ne
3	6,00	0,00	312,50	625,00	> 10 000 000	Ne
4	6,01	0,00	312,50	625,00	> 10 000 000	Ne
5	6,01	0,00	325,00	650,00	3 163 211	Ano
6	6,02	0,00	325,00	650,00	> 10 000 000	Ne
7	6,01	0,00	325,00	650,00	> 10 000 000	Ne
8	6,00	0,00	337,50	675,00	> 10 000 000	Ne
9	6,00	0,00	343,00	686,00	2 200 147	Ano
10	6,02	0,00	343,00	686,00	> 10 000 000	Ne
11	6,00	0,00	350,00	700,00	1 376 010	Ano
12	6,00	0,00	350,00	700,00	1 513 167	Ano
13	6,01	0,00	350,00	700,00	3 212 942	Ano
14	6,02	0,00	375,00	750,00	495 236	Ano
15	6,02	0,00	375,00	750,00	663 051	Ano
16	6,00	0,00	375,00	750,00	304 303	Ano
17	6,01	0,00	400,00	800,00	56 316	Ano
18	6,01	0,00	400,00	800,00	106 719	Ano
19	6,01	0,00	400,00	800,00	86 561	Ano
20	6,00	0,00	450,00	900,00	20 135	Ano
21	6,01	0,00	450,00	900,00	17 789	Ano



Obr. 3.3 Wöhlerova křivka základního materiálu

3.2 Svařování vzorků pro zkoušky únavové životnosti svarů

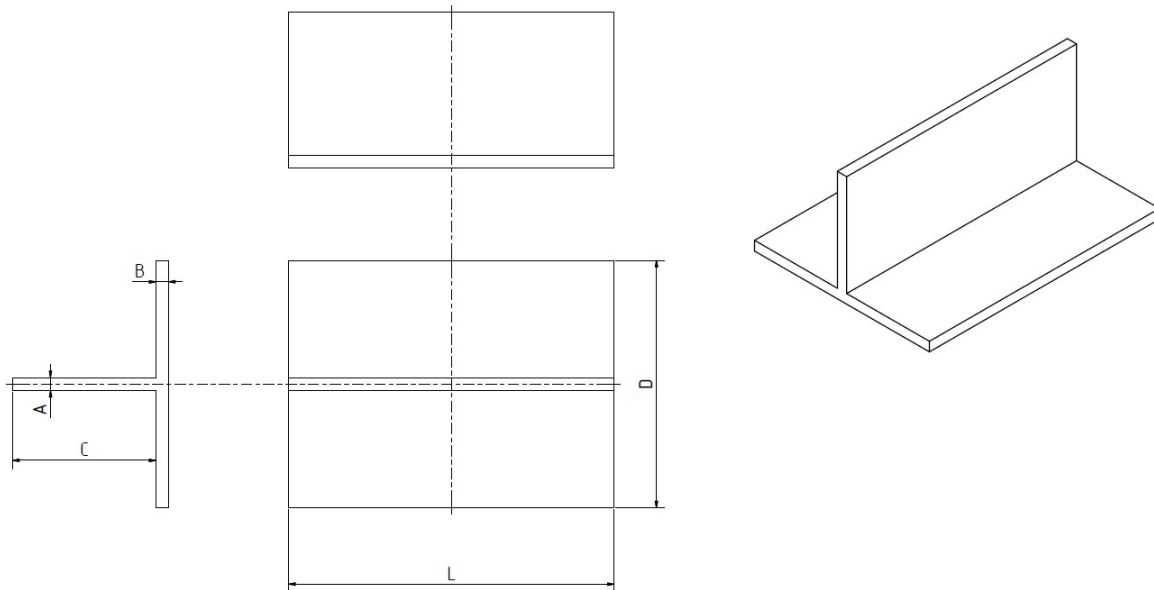
Hlavním cílem práce bylo posoudit, jak se projeví vliv svařování na změny únavové životnosti spojů vytvořených na jemnozrnné oceli S460MC. Z důvodu rozdílné konstrukce a průběhu zatěžovacích sil bylo rozhodnuto provést únavové zkoušky pro tupé i koutové svary.

3.2.1 Příprava vzorků pro svařování koutových svarů

Jako první byly zhotoveny koutové svary. Ty byly sestaveny z polotovarů 250 x 190 x 10 mm pro pásnici a 250 x 110 x 10 mm pro stojinu. Stojina byla v místě styku s pásnicí ofrézována tak, aby byl styk stojiny s pásnicí v celé délce rovnoměrný. Stojina i pásnice byly v místě budoucího svaru obroušeny a zbaveny tak okují a rzi. Poté byly oba díly k sobě z čela nabodovány tak, aby byla zajištěna nejen rovnoměrná styková plocha, ale také vzájemná kolmost. Tvar a rozměry svařovaných sestav jsou patrné z obr. 3.4 a z tab. 3.4.

Tab. 3.4 Rozměry svařovaných sestav

Délka svaru L [mm]	250
Výška stojiny C [mm]	110
Tloušťka stojiny A [mm]	10
Tloušťka pásnice B [mm]	10
Šířka pásnice D [mm]	190



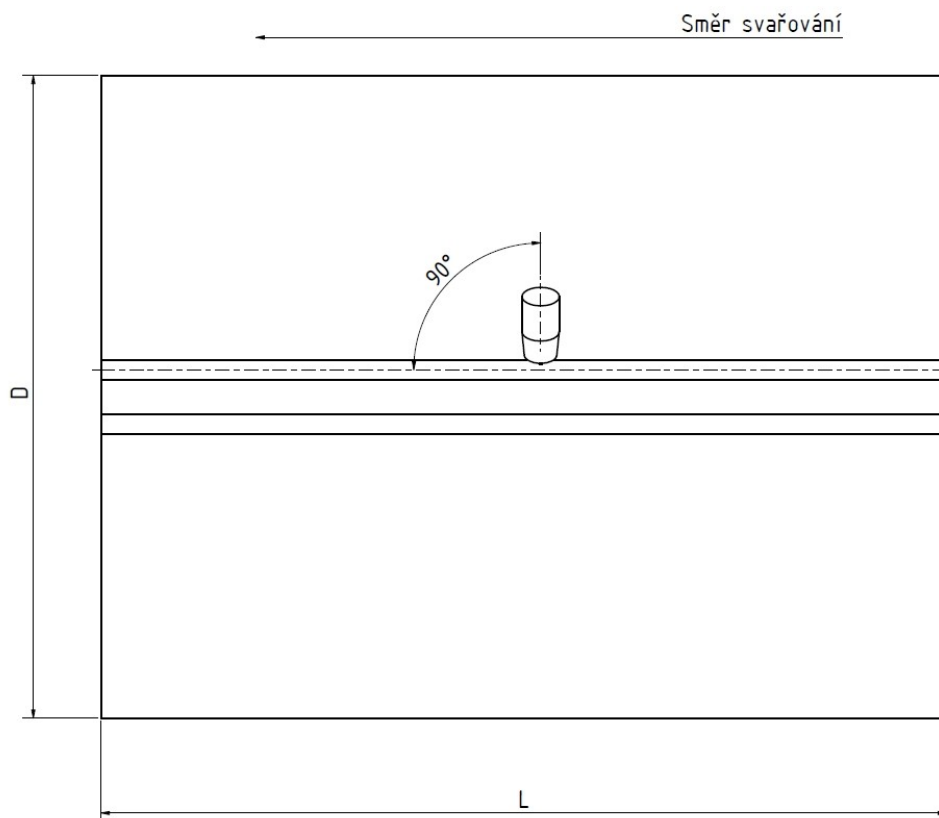
Obr. 3.4 Tvar svařovaných sestav

3.2.2 Svařování a monitorizace koutových svarů

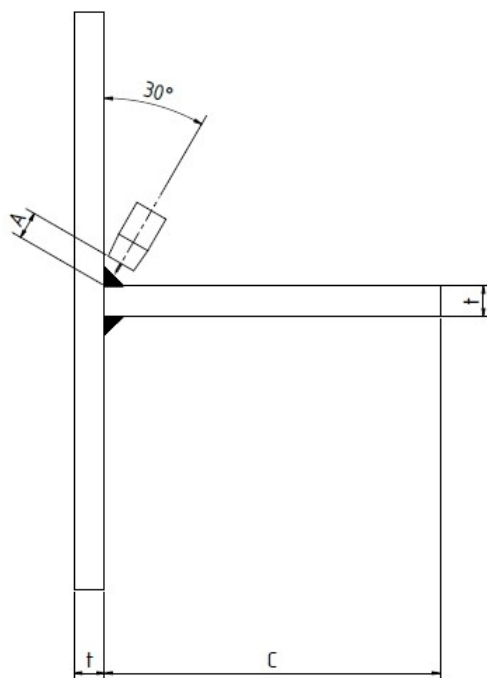
Svařování vzorků pro následné zatěžování bylo provedeno v laboratoři svařování Katedry strojírenské technologie TU v Liberci. Jako svařovací zdroj byl použit BDH 550 Puls Syn. Svařovací metodou byla zvolena metoda MAG – 135 dle ISO 4063, přídavným materiálem byl zvolen materiál OK Autrod 12.51 o průměru drátu 1,2 mm a ochranný plyn byl tvořen směsí argonu a oxidu uhličitého v poměru 82/18 (M21 dle ISO 14175). Rychlost svařování byla zajištěna pomocí lineárního automatu.

Na základě ověřovacích experimentálních zkoušek byly navrženy procesní parametry pro svařování výsledných koutových svarů. Svar byl realizován jako oboustranný, přičemž počátek a konec obou svarových housenek byl identický. Svařování probíhalo v režimu synergie, čili rychlost podávání drátu byla automaticky regulována v závislosti na nastaveném proudu a délce oblouku. K monitorizaci skutečných hodnot svařovacích parametrů byl použit software WeldMonitor s frekvencí záznamu 20 kHz. Celkem byly provedeny čtyři kusy svařenců (označené A - D), ve shodě s obr. 3.4, s kompletním sledováním procesních parametrů.

Geometrie nastavení hubice hořáku byla volena tak, aby osa hubice hořáku svírala se směrem kolmým na směr svařování úhel 90° a s rovinou pásnice úhel 30° . Grafické znázornění polohy hubice je patrné z obr. 3.5 a obr. 3.6. Vzdálenost kontaktní špičky byla měřena od místa styku stojiny a pásnice. Tato vzdálenost je na obr. 3.6 označena **A**.



Obr. 3.5 Grafické znázornění polohy hubice hořáku



Obr. 3.6 Grafické znázornění polohy hubice hořáku

Vlastní svařování experimentálních vzorků proběhlo s hodnotami nastavenými ve shodě s údaji uvedenými v tab. 3.5.

Tab. 3.5 Nastavované parametry svařování vzorků A, B, C, D

Parametr	1. housenka	2. housenka
Vzdálenost kontaktní špičky hořáku [mm]	15	15
Svařovací proud [A]	315	315
Rychlost svařování [m.min ⁻¹]	0,5	0,5
Program svářečky v režimu synergie	P6	P6
Průtok plynu [l.min ⁻¹]	12	12

Hodnoty svařovacích parametrů zaznamenané během procesu svařování systémem WeldMonitor jsou pro jednotlivé vzorky uvedeny v tab. 3.6 – tab. 3.9.

Tab. 3.6 Skutečné parametry svařování vzorku A naměřené softwarem WeldMonitor

Parametr	1. housenka	2. housenka
Svařovací proud [A]	352,3	352,2
Svařovací napětí [V]	29,8	29,8
Rychlost svařování [m.min ⁻¹]	0,5	0,5
Rychlost podávání drátu [m.min ⁻¹]	10,044	10,050
Průtok plynu [l.min ⁻¹]	12,0	12,0
Celkově vnesené teplo [kJ.cm ⁻¹]	10,583	10,580
Účinnost přenosu tepla [1]	0,84	0,84
Způsob přenosu kovu v oblouku	bezzkratový	bezzkratový

Tab. 3.7 Skutečné parametry svařování vzorku B naměřené softwarem WeldMonitor

Parametr	1. housenka	2. housenka
Svařovací proud [A]	352,3	351,3
Svařovací napětí [V]	29,8	29,8
Rychlost svařování [m.min ⁻¹]	0,5	0,5
Rychlost podávání drátu [m.min ⁻¹]	10,050	10,051
Průtok plynu [l.min ⁻¹]	12,0	12,0
Celkově vnesené teplo [kJ.cm ⁻¹]	10,583	10,552
Účinnost přenosu tepla [1]	0,84	0,84
Způsob přenosu kovu v oblouku	bezzkratový	bezzkratový

Tab. 3.8 Skutečné parametry svařování vzorku C naměřené softwarem WeldMonitor

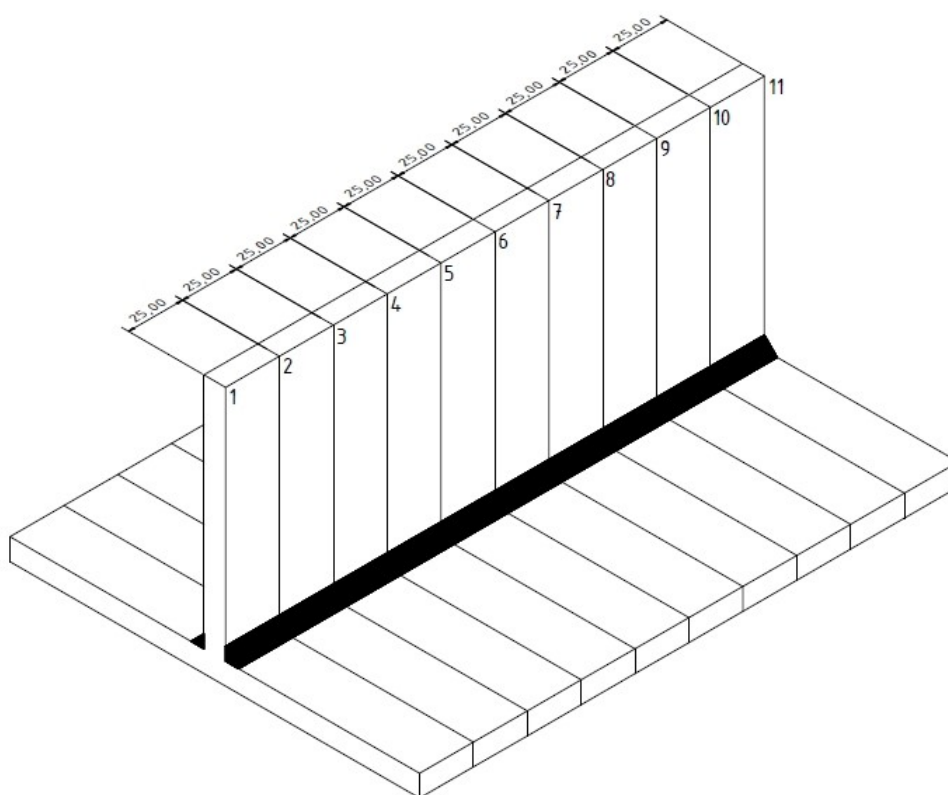
Parametr	1. housenka	2. housenka
Svařovací proud [A]	351,6	352,3
Svařovací napětí [V]	29,8	29,8
Rychlost svařování [m.min ⁻¹]	0,5	0,5
Rychlost podávání drátu [m.min ⁻¹]	10,060	10,027
Průtok plynu [l.min ⁻¹]	12,0	12,0
Celkově vnesené teplo [kJ.cm ⁻¹]	10,561	10,583
Účinnost přenosu tepla [1]	0,84	0,84
Způsob přenosu kovu v oblouku	bezzkratový	bezzkratový

Tab. 3.9 Skutečné parametry svařování vzorku D naměřené softwarem WeldMonitor

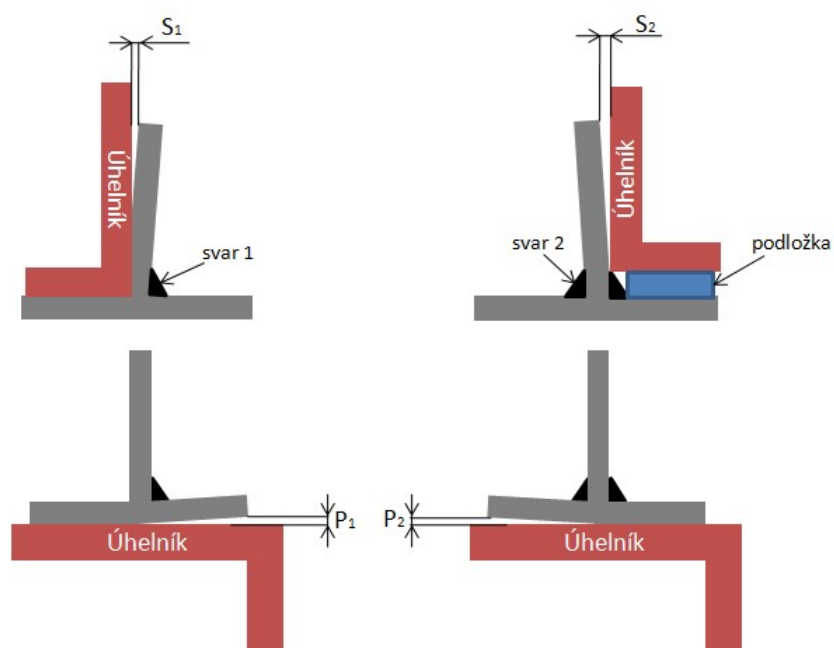
Parametr	1. housenka	2. housenka
Svařovací proud [A]	352,6	354,3
Svařovací napětí [V]	29,8	29,7
Rychlost svařování [m.min ⁻¹]	0,5	0,5
Rychlost podávání drátu [m.min ⁻¹]	10,054	10,043
Průtok plynu [l.min ⁻¹]	12,0	12,0
Celkově vnesené teplo [kJ.cm ⁻¹]	10,592	10,643
Účinnost přenosu tepla [1]	0,84	0,84
Způsob přenosu kovu v oblouku	bezzkratový	bezzkratový

3.2.3 Metalografické vyhodnocení a měření deformací koutových svarů

Pro zjištění vlivu svarových spojů na tvarové změny svařované sestavy bylo provedeno měření deformací stojiny i pásnice. Měření bylo provedeno na obou koncích pásnice a na vrchní části stojiny. Deformace byly měřeny, od místa počátku svařování, na 11 místech vzdálených od sebe 25 mm, a to po každé svarové housence. Způsob měření deformací za pomoci úhelníku a posuvného měřítka je zobrazen na obr. 3.7 a obr. 3.8. V tab. 3.10 - tab. 3.13 jsou pro vzorky A až D uvedeny hodnoty deformací stojiny a pásnice po svaření první a druhé housenky.



Obr. 3.7 Znárodnění polohy míst měření deformací



Obr. 3.8 Znárodnění způsobu měření deformací stojiny a pásnice

Tab. 3.10 Hodnoty deformací vzorku A

Místo měření	Vzdálenost od okraje [mm]	Deformace stojiny po housence 1 S_1 [mm]	Deformace stojiny po housence 2 S_2 [mm]	Deformace pásnice po housence 1 P_1 [mm]	Deformace pásnice po housence 2 P_2 [mm]
0	0	1,58	0,92	1,84	4,37
1	25	1,75	0,95	1,71	4,46
2	50	1,92	1,06	1,75	4,36
3	75	1,69	1,30	2,12	4,66
4	100	1,66	1,31	2,18	4,45
5	125	1,82	1,29	2,20	4,35
6	150	1,72	1,43	2,24	4,79
7	175	2,00	1,32	2,14	4,51
8	200	2,36	1,39	2,04	4,79
9	225	2,10	1,35	1,97	4,72
10	250	2,14	1,27	2,33	4,61

Tab. 3.11 Hodnoty deformací vzorku B

Místo měření	Vzdálenost od okraje [mm]	Deformace stojiny po housence 1 S_1 [mm]	Deformace stojiny po housence 2 S_2 [mm]	Deformace pásnice po housence 1 P_1 [mm]	Deformace pásnice po housence 2 P_2 [mm]
0	0	1,13	1,02	1,60	3,72
1	25	1,19	0,96	1,85	3,84
2	50	1,23	0,84	1,75	4,09
3	75	1,46	0,94	2,27	4,40
4	100	1,69	0,99	2,28	4,55

5	125	1,98	0,99	2,66	4,46
6	150	2,04	1,09	2,53	5,50
7	175	2,16	1,45	1,91	4,16
8	200	2,24	1,51	2,22	4,56
9	225	2,34	1,53	2,20	4,76
10	250	2,57	1,79	2,04	4,80

Tab. 3.12 Hodnoty deformací vzorku C

Místo měření	Vzdálenost od okraje [mm]	Deformace stojiny po housence 1 S_1 [mm]	Deformace stojiny po housence 2 S_2 [mm]	Deformace pásnice po housence 1 P_1 [mm]	Deformace pásnice po housence 2 P_2 [mm]
0	0	2,03	0,61	2,16	4,17
1	25	2,26	0,67	2,40	4,22
2	50	2,25	0,63	2,28	4,35
3	75	2,39	0,49	2,55	4,64
4	100	2,65	0,57	2,36	4,67
5	125	2,82	0,54	2,59	4,78
6	150	2,58	0,55	2,62	4,78
7	175	2,60	0,59	2,75	5,01
8	200	2,53	0,61	2,63	4,87
9	225	2,41	0,66	2,59	4,80
10	250	2,53	0,82	2,34	4,57

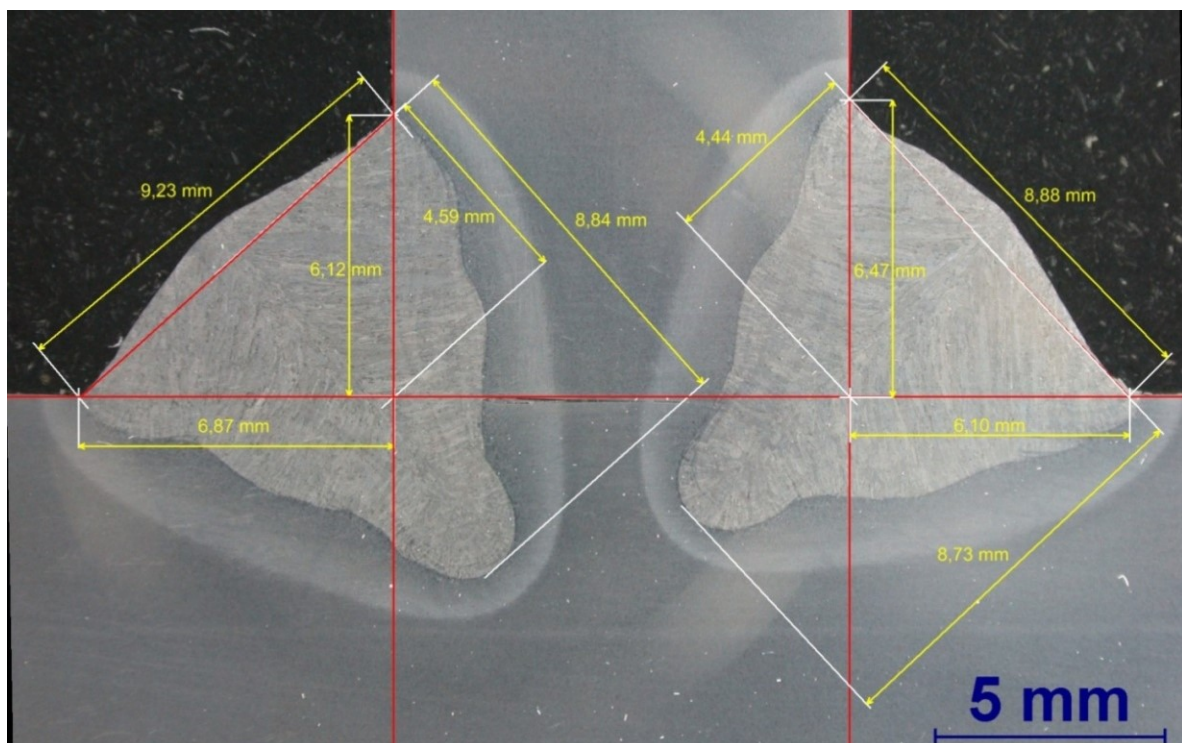
Tab. 3.13 Hodnoty deformací vzorku D

Místo měření	Vzdálenost od okraje [mm]	Deformace stojiny po housence 1 S_1 [mm]	Deformace stojiny po housence 2 S_2 [mm]	Deformace pásnice po housence 1 P_1 [mm]	Deformace pásnice po housence 2 P_2 [mm]
0	0	1,78	1,04	1,82	4,21
1	25	1,82	1,11	1,99	4,39
2	50	1,78	1,01	2,13	4,42
3	75	1,94	1,01	2,25	4,65
4	100	1,97	0,95	2,31	4,84
5	125	2,07	1,03	2,29	4,71
6	150	2,37	1,26	2,32	4,55
7	175	2,21	1,36	2,29	4,59
8	200	1,82	1,24	2,17	4,67
9	225	1,67	1,15	2,21	4,53
10	250	1,59	1,07	2,05	4,47

V další fázi experimentu se vycházelo z předpokladu, že pokud jsou svařence vyrobeny téměř totožnými parametry a také deformace jednotlivých vzorků odpovídají, pak tyto vzorky budou mít stejnou nebo pouze zanedbatelně se lišící geometrii svarových housenek. Stejná teze byla uplatněna

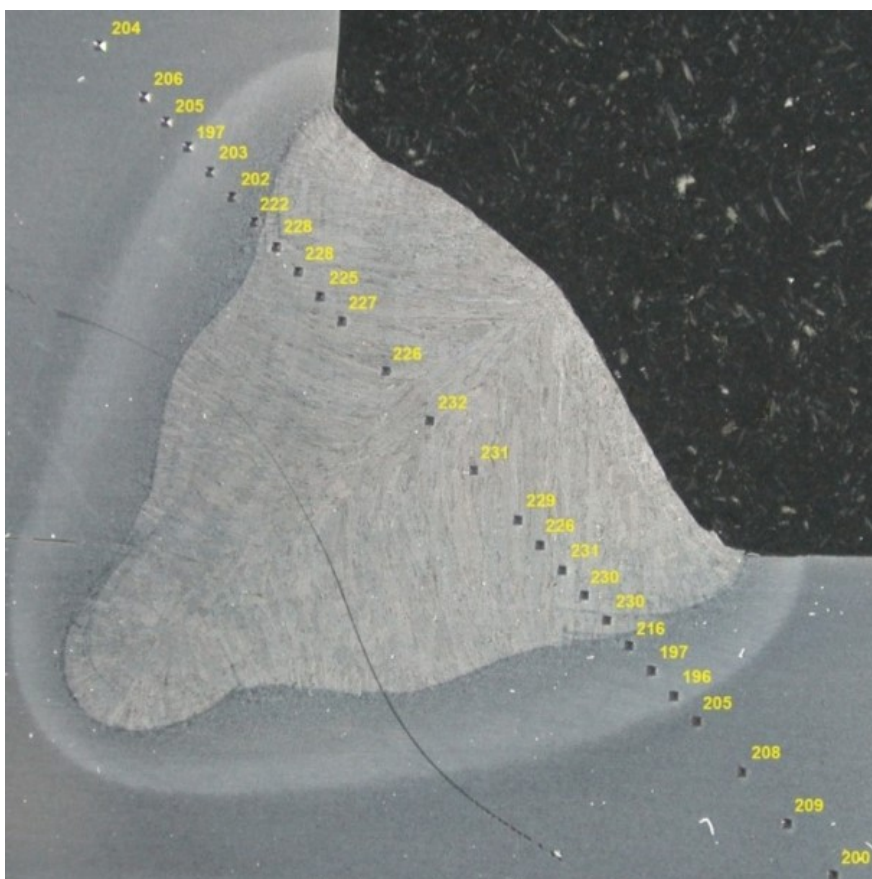
při měření tvrdosti napříč svarovým spojem. Proto bylo vyhodnocení geometrie a tvrdosti provedeno pouze na vzorku A, viz obr. 3.9 a obr. 3.10.

Pro kontrolu kvality svaru a definici geometrie svarové housenky bylo zapotřebí určit její charakteristické rozměry. Tyto rozměry byly určeny z fotografie makrovýbrusu pomocí softwaru pro optickou analýzu NIS Elements AR 3.2. Vzorky pro makrovýbrusy byly odebírány ve vzdálenosti 40 mm od počátku svaru, viz obr. 3.7. Vzorky pro hodnocení geometrie svaru byly připraveny běžným metalografickým postupem. Pro zvýraznění struktury bylo použito leptadlo 3% Nital, tj. 3% roztok kyseliny dusičné v lihu.



Obr. 3.9 Makrovýbrus oboustranného koutového svaru vzorku A

Analýza tvrdosti spoje byla provedena v souladu s normou ČSN EN ISO 9015-1. Měření tvrdosti bylo provedeno na tvrdoměru Qness Q30A metodou HV5. Hodnoty jsou zaznamenány na následujícím obrázku, viz obr. 3.10. Z naměřených hodnot je patrné, že v tepelně ovlivněné oblasti materiálu dochází k pouze nepatrným změnám hodnot tvrdosti. To je zapříčiněno nízkým obsahem uhlíku v základním materiálu, a tedy i malým množstvím vzniklého martenzitu v důsledku procesu svařování.



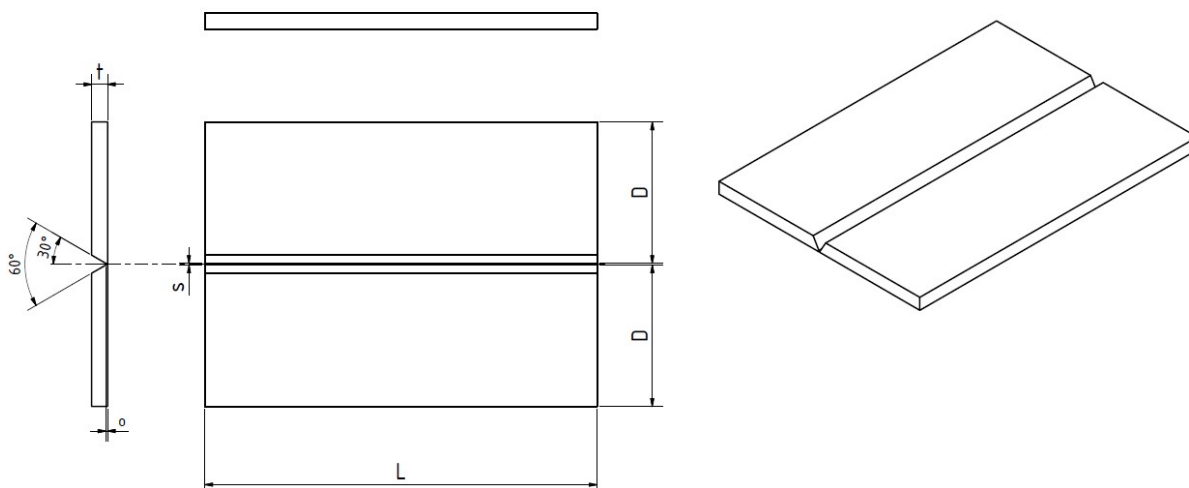
Obr. 3.10 Hodnoty tvrdosti napříč svarovým spojem

3.2.4 Příprava vzorků pro svařování tupých svarů

Polotovary pro zhotovení tupých svarů byly připraveny stejným způsobem jako polotovary pro zhotovení svarů koutových. Jednotlivé díly byly získány dělením na pásové pile s následným frézováním funkčních ploch na požadovanou geometrii, drsnost a rozměr. Rozměry a tvar svařovaných sestav jsou patrné z následující tab. 3.12 a obr. 3.11.

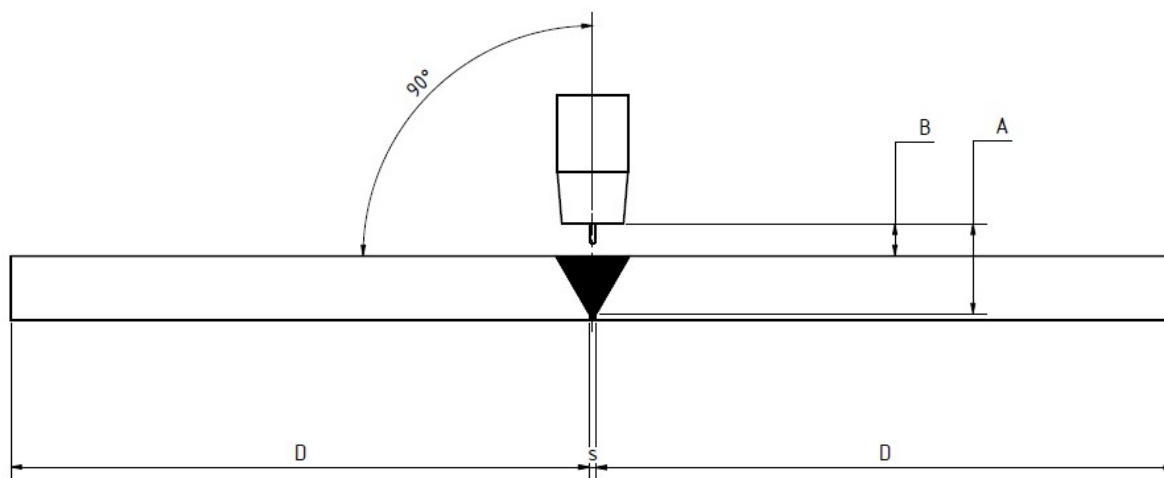
Tab. 3.12 Rozměry svařovaných sestav

Délka svaru L [mm]	250
Šířka pásnice D [mm]	80
Tloušťka pásnice t [mm]	10
Šířka svarové mezery s [mm]	1,1
Velikost otupení o [mm]	1,5
Úhel rozevření α [°]	60

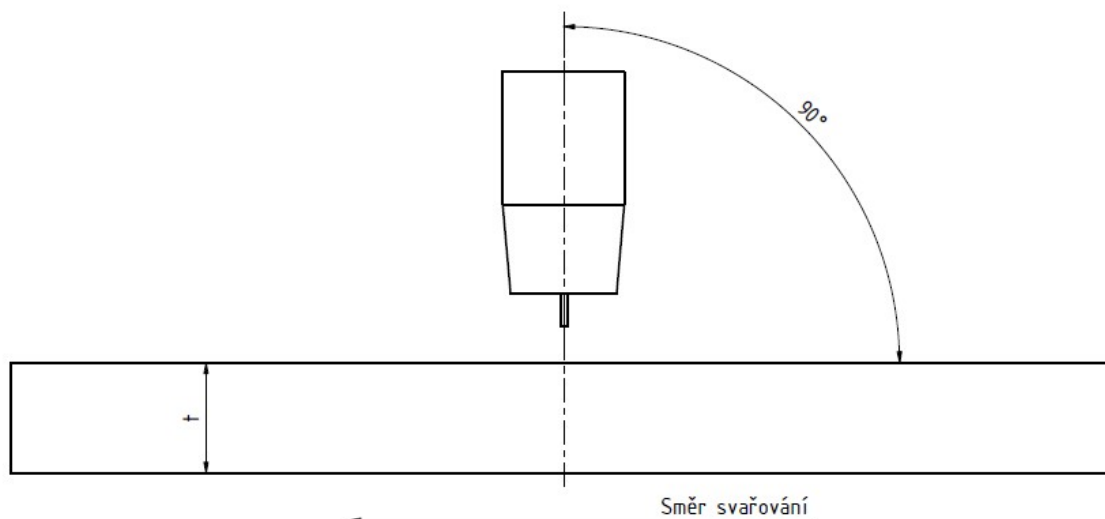


Obr. 3.11 Tvar svařovaných sestav

Geometrie nastavení hubice hořáku byla volena tak, aby osa hubice hořáku svírala se směrem svařování i ve směru kolmém na směr svařování úhel 90° . Grafické znázornění polohy hubice je patrné z obr. 3.12 a obr. 3.13. Vzdálenost kontaktní špičky byla měřena od vrchní plochy svařovaného materiálu a na obr. 3.12 je označována jako **B**.



Obr. 3.12 Grafické znázornění polohy hubice hořáku



Obr. 3.13 Grafické znázornění polohy hubice

Tupé svary byly svařovány stejnou metodou MAG – 135 dle ISO 4063, jako svary koutové, s totožným přídatným materiálem a ochranným plynem. Celkem bylo zhotoveno pět kusů svařenců, viz obr. 3.11, s kompletním sledováním parametrů svařování. Samotný svar byl koncipován jako třívrstvý. Na základě předběžných experimentálních zkoušek byly navrženy procesní parametry pro svařování tupých svarů. Tyto zkoušky jsou demonstrovány na vzorcích E, F a G. Vzorky H a I zastupují výsledné vzorky použité pro geometrické vyhodnocení a zkoušky vysokocyklové únavy. Proces svařování probíhal v režimu synergie a k monitorování skutečných hodnot svařovacích parametrů byl opětovně použit software WeldMonitor s rychlostí záznamu 20 kHz. Jednotlivé svařence a jejich svařovací parametry jsou podrobně rozebrány v následujících kapitolách.

3.2.5 Předběžné testy k optimalizaci procesních parametrů tupých svarů

Procesní parametry byly experimentálně optimalizovány na třech vzorcích (E, F, G). Hodnoty nastavovaných svařovacích parametrů pro svařování jednotlivých vzorků jsou uvedeny v tab. 3.13 – tab. 3.15. Skutečné hodnoty procesních parametrů naměřených při svařování předběžných testů jsou uvedeny v tab. 3.16 – tab. 3.18.

Tab. 3.13 Nastavované parametry svařování vzorku E

Parametr	1. housenka	2. housenka	3. housenka
Vzdálenost kontaktní špičky hořáku [mm]	4,5	9	13
Svařovací proud [A]	200	260	280
Rychlost svařování [$m \cdot min^{-1}$]	0,5	0,5	0,5
Program svářečky v režimu synergie	P6	P6	P6
Průtok plynu [$l \cdot min^{-1}$]	15	15	15

Tab. 3.14 Nastavované parametry svařování vzorku F

Parametr	1. housenka	2. housenka	3. housenka
Vzdálenost kontaktní špičky hořáku [mm]	4,5	10	13,5
Svařovací proud [A]	190	280	280
Rychlost svařování [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]	0,5	0,5	0,5
Program svářečky v režimu synergie	P6	P6	P6
Průtok plynu [$\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$]	15	15	15

Tab. 3.15 Nastavované parametry svařování vzorku G

Parametr	1. housenka	2. housenka	3. housenka
Vzdálenost kontaktní špičky hořáku [mm]	4,5	10,5	14,5
Svařovací proud [A]	205	240	280
Rychlost svařování [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]	0,5	0,4	0,45
Program svářečky v režimu synergie	P6	P6	P6
Průtok plynu [$\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$]	15	15	15

Tab. 3.16 Skutečné parametry svařování vzorku E naměřené softwarem WeldMonitor

Parametr	1. housenka	2. housenka	3. housenka
Svařovací proud [A]	215,100	265,900	293,200
Svařovací napětí [V]	20,200	25,300	27,900
Rychlost svařování [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]	0,500	0,500	0,500
Rychlost podávání drátu [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]	5,342	7,677	8,604
Průtok plynu [$\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$]	15,000	15,000	15,000
Celkově vnesené teplo [$\text{kJ}\cdot\text{cm}^{-1}$]	4,380	6,780	8,250
Účinnost přenosu tepla [1]	0,840	0,840	0,840
Způsob přenosu kovu v oblouku	zkratový	na hranici přechodové oblasti	bezzkratový

Tab. 3.17 Skutečné parametry svařování vzorku F naměřené softwarem WeldMonitor

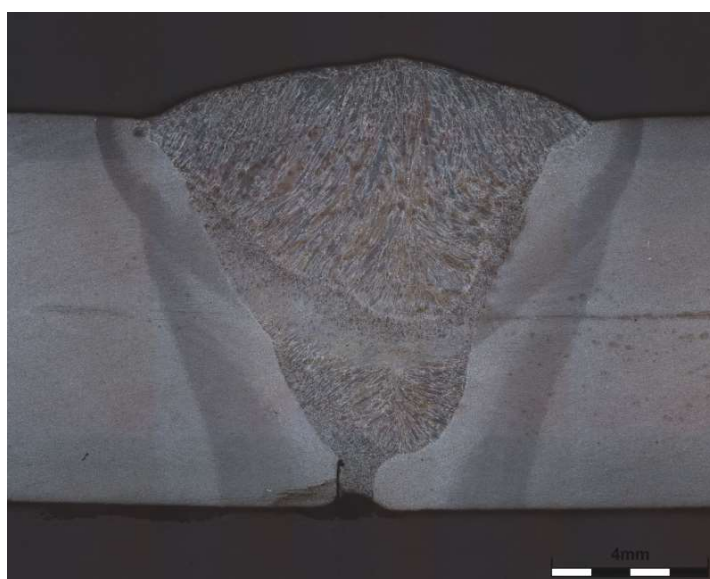
Parametr	1. housenka	2. housenka	3. housenka
Svařovací proud [A]	209,400	294,400	288,200
Svařovací napětí [V]	19,800	27,800	28,100
Rychlost svařování [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]	0,500	0,500	0,500
Rychlost podávání drátu [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]	5,042	8,547	8,554
Průtok plynu [$\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$]	15,000	15,000	15,000
Celkově vnesené teplo [$\text{kJ}\cdot\text{cm}^{-1}$]	4,180	8,170	8,160
Účinnost přenosu tepla [1]	0,840	0,840	0,840
Způsob přenosu kovu v oblouku	zkratový	bezzkratový	bezzkratový

Tab. 3.18 Skutečné parametry svařování vzorku G naměřené softwarem WeldMonitor

Parametr	1. housenka	2. housenka	3. housenka
Svařovací proud [A]	218,300	255,200	291,800
Svařovací napětí [V]	20,300	25,700	27,900
Rychlost svařování [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]	0,500	0,400	0,460
Rychlost podávání drátu [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]	5,306	7,647	8,404
Průtok plynu [$\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$]	15,000	15,000	15,000
Celkově vnesené teplo [$\text{kJ}\cdot\text{cm}^{-1}$]	4,470	8,260	8,920
Účinnost přenosu tepla [1]	0,840	0,840	0,840
Způsob přenosu kovu v oblouku	zkratový	bezzkratový	bezzkratový

Nesprávné zvolení procesních parametrů vede k nedostatečně kvalitnímu svarovému spoji. Na následujícím obr. 3.14, je ukázán makrovýbrus svaru F, na kterém je jasně patrné neprovaření kořenové housenky.

Proto byly v závislosti na dosažených geometriích svarového spoje procesní parametry upraveny tak, aby byl získán dostatečně kvalitní svar. Tyto procesní parametry již zaručovaly správné provedení svarového spoje v celém jeho objemu.



Obr. 3.14 Ukázka špatně provařeného kořene vzorku F

3.2.6 Svařování a monitorizace tupých svarů

Na základě znalostí nabytých z experimentů popsaných v předchozí kapitole, byly navrženy výsledné procesní parametry pro svaření vzorků určených k vysokocyklovému namáhání. Navržené hodnoty procesních parametrů pro svařování vzorků H a I jsou uvedeny v tab. 3.19. Reálné hodnoty naměřené během procesu svařování jsou uvedeny v tab. 3.20 a tab. 3.21. V důsledku špatně

zapojeného zařízení pro snímání rychlosti podávání drátu při svařování první a druhé housenky vzorku H, nejsou u těchto housenek uvedeny hodnoty rychlosti podávání drátu.

Tab. 3.19 Nastavované parametry svařování vzorků H a I

Parametr	1. housenka	2. housenka	3. housenka
Vzdálenost kontaktní špičky hořáku [mm]	4,5	10,5	14,5
Svařovací proud [A]	205	260	280
Rychlost svařování [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]	0,45	0,4	0,45
Program svářečky v režimu synergie	P6	P6	P6
Průtok plynu [$\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$]	15	15	15

Tab. 3.20 Skutečné parametry svařování vzorku H naměřené softwarem WeldMonitor

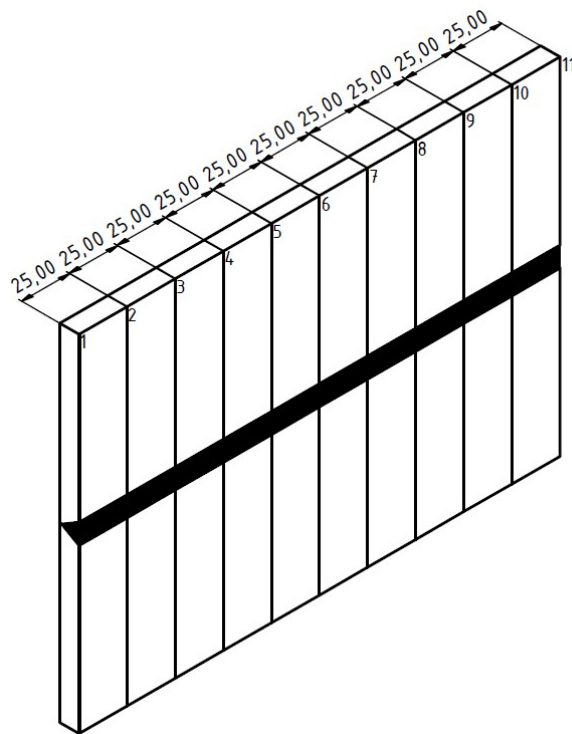
Parametr	1. housenka	2. housenka	3. housenka
Svařovací proud [A]	220,700	260,800	285,600
Svařovací napětí [V]	20,300	25,600	28,200
Rychlost svařování [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]	0,460	0,400	0,460
Rychlost podávání drátu [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]	-	-	8,592
Průtok plynu [$\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$]	15,000	15,000	15,000
Celkově vnesené teplo [$\text{kJ}\cdot\text{cm}^{-1}$]	4,910	8,410	8,820
Účinnost přenosu tepla [1]	0,840	0,840	0,840
Způsob přenosu kovu v oblouku	zkratový	bezzkratový	bezzkratový

Tab. 3.21 Skutečné parametry svařování vzorku I naměřené softwarem WeldMonitor

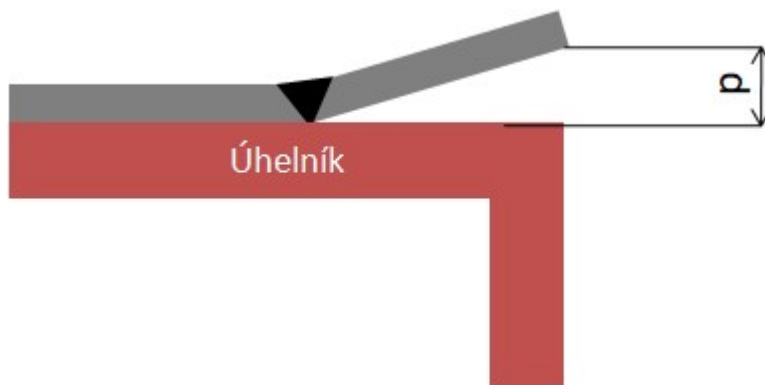
Parametr	1. housenka	2. housenka	3. housenka
Svařovací proud [A]	222,300	260,700	285,100
Svařovací napětí [V]	20,200	25,600	28,300
Rychlost svařování [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]	0,460	0,390	0,460
Rychlost podávání drátu [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]	5,545	7,684	8,612
Průtok plynu [$\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$]	15,000	15,000	15,000
Celkově vnesené teplo [$\text{kJ}\cdot\text{cm}^{-1}$]	4,920	8,620	8,840
Účinnost přenosu tepla [1]	0,840	0,840	0,840
Způsob přenosu kovu v oblouku	zkratový	bezzkratový	bezzkratový

3.2.7 Metalografické vyhodnocení a měření deformací tupých svarů

Ze stejného důvodu jako u svarů koutových bylo provedeno u výsledných vzorků tupých svarů také měření deformací v důsledku svařování. Měření bylo provedeno po celkovém svaření vzorku postupem ukázaným na schematicém obrázku, viz obr. 3.15. Celkově byla deformace měřena na jedenácti místech ve směru svařování vzdálených od sebe 25 mm. Způsob měření deformace pomocí úhelníku po svaření sestavy je ukázán na obr. 3.16. Hodnoty deformací jsou zaznamenány v tab. 3.22 a tab. 3.23.



Obr. 3.15 Znáornění polohy míst měření deformací



Obr. 3.16 Znáornění způsobu měření deformace

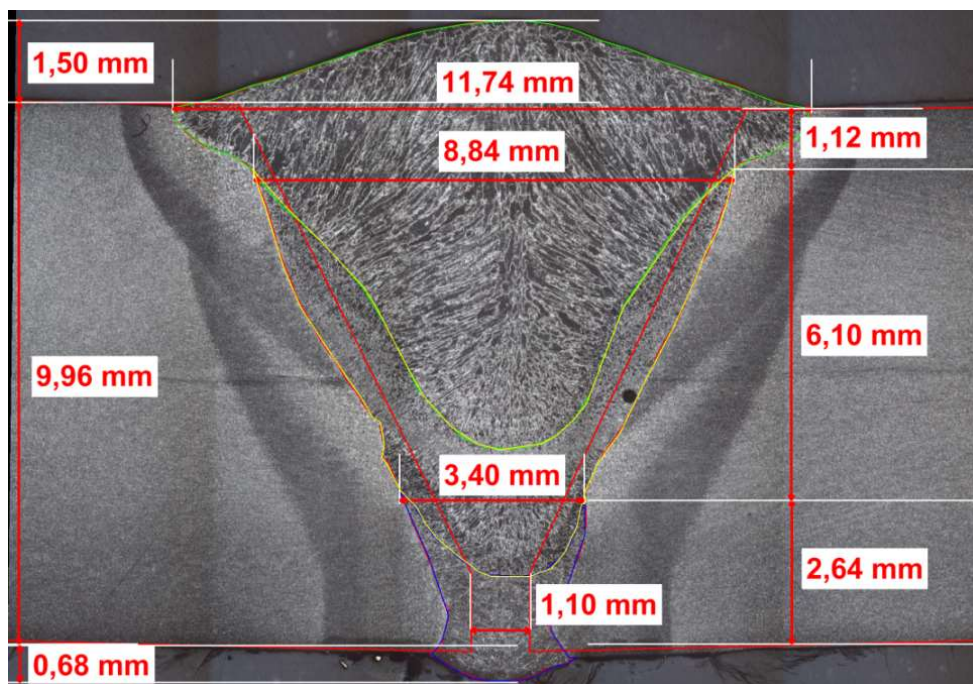
Tab. 3.22 Hodnoty deformací vzorku H

Místo měření	Vzdálenost od okraje vzorku [mm]	Hodnota deformace p [mm]
1	0	5,51
2	25	5,92
3	50	5,85
4	75	5,84
5	100	6,03
6	125	5,90
7	150	5,81
8	175	6,04
9	200	5,97
10	225	6,17
11	250	6,56

Tab. 3.23 Hodnoty deformací vzorku I

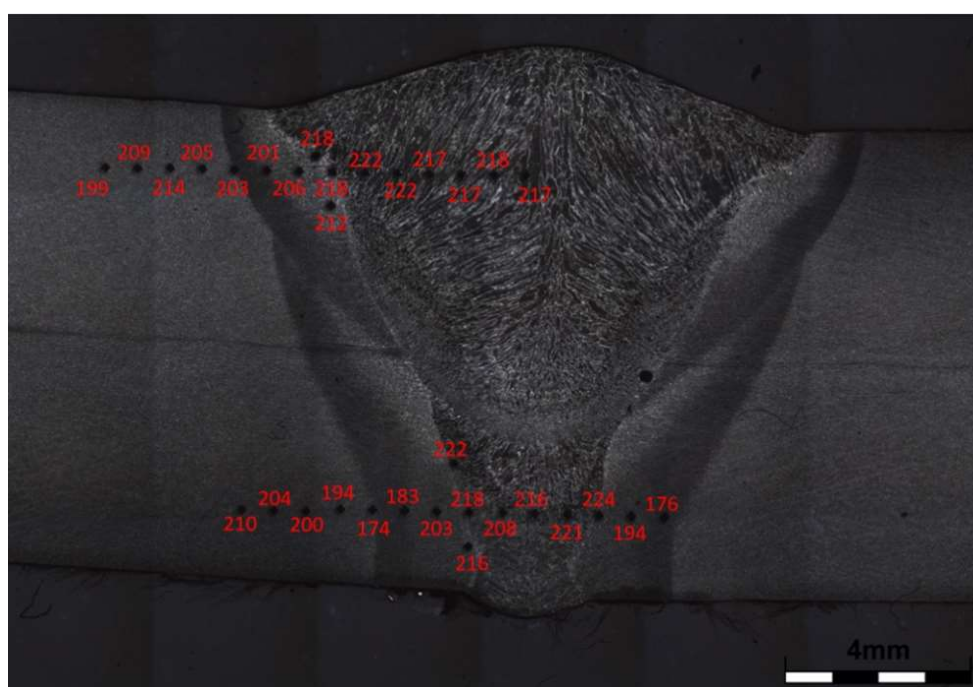
Místo měření	Vzdálenost od okraje vzorku [mm]	Hodnota deformace p [mm]
1	0	6,30
2	25	7,06
3	50	6,91
4	75	6,94
5	100	7,17
6	125	7,07
7	150	7,58
8	175	6,95
9	200	7,26
10	225	6,53
11	250	7,00

Pro kontrolu kvality provedení spoje byla hodnocena geometrie svarových housenek. Charakteristické rozměry byly opětovně určeny z fotografie makrovýbrusu pomocí softwaru pro optickou analýzu, viz obr. 3.17. Pro eliminaci počáteční nestability procesu a velké množství vneseného tepla na konci svaru byly vzorky pro makrovýbrusy odebírány ve vzdálenosti 40 mm od počátku a konce svařence. Metalografické vzorky pro hodnocení geometrie byly připraveny stejným postupem jako u koutových svarů, viz kapitola 3.2.2.



Obr. 3.17 Makrovýbrus tupého svaru vzorku E se znázorněním jednotlivých housenek

Měření tvrdosti bylo provedeno v souladu s normou ČSN EN ISO 9015-1 na tvrdoměru Qness Q30A metodou HV5. Naměřené hodnoty jsou zaznamenány na obr. 3.18.

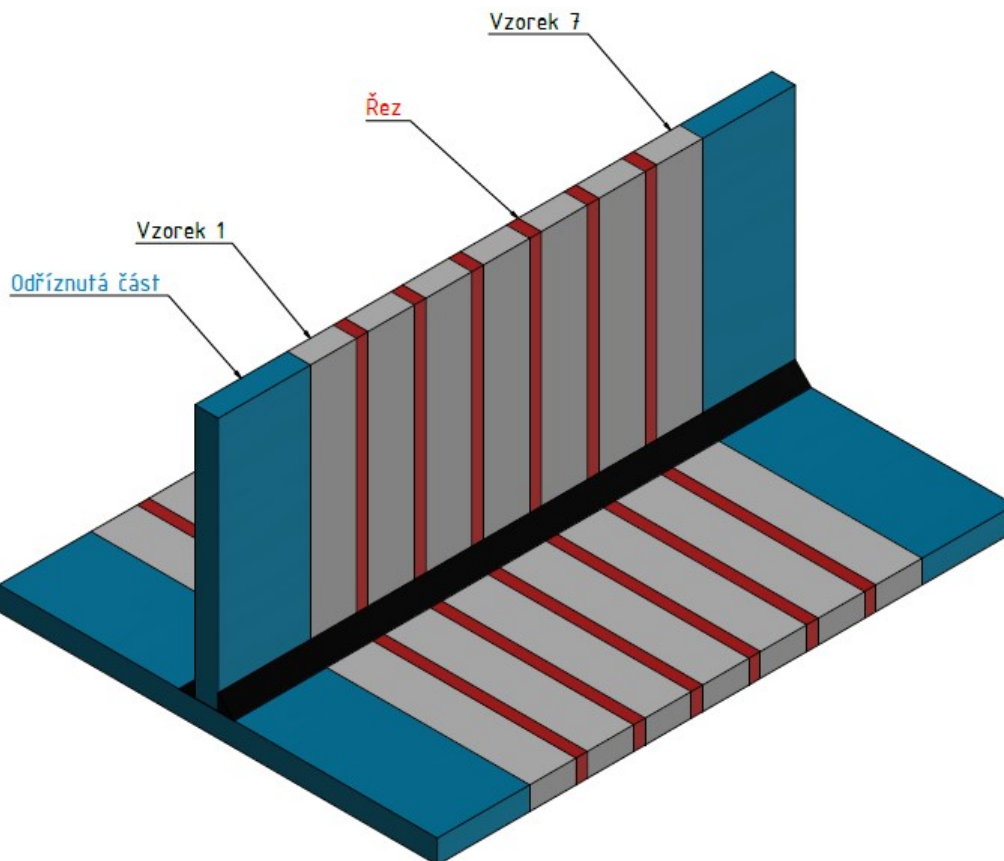


Obr. 3.18 Hodnoty tvrdosti napříč svarovým spojem vzorku E

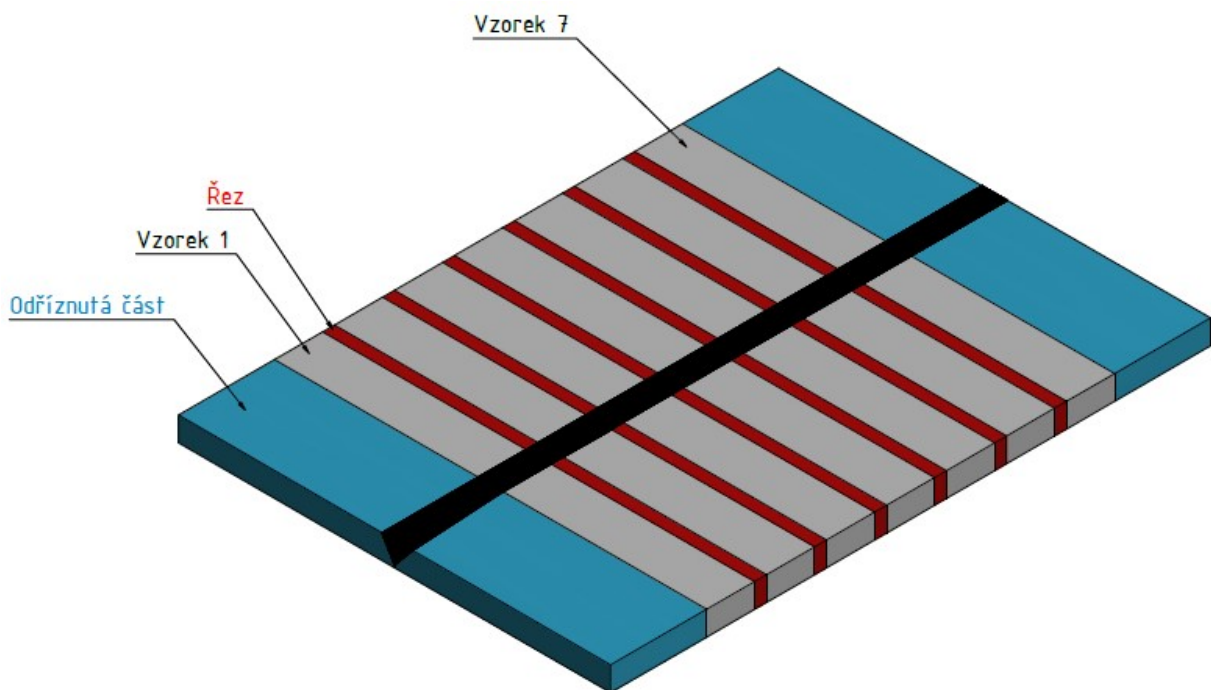
3.3 Zkoušky vysokocyklové únavy

Veškeré cyklické testy svarových spojů byly, stejně jako testy základního materiálu, provedeny na servohydraulickém zkušebním zařízení INOVA FU-O-1600-V2. Pro zkoušky koutových a tupých svarů je způsob odebrání vzorků zobrazen na obr. 3.19 a obr. 3.20. Vzorky byly odebrány ze střední části svařenců a byly označeny číslem rostoucím ve směru svařování.

U svarů koutových byla následně oddělena stojina ve vzdálenosti 20 mm od pásnice. Dělení na konečnou šířku vzorku 20 mm bylo prováděno za pomoci pásové pily s přídavkem na broušení. Pro eliminaci možného tepelného ovlivnění materiálu bylo dělení i následné broušení vzorků prováděno za intenzivního chlazení. Okraje svařenců v délce cca 40 mm nebyly pro testy vysokocyklové únavy použity.

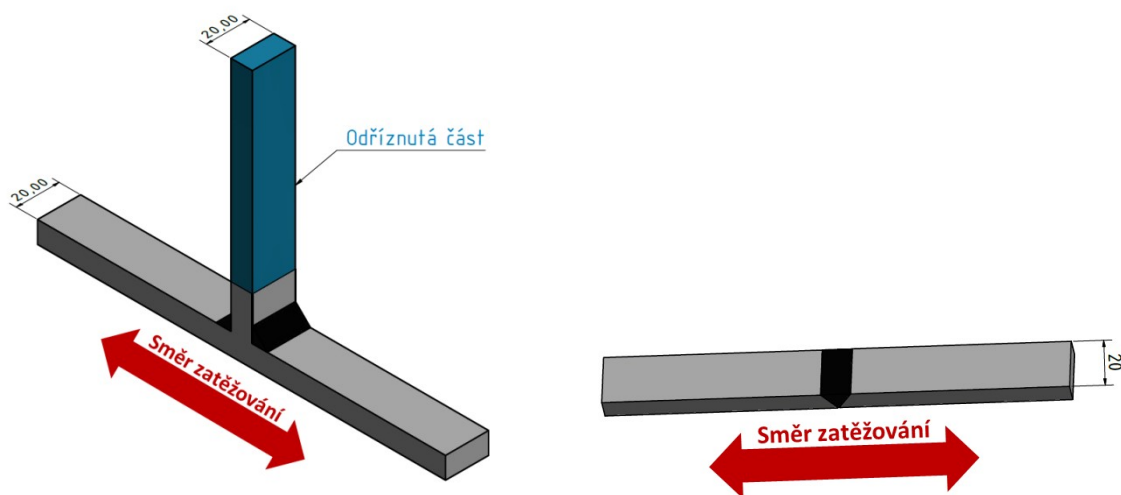


Obr. 3.19 Způsob odebrání vzorků ze svařence (A - D) pro cyklické testy koutových svarů



Obr. 3.20 Způsob odebrání vzorků ze svařence (H – I) pro cyklické testy tupých svarů

Způsob zatěžování vzorků odebraných z jednotlivých svařenců jak koutových, tak tupých svarů, byl volen ve směru pásnice, viz obr. 3.21. Tento způsob zatěžování byl zvolen z důvodu porovnatelnosti výsledků. U koutových svarů se také vycházelo z předpokladu vyšší životnosti vzorku při zatěžování ve směru pásnice, z důvodu absence namáhání na ohyb, způsobeným zvolenou vzdáleností upínacích podpor.



Obr. 3.21 Způsob zatěžování vzorků při cyklickém namáhání

Testované vzorky byly upínány přímo do upínacích čelistí zkušebního zařízení. Na obr. 3.22 je ukázáno upnutí obou typů vzorků. Zvolená vzdálenost mezi čelistmi byla 50 mm. Vzorky byly

testovány na napěťových hladinách střídavým symetrickým průběhem namáhání s asymetrií cyklu $R = -1$. Velikost amplitudy napětí byla udržována konstantní pro každou napěťovou hladinu. Kritérium pro ukončení testu bylo lomové porušení vzorku, nebo případné překonání desetimilionové hranice počtu cyklů, kde již lze vzorek považovat za nekonečně trvanlivý. Výsledkem testu byla závislost počtu dosažených cyklů do okamžiku lomu na velikosti zatížení v podobě napětí.

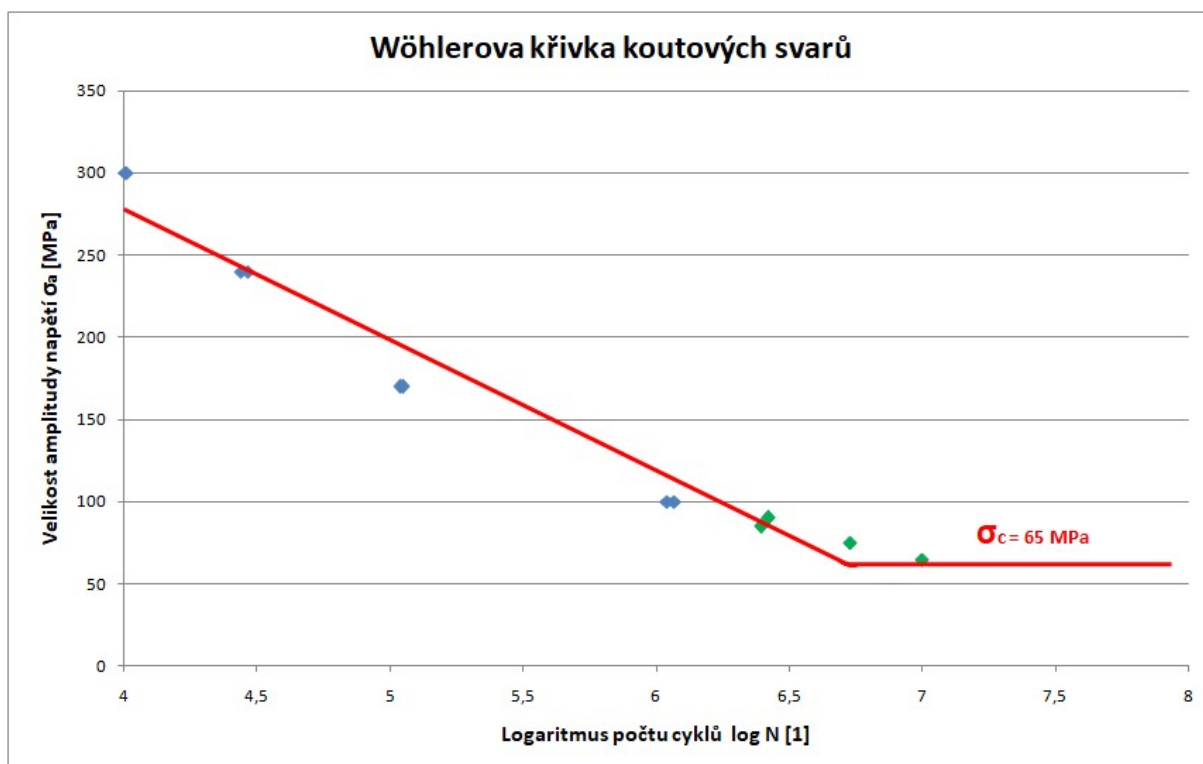


Obr. 3.22 Způsob upnutí obou typů vzorků (tupý svar, koutový svar)

Výsledky měření únavové životnosti koutových svarů jsou uvedeny v tab. 3.24 a na obrázku obr. 3.23. Výsledky měření únavové životnosti tupých svarů jsou uvedeny v tabulce tab. 3.25 a na obrázku obr. 3.24. Na obrázcích obr. 3.25 a obr. 3.26 jsou ukázány fotografie lomů vzorků koutového a tupého svaru.

Tab. 3.24 Hodnoty počtu cyklů vzorků koutových svarů

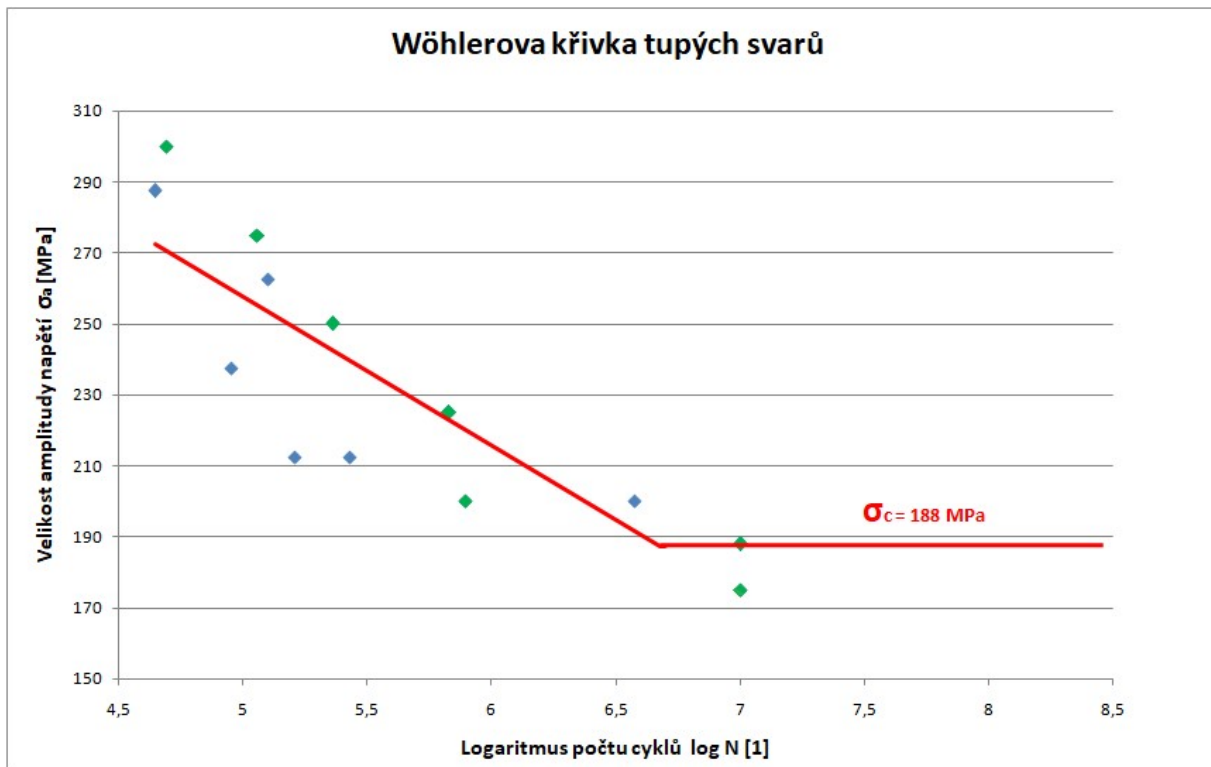
Označení vzorku	Parametry zatížení			Počet cyklů N [1]
	σ_h [MPa]	σ_A [MPa]	$\Delta\sigma$ [MPa]	
1	0	300	600	10181
2	0	300	600	10279
3	0	240	480	29245
4	0	240	480	27451
5	0	170	340	109160
6	0	170	340	112214
7	0	152,5	305	136705
8	0	135	270	164181
9	0	117,5	235	449302
10	0	100	200	1104327
11	0	100	200	1173936
12	0	90	180	2632230
13	0	85	170	2483489
14	0	75	150	4999115
15	0	65	130	10000000



Obr. 3.23 Wöhlerova křivka vzorků koutových svarů

Tab. 3.25 Hodnoty počtu cyklů vzorků tupých svarů

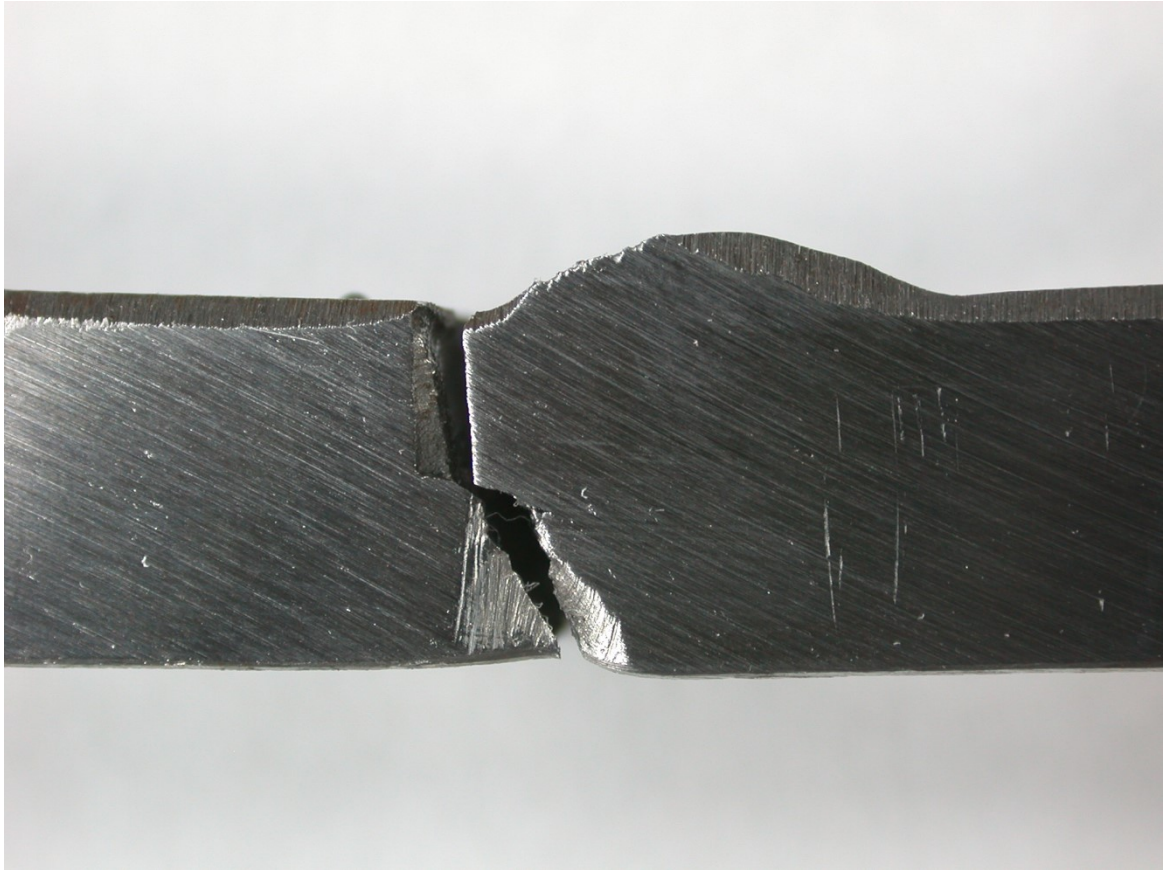
Označení vzorku	Parametry zatížení			Počet cyklů N [1]
	σ_h [MPa]	σ_A [MPa]	$\Delta\sigma$ [MPa]	
1	0	300	600	49077
2	0	287,5	575	43997
3	0	262,5	525	125423
4	0	275	550	113951
5	0	250	500	229385
6	0	237,5	475	89394
7	0	225	450	671125
8	0	212,5	425	160763
9	0	212,5	425	267943
10	0	200	400	778941
11	0	200	400	3739800
12	0	188	376	10000000
13	0	175	350	10000000



Obr. 3.24 Wöhlerova křivka vzorků tupých svarů



Obr. 3.25 Fotografie poškození vzorku 3 koutového svaru ($R = -1$, $\sigma_A = 240 \text{ MPa}$, 29245 cyklů)



Obr. 3.26 Fotografie poškození vzorku 5 tupého svaru ($R = -1$, $\sigma_A = 250$ MPa, 229385 cyklů)

4 Diskuse výsledků

Z průběhu Wöhlerových křivek základního materiálu a obou typů svarů, viz obr. 3.28, vyplývá, že vliv na změnu únavové životnosti materiálu má několik faktorů. Jedním z nich je vnesené teplo do základního materiálu, v jehož důsledku dochází ke strukturním změnám a vzniku tepelně ovlivněné oblasti v okolí svaru. Dalším důsledkem vnesení velkého množství tepla do základního materiálu je vznik teplotních pnutí, který způsobí deformace materiálu. U ocelí s nízkým obsahem uhlíku (tj. do 0,22 %) však změny struktury nejsou tak velké a téměř neovlivňují mechanické vlastnosti materiálu, což se prokázalo při analýze tvrdosti materiálu po svařování.

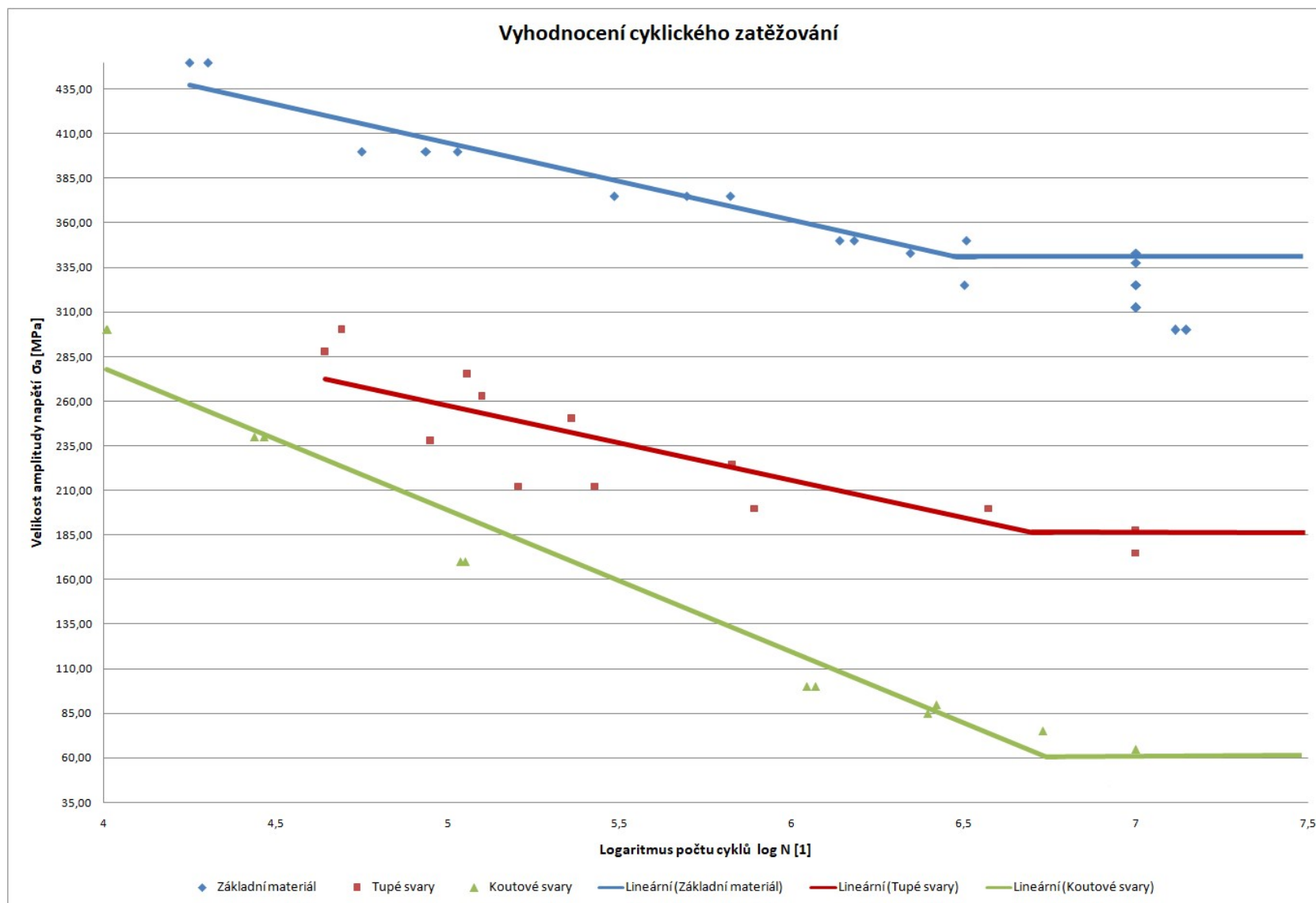
Deformace materiálu již určitý vliv mají, neboť do jednoosého namáhání tah/tlak, kterým byly veškeré vzorky testovány, vnáší ještě namáhání na ohyb, čímž snižují únavovou životnost materiálu. Dalším, a v případě svarů zcela zásadním faktorem, který ovlivňuje míru životnosti materiálu, je vrubový účinek svaru. Tento účinek se projeví především u koutových svarů, kde je z konstrukční podstaty koutového svaru vrub mnohem větší, než u svaru tupého. U většiny testovaných vzorků došlo ke vzniku lomu právě v místě největšího vrubu, neboli v místě s nejvyšší koncentrací napětí a lom se následně šířil kolmo na směr zatěžování vzorku.

Nejvyšší mez únavy má základní materiál, v tomto případě $\sigma_c = 340$ MPa. Obecně se uvádí, že mez únavy základního materiálu odpovídá cca 40 % jeho meze pevnosti. V případě jemnozrnné oceli S460MC mez únavy odpovídá cca 54 % hodnoty meze pevnosti tohoto materiálu.

U obou typů svarů se ukázalo, že největší význam z hlediska únavové životnosti materiálu má právě vrubový účinek. Z tohoto důvodu vyšla mez únavy vzorků svařených tupým svarem téměř třikrát vyšší než u vzorků svařených svarem koutovým. Přestože množství měrného vneseného tepla se u obou typů svarů lišilo, jeho vliv na strukturní změny materiálu se ukázal jako zanedbatelný. Jeho účinek se zobrazil až na hodnotách deformací pásnice, kde u tupých svarů byly tyto deformace v důsledku většího množství vneseného tepla téměř 1,5x vyšší. Jelikož však vzorky tupých svarů ve výsledku vykazovaly násobně vyšší mez únavy, lze konstatovat, že rozhodujícím faktorem z hlediska životnosti navržených svarových spojů je vrubový účinek převýšení svaru. Výsledné hodnoty mezí únavy jsou porovnány v tab. 3.26 a graficky znázorněny na obr. 3.28.

Tab. 3.26 Porovnání mezí únavy jednotlivých konstrukcí a základního materiálu

Typ konstrukce	Mez únavy σ_c [Mpa]
Základní materiál	340
Koutový svar	65
Tupý svar	188



Obr. 3.28 Porovnání Wöhlerových křivek jednotlivých konstrukcí a základního materiálu

5 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo posouzení míry vlivu procesu svařování na změny únavové životnosti tupých a koutových svarových spojů z jemnozrnné oceli S460MC.

V teoretické části práce byla popsána fyzikální podstata svařování metodou MAG, neboť tato metoda byla poté využívána pro zhotovení svarových spojů v experimentální části. Hlavní pozornost byla věnována popisu jednotlivých parametrů svařovacího procesu, tj. svařovacímu proudu, svařovacímu napětí a rychlosti svařování, a jejich vlivu na geometrii svarové lázně. V souvislosti s těmito procesními parametry byl stručně představen systém WeldMonitor, který byl využíván pro jejich záznam během svařování.

V poslední kapitole teoretické části je stručně popsán úvod do problematiky únavy materiálu. Zde byly definovány základní pojmy z oblasti únavy materiálu, jejich zkoušek a následného vyhodnocování ve formě Wöhlerovy křivky. Dále zde byly popsány jednotlivé druhy zatěžování z hlediska asymetrie cyklu.

V experimentální části práce byla v první řadě stanovena únavová životnost základního materiálu. Dále byly navrženy procesní parametry pro svařování koutových a tupých svarů, které byly v závislosti na kvalitě výsledného spoje optimalizovány tak, aby bylo zajištěno správné převýšení svaru a provaření kořene svarového spoje. Z takto provedených svařenců byly následně odebrány vzorky pro testy vysokocyklové únavy, jejichž výstupem byla data pro sestavení Wöhlerových křivek jednotlivých typů svarů. Na základě výsledků experimentů lze konstatovat, že z hlediska meze únavy je výhodnější provedení spoje tupým svarem. I zde však v porovnání s mezí únavy základního materiálu dochází k jejímu enormnímu poklesu.

V dalším pokračování této práce by bylo dobré stanovit míru ovlivnění meze únavy vrubovým účinkem svarového spoje. Možným způsobem by bylo ofrézování a zbroušení převýšení svaru a protečení kořene, čímž by se vrubový účinek minimalizoval, a hlavním faktorem ovlivňujícím únavu materiálu by tak bylo pouze množství vneseného tepla při svařování. Následné porovnání výsledků s výsledky této práce by přineslo představu o míře vlivu tohoto vrubového účinku na velikost meze únavy spoje. Dalo by se předpokládat, že mez únavy by v takovém případě vzrostla. V praxi je ovšem tato varianta hůře proveditelná, z toho důvodu byl v této práci vrubový účinek od protečení kořene a převýšení svaru ponechán.

6 Seznam použité literatury

- [1] NEUMANN, H. *Teorie svařování a pájení*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2014. ISBN 978-80-7494-171-9.
- [2] ČSN EN 10020. *Definice a rozdělení ocelí*. Praha: Český normalizační institut, 2001. 12 s. Třídící znak: 42 0002.
- [3] KADLEC V., ŤOPEK B. *Svařování v ochranných atmosférách*. Pardubice: Dům techniky ČSVTS, 1989.
- [4] SHINKMANN. Svařování MIG/MAG, MIG svařování, MAG svařování, svařování plněnou elektrodou. Schinkmann.cz [online]. © 1991 - 2019 Schinkmann s.r.o. [cit. 2019-06-11].
Dostupné z: <https://www.schinkmann.cz/mig-mag-co2>
- [5] AUTOMIG INTERNETOVÝ MAGAZÍN. MIG/MAG (CO₂). *Migatronic.cz* [online]. © 2016 [cit. 2019-06-11]. Dostupné z: <http://automig.cz/o-svarovani/metody/migmag-co2/>
- [6] MORAVEC, J. *Vliv procesních parametrů na geometrii svarové lázně při svařování v ochranných atmosférách*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2011. ISBN 978-80-7372-805-2.
- [7] Kolektiv autorů. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: ZEROSS, 2001. ISBN 80-85771-81-0.
- [8] KOPŘIVA, R. *Technológia zvarania v ochranných plynoch metódou MIG/MAG*. Ostrava: Zeross, 1993. ISBN 80-85771-004-4.
- [9] HUDEC, Z. *Optimalizace konstrukčních a technologických parametrů koutových svarů zhotovených metodou MAG*. Liberec, 2005. Disertační práce. TU v Liberci.
- [10] HLAVATÝ, I. Technologie 1: Část svařování [online]. In: *Ostrava: VŠB*, s. 37 [online] [cit. 2019-06-11]. Dostupné z: http://homen.vsb.cz/~hla80/Vyuka/2008_Technologie1.pdf
- [11] DIGITAL ELEKTRIK. Weldmonitor. Electric.cz [online]. © 1997-2010 [cit. 2019-06-11].
Dostupné z: <http://www.electric.cz/>
- [12] RŮŽIČKA, M.; HANKE, M.; ROST, M. *Dynamická pevnost a životnost*. Skriptum ČVUT, dotisk. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 1989. 212 s.
- [13] ČSN 42 0363: *Zkoušky únavy kovů*. Praha: Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, 1987. 20 s.