

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**DIPLOMOVÁ
PRÁCE**

2020

**KRISTÝNA
ADÁMKOVÁ**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Adámková** Jméno: **Kristýna** Osobní číslo: **482828**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Vliv přípravy svarových ploch a způsobu upnutí na deformace svarů vysokopevných ocelí

Název diplomové práce anglicky:

The influence of weld edges preparation and clamping method on deformations of high-strength steels welds

Pokyny pro vypracování:

Popis svařitelnosti vysokopevných ocelí obloukovými technologiemi
Rozbor problematiky vzniku deformací a pnutí při svařování a možnosti jejich numerických simulací
Návrh experimentu pro ověření vlivu svarové plochy a způsobu upnutí – vytvoření simulace a verifikace procesu
Vyhodnocení výsledků a závěr

Seznam doporučené literatury:

- [1] Hudec, Z. Deformace a napětí při svařování. Technická univerzita v Liberci. Listopad 1998
- [2] Musil, M. a kolektiv. Výroba a aplikované inženýrství ve svařování, DOM ZO 13 s.r.o., 2017
- [3] Hänsch, H., Krebs, J.: Deformace a pnutí ve svařovaných konstrukcích, SNTL, Praha, 1964
- [4] Firemní materiály firmy MSC Software

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

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

Ing. Štěpán Ježek, ústav strojírenské technologie FS

Datum zadání diplomové práce: **29.04.2020** Termín odevzdání diplomové práce: **31.07.2020**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2020**

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

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

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studentky

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracovala samostatně, a to výhradně s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Nemám žádný závažný důvod proti užití školního díla ve smyslu §60 Zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne: _____

Podpis

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala svému vedoucímu diplomové práce, panu doc. Ing. Ladislavu Kolaříkovi, Ph.D., IWE a konzultantovi panu Ing. Štěpánovi Ježkovi, IWE, za cenné připomínky a rady při vypracování této práce. Dále bych ráda poděkovala svým rodičům, kteří mi umožnili jít studovat a během celého studia mě podporovali. Mé poděkování patří také mým spolužákům.

Abstrakt

Tato práce se zabývá vlivem technologie svařování na výsledné deformace svařence. Pro hodnocení byla využita metoda MAG v kombinaci s konstrukční vysokopevnostní ocelí S960QL. Změnami v technologii svařování byl úhel rozevření svarových ploch, postup svařování a použití upínacích prostředků. V teoretické části je nejprve shrnuta základní charakteristika svařování tavící se elektrodou v aktivní ochranné atmosféře. Problematika svařování je zde popsána od fyzikální podstaty elektrického oblouku až po používané ochranné plyny. Teoretická část práce se dále zabývá popisem vysokopevnostních konstrukčních ocelí a jejich svařitelností. Nedílnou součástí teoretické části je taktéž problematika deformací a přehled opatření, která vedou k minimalizaci deformací způsobených procesem svařování.

V praktické části práce je zhodnocena účinnost zvolených způsobů minimalizace deformací na základě měření výsledných deformací svařených vzorků pomocí souřadnicového měřicího stroje.

Klíčová slova: obloukové svařování, MAG, vysokopevnostní ocel, deformace, SMS, S960QL

Abstract

This theses is focused on the influence of welding technology on the final deformation of used welded samples. High-performance steel of class S960QL used mainly in construction combined with MAG method were used for the purposes of testing and evaluation of obtained results. The theoretical part of the thesis deals with basic characteristics of metal active gas welding. The main issues of welding are described from physical point of electric arc to used shielding gases. The theoretical part is also focused on the characteristics description of high-performance construction steel and the main issues related to its weldability. Integral part of the thesis is the theory of deformation caused by welding and measures that lead to minimization of these deformations.

The practical part of the thesis is related to efficiency evaluation of the measures that were chosen to minimize the impact of welding on the deformation of the samples material. Deformations of the samples were measured using a coordinate measuring machine.

Keywords: arc welding, metal active gas welding, high performance steel, deformation, SMS, S960QL

OBSAH

Použité zkratky.....	4
Fyzikální veličiny.....	5
Cíl práce.....	7
1. Úvod.....	8
2. Svařování elektrickým obloukem.....	9
2.1. Historie svařování elektrickým obloukem.....	9
2.2. Metalurgická podstata tavného svařování.....	10
2.2.1. Teplotní cyklus při tavném svařování.....	11
2.3. Charakteristika svařování MAG.....	13
2.4. Elektrický oblouk.....	14
2.4.1 Fyzikální podstata oblouku MAG.....	15
2.4.2 Přenos kovu v oblouku MAG.....	16
2.5. Zařízení na svařování MAG.....	18
2.5.1. Svařovací zdroje.....	19
2.5.2. Mechanismus na posuv a vedení elektrody.....	20
2.5.3. Svařovací hořáky.....	20
2.5.4. Zásobník ochranného plynu.....	20
2.6. Elektrody pro svařování MAG.....	21
2.7. Vliv ochranných plynů na svarový kov.....	22
2.7.1. Klasifikace ochranných atmosfér.....	22
2.7.2. Oxid uhličitý.....	23
2.7.3. Argon.....	24
2.7.4. Kyslík.....	24
2.7.5. Směsi plynů.....	24
3. Vysokopevné oceli.....	25
3.1 Jemnozrnné oceli.....	27
3.1.1. Vývoj v oblasti vysokopevných jemnozrnných ocelí.....	28
3.1.2. Rozdělení konstrukčních za tepla tvářených ocelí.....	29
3.1.3. Obchodní značení vysokopevných ocelí.....	30
3.2 Mechanismy zpevňování jemnozrnných ocelí.....	31
3.2.1. Zpevňování hranicemi zrn.....	31
3.2.2. Zpevnění tuhého roztoku atomy příměsí.....	33
3.2.3. Zpevnění částicemi jiných fází.....	33

3.2.4.	Dislokační (deformační) zpevnění	35
3.2.5.	Zpevnění maticí.....	35
3.3	Vysokopevná ocel S960QL.....	36
3.4	Výroba vysokopevných zušlechtěných ocelí	37
4.	Svařitelnost oceli S960QL	38
4.1	Vliv chemického složení	38
4.2	Teplota předehřevu a interpass.....	39
4.3	Rychlost ochlazování	40
4.3.1	Stanovení ochlazovací doby	41
4.4	Přídavný materiál	42
5.	Deformace a napětí při svařování	43
5.1	Teplotní pole	45
5.2	Klasifikace napětí ve svaru	45
5.3	Vznik vnitřních napětí a deformací.....	46
5.4	Průběh napětí tupých svarů	48
5.5	Deformace způsobené svařováním	49
5.5.1	Příčné smrštění	51
5.5.2	Podélné smrštění.....	51
5.5.3	Úhlová deformace	51
5.6	Vliv zbytkových napětí na svarové spoje.....	52
5.7	Omezení deformací svarových spojů	52
5.7.1	Vliv materiálu.....	53
5.7.2	Vliv konstrukčního řešení	54
5.7.3	Vliv technologie	55
5.8	Rovnění svařenců po svařování	57
6.	Praktická část	58
6.1.	Návrh optimalizace svařování.....	58
6.2.	Návrh svarového spoje pro optimalizaci.....	59
6.1.1	Základní materiál.....	61
6.1.2	Přídavný materiál	61
6.1.3	Postup přípravy vzorků	62
6.3.	Návrh svařovacího procesu	63
6.2.1	Vnesené teplo	64
6.2.2	Doba ochlazování $t_{8/5}$	64
6.2.3	Teplota Interpass	64

6.2.4	Upnutí základního materiálu	65
6.2.5	Zařízení.....	66
6.2.6	Ochranná atmosféra.....	66
6.4.	Návrh procesu hodnocení vlivu deformací	66
6.5.	Vyhodnocení naměřených dat.....	68
6.5.1	Vzorek bez aplikování opatření – vyhodnocení vzorku 30/1	68
6.5.2	Změna postupu svařování – vyhodnocení vzorku 30/2.....	69
6.5.3	Upnutí základního materiálu – vyhodnocení vzorku 30/3	71
6.5.4	Změna velikosti úhlu rozevření tupého V svaru – vyhodnocení vzorku 20/1	73
6.5.5	Kombinace všech opatření – vyhodnocení vzorku 20/2	75
7.	Závěr	78
	Seznam použité literatury.....	79

Použité zkratky

zkratka	celý název	překlad
MMA	Manual metal arc welding	Ruční obloukové svařování
MIG	Metal inert gas	Svařování tavící se elektrodou v inertním ochranném plynu
MAG	Metal active gas	Svařování tavící se elektrodou v aktivním ochranném plynu
TIG	Tungsten inert gas	Svařování netavící se elektrodou v ochranné atmosféře inertního plynu
SAW	Submerged arc welding	Svařování pod tavidlem
TOO	Tepelně ovlivněná oblast	
SK	Svarový kov	
ZM	Základní materiál	
V – A	Volt – Ampérová (charakteristika)	
PM	Přídavný materiál	
HPS	High performance steel	Vysokopevné ocel
AHSS	Advanced high strength steel	Pokročilá vysokopevná ocel
DP	Dual phase (steel)	Duplexní ocel
CP	Complex – phase (steel)	Vícefázová ocel
TRIP	Transformation induced plasticity	TRIP ocel (Plastická deformace a transformace)
TWIP	Twinning included plasticity	TWIP ocel (plastická deformace dvojčatěním)
HSLA	High – strength low – alloy (steel)	Vysokopevná nízkolegovaná ocel

Fyzikální veličiny

Označení fyzikální veličiny	Název fyzikální veličiny	Jednotka
t	Teplota	°C
T	Termodynamická teplota	K
t	Čas	s
p	Tlak	Pa
Q	Teplo	J
T _{max}	Maximální teplota cyklu	°C
t _{8/5}	Rychlost ochlazení z teploty 800 °C na 500 °C	s
I	Proud	A
U	Napětí	V
G	Elektrická vodivost	S
J	Hustota elektrického proudu	A·m ⁻²
F	Elektromagnetická síla (Lorentzova)	N
P	Výkon	W
E _d	Disociační energie	eV
E _i	Ionizační energie	eV
R _e	Mez kluzu	Pa
R _{p0,2}	Smluvní mez kluzu	Pa
R _m	mez pevnosti	Pa
σ _e	Mez kluzu	Pa
d	Průměr zrna	nm
σ _o	Napětí způsobené třením mřížky, odporem precipitátů	Pa
T _p	Teplota přehřevu	°C
CET	Uhlíkový ekvivalent	%
Q	Tepelný příkon	kJ·mm ⁻¹
V	objem	m ³
c	Tepelná kapacita	m ³ ·K ⁻¹ ·s ⁻¹
ρ	Hustota	kg·m ³
a	Teplotní vodivost	m ² ·s ⁻¹
λ	Tepelná vodivost	W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
KCU	Nárazová práce	J
K	Nárazová práce	J

l_0	Původní délka	m
α	Součinitel lineární teplotní roztažnosti	K^{-1}
E	Modul v pružnosti	Pa
ΔT	Rozdíl teplot	K
Δl	Rozdíl délek	m
l	Délka	m
s	Tloušťka plechu	mm
z_p	Smrštění	mm
A	Tažnost	%
v	Rychlost elektrody	$mm \cdot s^{-1}$
v	Rychlost elektrody	$cm \cdot s^{-1}$
T_o	Teplota okolí	$^{\circ}C$
η	Účinnost	%

Cíl práce

Cílem diplomové práce je:

- popis svařitelnosti vysokopevných ocelí obloukovými technologiemi,
- rozbor problematiky vzniku deformací a pnutí při svařování.

Získané poznatky mohou být využity pro numerické simulace svařovacího procesu.,

Cílem experimentální části práce je:

- návrh optimalizace deformací svařence pomocí metod pro redukci makroskopických deformací (redukce objemu svarového kovu, zvýšení tuhosti upnutí a úprava dráhy svařování),
- stanovení hodnot deformací ve směru osy z pro všechny vzorky,
- vyhodnocení velikosti deformací v závislosti na použité metodě redukce makroskopických deformací.

1. Úvod

Svařování se řadí mezi nejhojněji používané strojírenské technologie V České republice i ve světě. Jedná se o jeden z nejefektivnějších způsobů spojování materiálů, kterým lze spojovat tloušťky materiálů v rozsahu od zlomku milimetru až po desetiny metru. Jde o velmi univerzální technologii, kterou lze na základě meziatomárních vazeb spojovat kovové, ale i nekovové materiály, které mají podobné, nebo různé mechanické a fyzikálně-chemické vlastnosti. Tuto technologii lze použít i pro tvarově složitě součásti [1].

Svařování je v současnosti využíváno ve velkém množství výrobních oborů jako je např. výroba a kompletace nových strojů a konstrukcí, výroba zařízení a komponent v energetickém průmyslu (včetně tlakových nádob, kotlů, tepelných výměníků, jaderných reaktorů apod.). Další významné uplatnění lze nalézt v opravárenství při renovaci, či opravě opotřebovaných komponentů, dále při výrobě dopravních prostředků (zejména v automobilovém průmyslu, letectví, lodním průmyslu a výrobě kolejových vozidel) a ve stavebnictví [2], [3].

Během procesu tavného svařování dochází ke vzniku svarového spoje díky tepelné energii, která je na místo spojování materiálů přiváděna z externího tepelného zdroje, a následnému natavení kontaktních (tzv. svarových) ploch. Celý tento proces je vlivem zmíněného přívodu tepla doprovázen pochody, které mají za následek nepříznivé deformace a napětí ve svařenci [3].

Deformace a napětí vznikají při každém procesu svařování a není možno jim zabránit. Lze pouze snížit jejich velikost a poměr, nebo je přenést do málo exponovaných míst vhodnou volbou technologie svařování a vhodným konstrukčním řešením. Existují různá opatření, která vedou ke snížení deformačních účinků během svařování. Deformace je možné snížit, nebo úplně odstranit i operacemi, které se aplikují po svařování.

Problematika deformací po svařování se často řeší pomocí numerických simulací. K tomu je však potřeba správné nastavení vstupních údajů, které jsou ovlivňovány celou řadou faktorů. Tato diplomová práce částečně řeší ověření vlivu svarové plochy a způsobu upnutí na deformace pomocí vytvořené simulace.

2. Svařování elektrickým obloukem

Svařování je definováno jako technologický proces nerozebíratelného spojování kovových částí i celých konstrukcí sestávajících z komponent jednoduchého tvaru, a to díky působení tepelné, nebo mechanické energie. Spojení je zajištěno materiálovými meziatomovými vazebními silami, které působí mezi kontaktními plochami. Dle typu vynaložené energie je svařování rozděleno na tavné a tlakové [4].

Svařování elektrickým obloukem se řadí mezi tavné způsoby svařování a k vytvoření spoje se využívá tepelná energie elektrického oblouku, jejímž přivedením dojde k místnímu natavení základního a přídatného materiálu. Vlivem adhezních sil jsou na sebe vázány tekutá a tuhá fáze. Během tavného svařování může být použit přídatný materiál stejného, nebo podobného chemického složení. Vytvořený svarový spoj má odlišné mechanické a technologické vlastnosti oproti použitému základnímu materiálu [3], [4].

Obloukové svařování má mnoho modifikací, které rozšířily oblast jeho použití. Vyjma ručního svařování obalenou elektrodou (MMA) se jedná především o svařování v ochranných atmosférách (MIG, MAG, TIG) a svařování pod tavidlem (SAW). Obloukové svařování je jednou z průmyslově nejpoužívanějších technologií svařování a neustále se vyvíjí [5].

2.1. Historie svařování elektrickým obloukem

Po celá staletí bylo jedinou používanou svařovací metodou kovářské svařování. Až na konci 19. století se začaly používat i další metody: obloukové, plamenové a odporové svařování. Za počátek historie obloukového svařování považujeme rok 1801, kdy sir Humphrey Davy pocházející z Anglie zjistil, že při použití dvou elektrod, které jsou blízko u sebe, může být vytvořen elektrický oblouk ve vysokonapěťovém obvodu. Později Davy představil elektrický oblouk v Royal Institut of England, za což sklidil velký úspěch, nicméně elektrický oblouk nikdy nevyužil ke svařování [5].

První zmínka o použití intenzivního tepla elektrického oblouku s uhlíkovou elektrodou sahá do roku 1881, kdy Auguste de Meritens použil tuto elektrodu ke svařování olověných desek baterie. Meritens přitom zapojil elektrodu na záporný pól zdroje a olověnou desku na pól kladný. První patenty na obloukové svařování uhlíkovými elektrodami získali o 4 roky později vědci Nicolas de Benardos a Stanislaw Olszewski. Díky tomuto patentu zavedlo svařování uhlíkovou elektrodou hned několik firem, např. ve Spojených státech amerických firma Baldwin Locomotive Works při opravách lokomotiv. Při svařovacím procesu se však dostával uhlík z elektrod do svarových spojů, a ty byly proto tvrdé a křehké [5].

V roce 1889 dostal Američan Charles Coffin patent na obloukové svařování, při kterém nahradil uhlíkovou elektrodu elektrodou kovovou. Ta se v průběhu procesu tavila a přidávala materiál do svarového kovu. Coffin se stal později prezidentem General Electric Company. V nadcházejících letech došlo k vývoji těchto elektrod, které byly operativnější a produktivnější, eliminovaly vliv nauhličením z elektrody, ale nezajišťovaly ochranu před okolní vzdušnou atmosférou. Z důvodů zvýšení kvality svarových spojů

nastal další vývoj i v oblasti obalených elektrod. Obal elektrod představoval funkci metalurgickou a plynotvornou.

V nadcházejících letech byl vývoj v oblasti svařovacích elektrod pomalý. V roce 1926 Henry M. Hobart a Philip K. Devers z firmy General Electric použili Slavjanovu kovovou tavící se elektrodu při svařování v ochranné atmosféře inertních plynů. Komerčnímu využití inertních plynů v té době bránila jejich vysoká cena a nedostatek znalostí, jak je vyčistit. Svařovací hořák, do kterého byl přiváděn svařovací drát a ochranný plyn, byl patentován až v roce 1930. Hobart použil helium a Devers argon.

Velký rozvoj nastal v období 1. světové války, kdy bylo třeba opravovat poničenou techniku [5].

Další rozvoj zaznamenalo obloukové svařování při výrobě celosvařovaných lodí v období od roku 1930. V období 2. světové války se stalo svařování elektrickým obloukem dominantní metodou (obr. 1) a postupem času došlo k rozvoji dalších metod obloukového svařování jako např. svařování v ochranných atmosférách, poloautomatické a automatické svařování [6].



Obr. 1: Svařování elektrickým obloukem za 2. světové války v muniční továrně [6]

2.2. Metalurgická podstata tavného svařování

Při tavném svařování vzniká svarový spoj natavením základního materiálu za případného použití přídavného materiálu a následnou krystalizací svarové lázně. Vznik meziatomové vazby, stejně jako průběh difúze v kovech ovlivňují teplota, čas a tlak. Intenzita těchto činitelů určuje druh svařovacího procesu. Tavné svařování se realizuje při vysoké pracovní teplotě (vyšší než jsou teploty tavení základních a přídavných materiálů), obvykle bez tlaku a za relativně krátký čas [7].

Postup vytváření svarového spoje při tavném svařování probíhá v uvedeném pořadí:

- I. natavení svarových ploch a případného přídavného materiálu vlivem působení koncentrovaného zdroje tepla,
- II. fyzikálně – metalurgické procesy ve svarové lázni, tzn. promíchání tekutého kovu a sdílení tepla ve svarové lázni, metalurgické reakce mezi roztaveným kovem a okolím (atmosféra, obal elektrody, tavidlo). Uvedené procesy mají vliv na výsledné chemické složení svarového kovu,
- III. formování povrchu svarové lázně účinkem všech působících sil a účinkem mezifázových napětí (např. tekutý kov – tuhá fáze, tekutý kov – roztavená struska atd.),

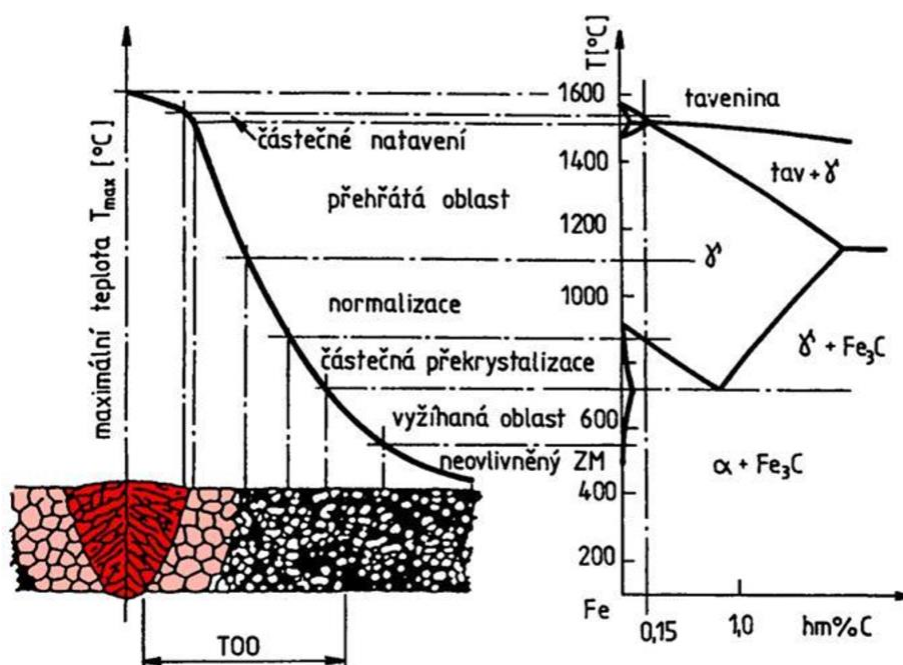
- IV. krystalizace svarového kovu a následné chladnutí. Fyzikální vazby mezi materiály, které vznikly v průběhu krystalizace, se dále zpevňují s poklesem teploty během chladnutí [7], [8].

Během ohřevu, tavení a chladnutí materiálu probíhají složité difúzní děje, které mohou podstatně ovlivnit užtkové vlastnosti svarových spojů. Svým průběhem se podobají dějům při tavení, tuhnutí a chladnutí kovů v hutnické výrobě. Proto se také nazývají metalurgické děje při svařování [8].

Základním stavebním prvkem svarového spoje je svarová housenka, která se vytvoří místním natavením základního a přídavného materiálu a ztuhnutím svarové lázně. Materiál se ve svarové lázni taví až po hranici závaru (natavení) a jeho krystalizací vznikne svarový kov. Svary lze klasifikovat na jednovrstvé a vícevrstvé, kdy vícevrstvé svary představují housenky položené nad sebou v několika vrstvách. První položená housenka se nazývá kořenová vrstva a povrch svarového spoje tvořený jednou, či více housenkami představuje krycí vrstvu. Vrstvy housenek uvnitř svaru se nazývají výplňové [8].

2.2.1. Teplotní cyklus při tavném svařování

Při tavném svařování dochází i k ohřevu oblasti základních materiálů v blízkosti svarové lázně. Teploty v určitých místech svarového spoje jsou různé, jelikož v místě svarové lázně je teplota vyšší než teplota tavení základního materiálu a v oblasti kolem svarové lázně bude teplota postupně klesat. Tato nenatavená, ale ovlivněná oblast se nazývá tepelně ovlivněná oblast (TOO). Teplota v této oblasti se mění s rostoucí vzdáleností od lázně. V určité vzdálenosti od lázně se už základní materiál významně neohřeje a jeho vlastnosti se vlivem svařování nezmění (obr. 2) [7], [9], [10].



Obr. 2: Vliv teplotního účinku svařování na strukturu svarového spoje [11]

Svarový spoj lze rozdělit na oblasti: svarový kov, tepelně ovlivněnou oblast a neovlivněný základní materiál. Svarový kov (SK) představuje oblast, která byla při svařování přímo natavená, tedy dosahovala vyšších teplot, než je teplota tavení základního materiálu. Ve svarovém kovu dochází v důsledku promíšení základního a přídavného materiálu ke vzniku nové struktury, která je typická velkými zrny (dendrity), jak je patrné z obr. 2. Tepelně ovlivněná oblast (TOO) se nachází vedle SK a v důsledku jejího ohřátí na vysoké teploty v ní došlo ke změnám strukturních i mechanických vlastností. Neovlivněný základní materiál (ZM) si zachovává původní strukturu. Šířka jednotlivých oblastí svarového spoje závisí na metodě a parametrech svařování, teplotních cyklech a na fyzikálních vlastnostech použitého základního materiálu [9].

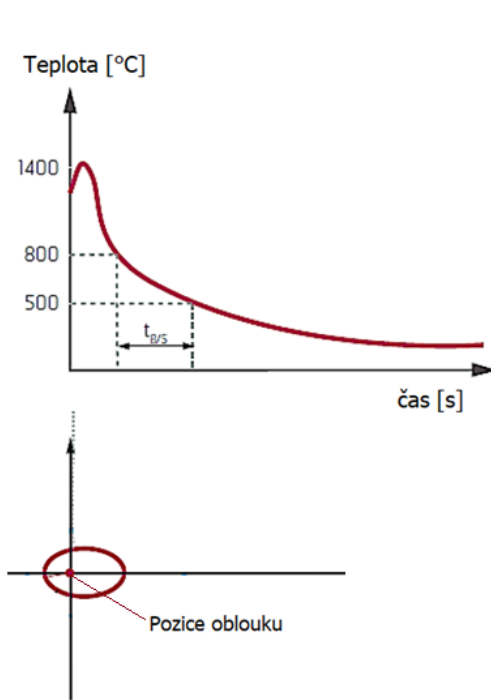
Průběh teploty v závislosti na čase v určitém místě svarového spoje charakterizuje teplotní cyklus. Znalost teplotních cyklů je nutným předpokladem pro vytvoření svarového spoje o požadovaných vlastnostech a pro výzkum svařitelnosti materiálů [11]. Teplotní cykly také využíváme při modelování určitých svařovacích procesů pomocí výpočetní techniky. Teplotní cyklus charakterizuje základní ukazatele:

- I. rychlost ohřevu na maximální teplotu,
- II. maximální teplotu cyklu T_{\max} ,
- III. doba výdrže na dané teplotě,
- IV. rychlost ochlazování (čas ochlazování $t_{8/5}$) [7].

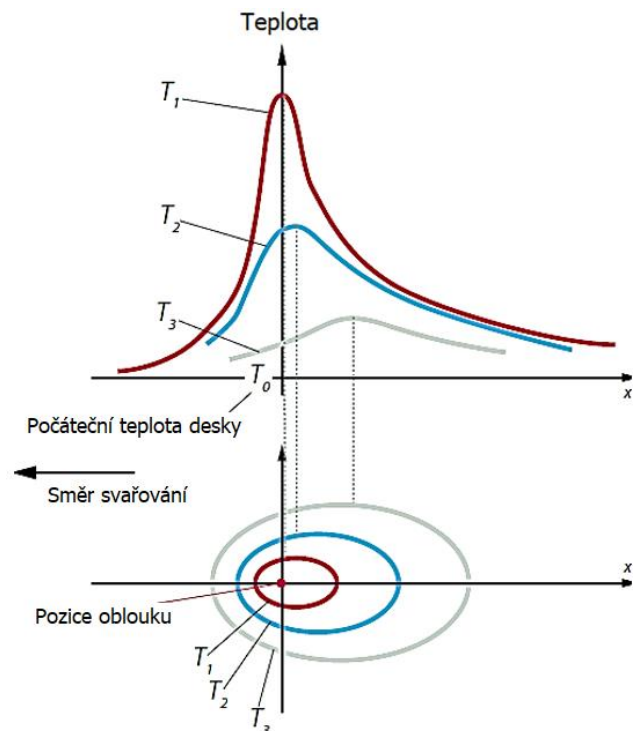
Rychlost ohřevu je u obloukového svařování relativně vysoká, dosahuje hodnot od $70 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ do $400 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$. Během ohřevu dochází k tepelně aktivovaným dějům, jako jsou fázové přeměny. Vysoká rychlost ohřevu způsobí teplotní hysterezi, v důsledku níž nedochází k těmto fázovým přeměnám při rovnovážné teplotě, ale při teplotě až o $300 \text{ }^\circ\text{C}$ vyšší [10].

Dalšími charakteristikami teplotního cyklu jsou maximální teplota cyklu T_{\max} a výdrž nad teplotou hrubnutí zrna, která bude mít z hlediska strukturních změn největší význam. Při delším setrvání na vyšší teplotě, než je teplota hrubnutí zrna, bude docházet k nepříznivému hrubnutí zrna, které má za následek snížení plastických vlastností materiálu. U vysokopevných ocelí je tato teplota až $1300 \text{ }^\circ\text{C}$. Čím delší je výdrž na T_{\max} ve svarovém kovu, tím větší bude růst zrna [9], [10].

Rychlost ochlazování vyjadřujeme nejčastěji parametrem $t_{8/5}$ [s], který představuje dobu ochlazení svarového kovu z teploty $800 \text{ }^\circ\text{C}$ na $500 \text{ }^\circ\text{C}$. Tento parametr je znázorněn v grafu závislosti teploty na čase (obr.3).



Obr. 3: Teplotní cyklus s parametrem $t_{8/5}$ [12]



Obr. 4: Teplotní cykly různých částí svarového spoje [12]

Vlivem rychlosti ochlazování mezi teplotami 800 °C a 500 °C dochází ke značnému ovlivnění fázových přeměn a difúzních pochodů, např. vodíku. Čím vyšší je rychlost ochlazování v oblasti transformačních teplot, tím větší je pravděpodobnost vzniku nerovnovážných struktur, jako je martenzit a bainit. Při pozvolnějších rychlostech ochlazování pod teplotou 300 °C bude docházet k vydifundování vodíku ze svarového spoje. Naopak při vyšších rychlostech ochlazování dojde k uvěznění molekul vodíku ve svaru, což má za následek praskliny za studena [9], [10].

Teplotní cykly a především parametr $t_{8/5}$ se zpravidla měří v několika místech svarového spoje vždy v různých vzdálenostech od podélné osy svaru. Jak je patrné z obrázku 4, s rostoucí vzdáleností od osy se teplotní maximum snižuje, jelikož teplotní ovlivnění materiálu je nižší. K měření doby ochlazování se používají dotykové termočlánky snášející teploty až 1 700 °C. Termočlánky jsou před procesem svařování přivařeny k základnímu materiálu a poté zaznamenávají teploty v rámci teplotního cyklu. Doba ochlazování $t_{8/5}$ je podkladem pro stanovení teploty předehřevu za respektování teploty Interpass pro získání požadovaného strukturního stavu v TOO (viz kapitola 4.2).

Pro výslednou požadovanou kvalitu svarového spoje je proto nutné zohledňovat výše uvedené ukazatele teplotního cyklu.

2.3. Charakteristika svařování MAG

Místním natavením svarových ploch základního materiálu a odtavením přídavného materiálu z tavicí se elektrody se vytvoří svarová lázeň, která následně ztuhne a vytvoří požadovaný spoj. Vazba vytvořená mezi materiály se v průběhu chladnutí dále

zpevňuje. V průběhu ohřevu, natavení a ochlazování dochází při svařování tavící se elektrodou v aktivním ochranném plynu, tedy MAG, k různým metalurgickým dějům, které ovlivňují výsledné vlastnosti svarových spojů [5], [8].

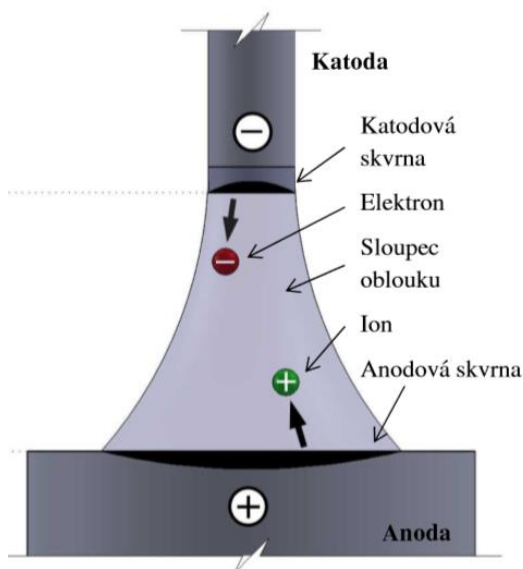
Zdrojem tepla při svařování MAG je elektrický oblouk hořící mezi koncem tavící se elektrody a základním materiálem v prostředí ochranného plynu. Používají se tzv. aktivní plyny, mezi které se řadí např. směsi argonu s oxidem uhličitým, nebo směsi argonu, oxidu uhličitého a kyslíku (viz kapitola 2.7) [8]. Každý z těchto plynů udává výslednému svaru charakteristické vlastnosti. Použitý plyn se při svařování projeví ve stabilitě hoření oblouku a hloubce závaru, která je podstatně vyšší než při svařování obalenou elektrodou.

Ochranné plyny zajišťují především ochranu svarové lázně, vysoce prohřátých částí základních materiálů a konce elektrody proti nepříznivým účinkům okolní atmosféry (vniknutí N_2 , O_2 , H_2 do svarové lázně). Ochranná atmosféra plní i další funkce, jako je stabilizace oblouku, úprava tepelné bilance oblouku, snazší formování housenky a zlepšení podmínek pro odtavování tavící se elektrody, tedy přenos kovu v oblouku [7].

Elektroda (přídavný materiál) je navinutá na cívce a k jejímu podávání dochází pomocí podávacího mechanismu rychlostí, která závisí na průměru elektrody a aktuálním svařovacím proudu. Svařování metodou MAG se používá pro svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí. Mezi hlavní výhody svařování MAG se řadí hluboký průvar, jednoduchost, produktivita, snadná automatizace a robotizace, svařování v polohách a stabilní ochrana svarového kovu a TOO díky ochranné atmosféře aj. [5]

2.4. Elektrický oblouk

Elektrický oblouk je elektrický výboj kruhového průřezu, který prochází horkým ionizovaným plynem, čímž se uvolňuje velké množství tepla. Elektrický výboj v plynech



Obr. 5: Oblasti svařovacího oblouku [11]

může být dvojího typu – jiskrový, tedy jednorázový, nebo trvalý [7], [8]. Elektrický oblouk je typickým příkladem trvalého elektrického výboje. Za normálních okolností jsou plyny elektricky nevodivé. Plyn se stane elektricky vodivým až tehdy, obsahuje-li částice s kladným a záporným nábojem, tzn. pokud je ionizován. Plyn v ionizovaném stavu mění výrazně vlastnosti a označuje se za další stav hmoty, který se nazývá plazma. Aby byl sloupec této plazmy vytvořen, musí ionizovaným plynem procházet dostatečně vysoký proud (10 až 2 000 A) a zároveň napětí bude vyšší než napětí ionizační (10 až 50 V). Svařovací oblouk je možné zahájit dotykem svařovací elektrody s povrchem základního materiálu, tedy zkratem el. obvodu, nebo pomocí vysokého napětí s vysokou frekvencí. Při zapálení oblouku se na žhavé katodě uvolňují elektrony, které procházejí sloupcem oblouku (vodivou plazmou) a jsou dále odváděny anodou. Teplota elektrického oblouku dosahuje teploty přes 5 000 °C [5], [11].

Každý elektrický oblouk tvoří 3 základní oblasti (obr. 5):

- I. **Katodová oblast** je část povrchu žhavé katody, ze které se emitují elektrony a dochází v ní k velkému zvýšení proudové hustoty (až $1\,000\text{ A}\cdot\text{mm}^2$). Dle geometrie a teploty katody je katodová skvrna buď stabilní, a nebo se přemísťuje po povrchu katody.
- II. **Sloupec elektrického oblouku** (prostor mezi elektrodami) je jasně zářící viditelná část oblouku dosahující teploty přes $5\,000\text{ °C}$. Sloupec je tvořen plazmatem, jehož teplota roste s narůstajícím proudem. Ve střední části průřezu oblouku je teplota podstatně vyšší a snižuje se v závislosti na úbytku napětí v jednotlivých oblastech. Směr pohybu plazmového toku je dán elektromagnetickými silami.
- III. **Anodová skvrna** je oblast na anodě, kde dochází k pohlcování elektronů [5], [8].

Při obloukovém svařování stejnosměrným proudem hovoříme o přímé polaritě oblouku, pokud je na elektrodě zapojen minus pól svařovacího zdroje a na základním materiálu plus pól. V opačném případě, je-li na elektrodě pól plus a na základním materiálu minus, hovoříme o nepřímé polaritě [5].

2.4.1 Fyzikální podstata oblouku MAG

Specifikem oblouku metody MAG je, že plynné prostředí, ve kterém dochází k elektrickému výboji, je tvořeno nejen ochranným plynem, ale také parami kovů ze základního a přídatného materiálu. Elektrická vodivost oblouku je zajištěna především ionizací ochranných plynů [5].

V závislosti na velikosti proudu se mění napětí oblouku dle statické voltampérové charakteristiky. Při vyšších hodnotách proudu mají charakteristiky téměř lineární průběh. Statické charakteristiky také mění svoji polohu v grafu v závislosti na délce oblouku. Funkční závislost lze vyjádřit tímto tvarem:

$$U = 15 + 0,035 \cdot I \quad [\text{V}] \quad (2.1)$$

Jak je patrné ze vztahu, se zvětšujícím svařovacím proudem je potřeba úměrně zvyšovat i napětí na oblouku [5], [7]. Velikost svařovacího proudu se taktéž odvíjí od rychlosti posuvu drátu. Proud je při svařování MAG přímo úměrný rychlosti odtavování drátu a zároveň se mění i podle průměru a typu elektrody (přídatného drátu – plný drát, plněná elektroda) a druhu použitého ochranného plynu. Při robotizovaném svařování se rychlost posuvu elektrody může během procesu měnit, a to v závislosti na velikosti proudu.

Elektrický oblouk je stabilní pouze v určitém rozsahu daných parametrů a veškeré změny proudu, či napětí mimo optimální rozsah mohou vyvolat poruchy v celém procesu. Např. při zkrácení délky oblouku je nutné zvýšit proud a rychlost odtavování elektrody. Pro svařování tavící se elektrodou v ochranném plynu se využívá plochá neboli tvrdá charakteristika. Zdroje s plochou charakteristikou reagují na změnu odporu, resp. změnu délky elektrického oblouku, zvýšením, nebo snížením svařovacího proudu pro zachování

konstantního napětí (konstantní délky oblouku). Jelikož je rychlost odtavování svařovacího drátu úměrná velikosti svařovacího proudu, dochází při změně odporu i k regulaci rychlosti podávání svařovacího drátu [7], [8].

Při svařovacím procesu metodou MAG se používá stejnosměrný proud a nepřímá polarita, tzn. tavící se elektroda je zapojena ke kladnému pólu a základní materiál je připojen k zápornému pólu. Tímto zapojením se docílí vhodné teplotní bilance, jelikož dochází k menšímu ovlivnění ZM a zvýšení odtavovacího výkonu. Zároveň je zajištěna stabilita oblouku a vhodné formování svaru.

2.4.2 Přenos kovu v oblouku MAG

Přenos kovu představuje způsob natavování konce přídavného materiálu, tedy tavící se elektrody, pohyb kapek tekutého kovu z elektrody v elektrickém oblouku a jejich dopad do svarové lázně. Natavování konce elektrody je zajištěno tepelnou energií elektrického oblouku, která se na ni uvolňuje. Část drátu od kontaktní špičky až po místo odtavování je jako vodič ohřívána i Joulovým teplem [9].

Vlivem působení povrchového napětí, gravitační síly a elektromagnetických sil dochází k oddělování kapek tekutého kovu od povrchu (konce) elektrody a jejich pohybu ve svařovacím oblouku. Poměr jednotlivých sil má vliv na charakter přenosu, velikosti a počet kapek a na jejich rychlost v oblouku. Rychlost oddělování kapek je o to intenzivnější, čím vyšší je proudová hustota na elektrodě. Způsob přenosu kovu výrazně ovlivňuje rozstřík svarového kovu a průběh metalurgických dějů [8], [9].

O druhu přenosu kovu rozhoduje především velikost proudu, druh a průměr elektrody a druh ochranné atmosféry. Dle velikosti proudu na oblouku rozlišujeme následující přenosy kovu:

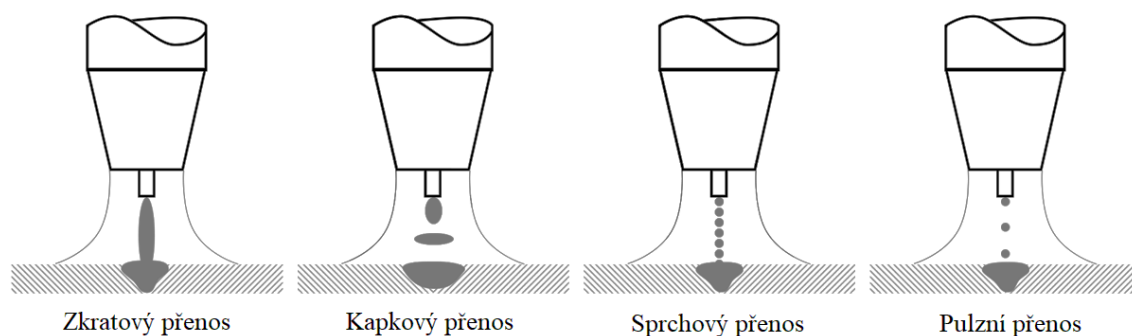
- I. Zkratový přenos je zajištěn při nízkých hodnotách proudu na oblouku (60 až 180 A) a je charakteristický svým krátkým obloukem. Používá se za použití směsného plynu, nebo čistého CO₂ ke svařování malých tlouštěk základního materiálu, svařování v nucených polohách a tvorbu kořenových vrstev. Je doprovázen rozstříkem svarového kovu.
- II. polozkratový přenos, který se realizuje při hodnotách proudu do 200 A a slouží ke svařování středně velkých tlouštěk ZM,
- III. bezzkratový přenos, kterého je docíleno při vyšších hodnotách proudu a napětí na oblouku a je charakteristický svým dlouhým obloukem. Hodnoty proudu jsou v rozsahu od 200 až 500 A [5], [7], [9].

Dle proudové hustoty elektrody se bezzkratový přenos dále dělí na:

- i. kapkový přenos (obr. 8), který se realizuje při nízké proudové hustotě a používá se při svařování ocelí větších tlouštěk, a to ve směsných atmosférách (Ar + CO₂),
- ii. sprchový přenos (obr. 9), který je realizován při vysoké proudové hustotě ve formě malých kapek. Tento přenos se používá opět pro svařování větších tlouštěk a jelikož jde o stabilní proces, nedochází téměř k žádnému rozstříku [7], [8].

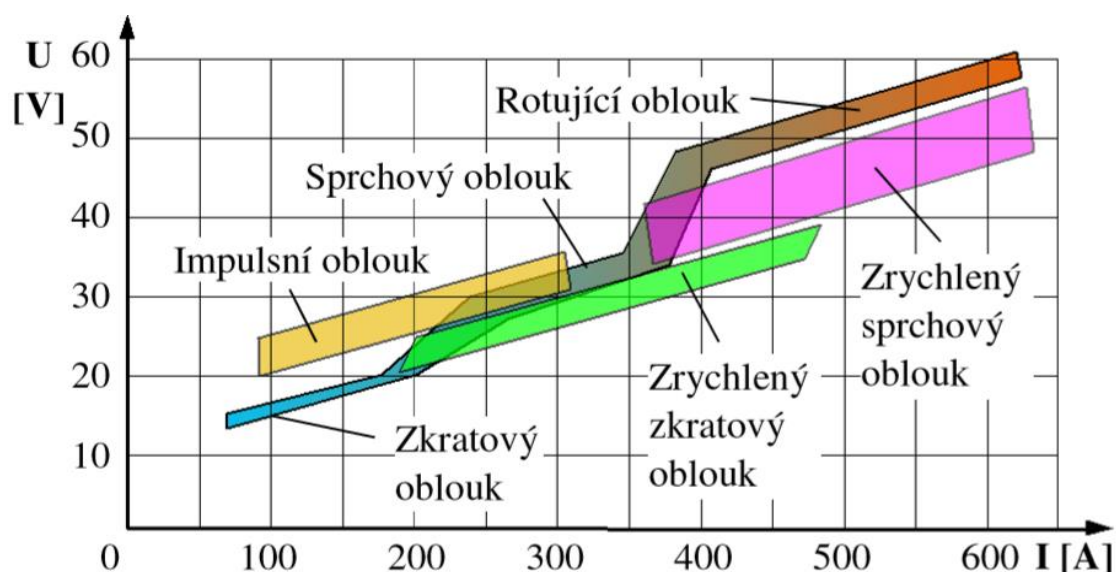
- iii. impulzní přenos, který se realizuje v širokém rozsahu tepelných příkonů a své praktické využití nachází především v robotickém svařování a při svařování menších tlouštěk materiálů. K přenosu dochází opět pomocí kapek, jejichž velikost je závislá na frekvenci proudových impulzů, kdy při vyšších frekvencích je vytvořen menší objem kapek. Proces je opět stabilní a dochází při něm k minimálnímu rozstříku.

Jednotlivé druhy přenosu kovu v oblouku a přesný vzhled jejich kapek jsou znázorněny na obrázku 6.



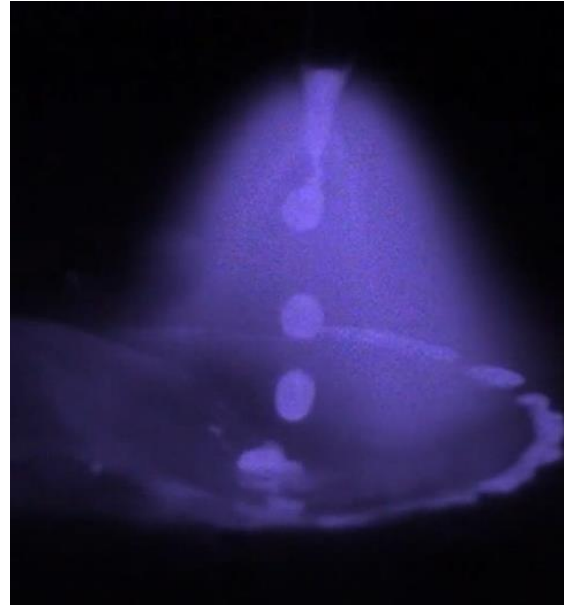
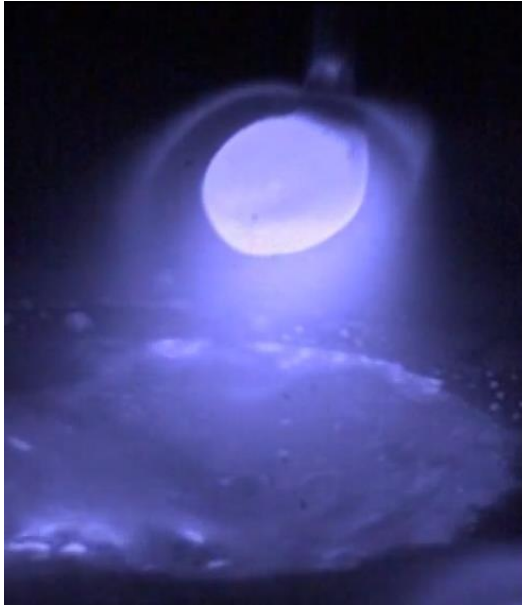
Obr. 6: Druhy přenosů kovu v oblouku MAG a vzhled kapek jednotlivých přenosů

Jednotlivé druhy přenosu jsou také patrné z grafické závislosti napětí (U) – proud (I) na obrázku 7.



Obr. 7: Znázornění jednotlivých přenosů v grafické závislosti napětí (U) – proud (I) [14]

Při bezzkratovém přenosu dochází k vytvoření dlouhého oblouku, jehož délka přesahuje 3 mm, napětí přitom dosahuje vysokých hodnot. Při těchto podmínkách se na konci svařovací elektrody vytvoří kapka, která se ani nedotkne základního materiálu (nevytvoří tak zkrat), oddělí se a volně se pohybuje v oblouku. Kapky tekutého kovu jsou obecně typické svým velkým rozměrem, který dosahuje až trojnásobku průměru svařovací elektrody, nebo naopak značným množstvím malých kapiček [7]. Při malé proudové hustotě se vytváří velké kapky (obr.8), při vysoké hustotě se vytváří malé kapky (obr. 9).

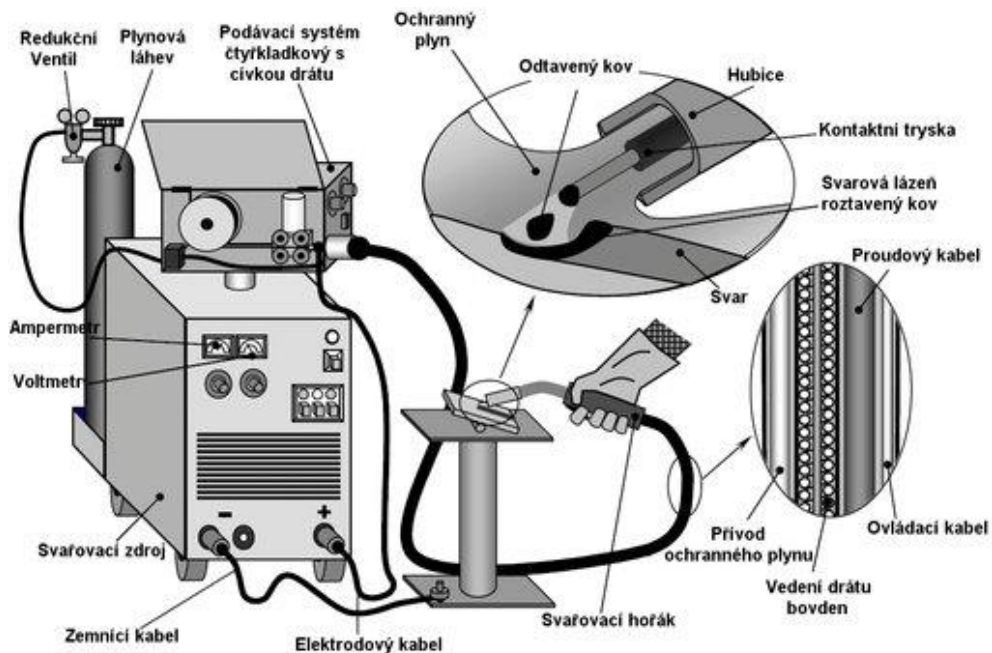


Obr. 8: Fotografie kapkového přenosu [14] Obr. 9: Fotografie sprchového přenosu [14]

Po vytvoření krčku na kapce taveniny dochází k jejímu odštížení od konce elektrody vlivem elektromagnetické síly. Tento jev je označován jako pinch – efekt a dochází k němu po překročení tzv. mezní proudové hodnoty [7].

2.5. Zařízení na svařování MAG

Svařování metodou MAG je v praxi využíváno v různých stupních mechanizace a robotizace. Typicky jako poloautomatické, mechanizované, robotizované a automatizované. Veškerým těmto variantám musí být uzpůsobena i konstrukce svařovacího zařízení. Znázornění částí zařízení pro svařování metodou MAG viz obr. 10.



Obr. 10: Zařízení na svařování tavící se elektrodou [15]

Zařízení na svařování MAG obsahuje svařovací zdroj, mechanismus pro podávání tavící se elektrody (podavač přídatného drátu), svařovací hořák, řídicí jednotku, zásobník plynu, chladicí jednotku a soustavu hadic pro přívod elektrického proudu, PM, chlazení hořáku a ochranné atmosféry [1].

2.5.1. Svařovací zdroje

Pro svařování MAG se používají zdroje stejnosměrného proudu s plochou statickou charakteristikou, jako jsou např.:

- I. svařovací agregáty (točivé stroje),
- II. svařovací usměrňovače s transduktorem (tlumivkou),
- III. svařovací usměrňovače s tyristorovým řízením,
- IV. svařovací usměrňovače sekundárně taktované,
- V. svařovací usměrňovač primárně taktovaný (invertory) [5].

Točivé stroje obvykle sestávají ze zdroje proudu pro oblouk, tedy svařovacího dynama, a z motoru, který dynamo pohání. Oba tyto stroje mají společnou osu a tvoří pojízdný celek. Jako pohon lze použít i diesellový a benzinový motor především tam, kde není možnost napojení na elektrickou síť. V dynamu se vyrábí elektrický proud indukci ve vodičích pomocí kotev, které se otáčejí v elektromagnetickém poli. Zdroje nízkého výkonu mají proudový rozsah maximálně 300 A a zdroje vysokého výkonu maximálně 750 A [5]. Točivé stroje se používají pro svařování sprchovým i zkratovým přenosem.

Svařovací usměrňovače se zpravidla skládají z transformátoru a diodového usměrňování a mají plochou svařovací charakteristiku. Pomocí tlumivky dochází ke změně indukovaného odporu ve svařovacím obvodu, tudíž za tlumivkou je proud již usměrněný. Pro optimalizaci dynamických vlastností lze zařadit i vyhlazovací tlumivku [5], [11].

Jednotlivé prvky sekundárně taktovaného svařovacího usměrňovače mají následující funkce:

- i. Transformátor mění síťové napětí např. na 50 V při vyšším proudu.
- ii. Usměrňovač mění střídavý proud na proud stejnosměrný (asi 65 V).
- iii. Tlumicí kondenzátory mají za úkol akumulovat energii a udržovat napětí.
- iv. Tranzistorové taktování přerušuje pouze vysoké frekvence proudového obvodu.
- v. Vzduchová tlumivka představuje akumulátor, který vyhlazuje proud.
- vi. Regulátor napětí srovnává hodnoty na napětí a řídí zpětnou vazbou tranzistorové taktování [5].

Jedná se o vhodný zdroj pro robotizované svařování. Mezi přednosti sekundárně taktovaného usměrňovače a invertoru se řadí především velmi rychlá regulace napětí, značná stabilita oblouku, ve kterém téměř nedochází k rozstříku, a vysoká účinnost.

Při svařování MAG je nutné znát některé důležité charakteristiky svařovacích zdrojů, jako je napětí naprázdno, pracovní napětí, dovolený zatěžovatel, jmenovitý proud, trvalý svařovací proud atd [5].

2.5.2. Mechanismus na posuv a vedení elektrody

Při svařování MAG je nutné pro dosažení stability procesu zabezpečit rovnoměrné podávání elektrody. K tomu je potřeba, aby bylo dosaženo konstantní obvodové rychlosti podávacích kladek, správné velikosti působících přitlačných sil na kladky, správného typu kladek a správného průměru bowdenu.

Jedná se o mechanickou část svařovacího zařízení, která může být umístěna ve skříni svařovacího zdroje, v řídicí skříni, a nebo přímo v hořáku. Podavač sestává z regulačního elektromotoru, nebo motoru s převodovkou a z podávacích kladek, jejichž velikosti drážky se volí s ohledem na průměr elektrody. Z podavače vstupuje elektroda do bowdenu, který zajišťuje usměrnění pohybu drátu až ke svařovacímu hořáku [7].

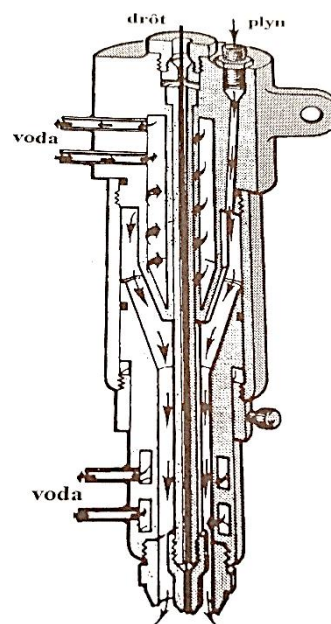
Pro průmyslové využití se dnes pro svařování ocelí používají 4 kladkové podavače a kladky s lichoběžníkovými drážkami. Délka vedení (hořáku) s jedním podavačem je max. 4,5 m, jinak musí být použity systémy s více podavači (např. push-pull).

2.5.3. Svařovací hořáky

Svařovací hořáky jsou zařízení, která zajišťují přívod tavicí se elektrody do místa oblouku, a tím i přenos elektrického proudu. Zároveň zde dochází k přívodu ochranného plynu, který je nutný k ochraně svarové lázně, a průtoku chladicí kapaliny, nebo plynu sloužící k chlazení kontaktní koncovky a dýzy, což je mechanický prvek sloužící k usměrnění průtoku ochranného plynu [7]. Svařovací hořák je patrný z obrázku 11.

Kontaktní koncovka (špička), která zajišťuje přívod svařovacího proudu na tavicí se elektrodu, je společně s plynovou dýzou nejvíce tepelně namáhaný prvek celého hořáku. Proto je chladicí systém zaměřen právě na tyto dvě části hořáku. Z důvodu tepelného namáhání jsou také oba dva dílce snadno vyměnitelné [7].

Průměr kontaktní koncovky je závislý na průměru tavicí se elektrody a měl by být o 0,2 mm větší než průměr elektrody. Průměr dýzy se mění dle podmínek svařování, nejvíce dle způsobu svařování (robotické, ruční), dle velikosti proudu a dle tepelné vodivosti základního materiálu [7].



Obr. 11: Strojní svařovací hořák

2.5.4. Zásobník ochranného plynu

Technické plyny jsou nejčastěji dodávány v tlakových nádobách (lahvích) z oceli, které jsou ve spodní části opatřeny patkou. V horní části se nachází hrdlový kroužek, ve kterém se nachází závit na upevnění ventilu a závit na upevnění ochranného kloboučku.

Redukční ventil slouží ke snížení vysokého tlaku v lahvi na tlak pracovní. Redukční ventil je proto opatřen tlakoměrem, průtokoměrem na měření průtoku odebraného plynu [7]. Barevné označení typu plynu nalezneme v horní části tlakové lahve dle ČSN

EN 1089-3. Směsné aktivní argonové ochranné atmosféry (používané pro MAG) jsou označeny světle zelenou barvou.

2.6. Elektrody pro svařování MAG

Pro svařování v ochranných atmosférách se používají holé svařovací dráty, které jsou dodávány navinuté na cívkách o hmotnosti od 5 do 18 kg, nebo v zásobnících (Marathon pac). Pro svařování MAG a FCAW se používají svařovací elektrody plné, nebo plněné, tzv. trubičkové dráty. Přídavné materiály obsahují legury a další přísady, které zajišťují metalurgické reakce jako rafinaci, dezoxidaci a zároveň dolegování svarového kovu [16].

Plné dráty se vyrábějí tažením za studena na požadované průměry, které dosahují nejčastěji hodnot od 0,8 do 1,6 mm. V průmyslu jsou nejpoužívanější plné dráty o průměru 0,8 až 1,2 mm.

Plněné elektrody jsou z hlediska technologického náročnější na výrobu. Dráty se svinují z plechů s podélným švem jako tvarově uzavřené, bežešvé, nebo podélně svařené. Pláště jsou většinou vyráběny z nízkouhlíkové oceli a náplně jsou tvořeny struskotvornými materiály a tavidly, která jsou taktéž obsažena v bazických, kyselých, rutilových, fluoridových a dalších elektrodách. Náplně obsahují vápenec, kazivec, dolomit, živec, feromangan, ferosilicium, ferowolfram, vodní sklo, celulózu, škrob, mouku a rašelinu. Relativně malé rozšíření plněných elektrod ve svařovacích provozech v ČR je způsobeno jejich vyšší pořizovací cenou, která je zhruba 2,5 až 3 krát vyšší než u plného drátu [16], [17].

V průmyslu se hojně používají elektrody plněné kovovým práškem. Prášek, tvořící náplň, je převážně železný, s malým přídavkem dezoxidačních, legujících a ionizačních látek. Oproti plněným elektrodám (tavidlovým) mají nejvyšší výkon svařování, vysokou účinnost procesu (téměř 90 %) a netvoří strusku. Jsou určené pro všechny polohy svařování.

Přídavný materiál pro svařování ocelí je legován mnoha prvky pro zajištění požadovaných vlastností. Kromě železa, které tvoří největší objem, obsahuje plný drát taktéž uhlík, mangan, křemík, fosfor, titan, zirkon, hliník, nikl, molybden, chrom, vanad atd., jejichž zastoupení je závislé na chemickém složení a struktuře základního materiálu [15], [16].

Uhlík se vyznačuje tím, že zvyšuje pevnost a tvrdost ocelí, ale zároveň snižuje houževnatost a s rostoucím množstvím podporuje riziko vzniku trhlin za studena. Mangan a křemík mají dezoxidační a rafinační účinky, jelikož zbavují svarovou lázeň síry, a to díky své vysoké afinitě k ní. Křemík navíc příznivě ovlivňuje tekutost strusky tak, že při tuhnutí snadno vyplave na povrch. Křemík (< 1%) rovněž zajišťuje zvýšení pevnosti svarového kovu. Obsah fosforu a síry by měl být co nejnižší, jelikož oba prvky představují nečistoty, které zvyšují riziko vzniku trhlin za tepla. Titan, niob, tantal, zirkon i hliník mají dezoxidační a precipitační funkci ve svarech mikrolegovaných jemnozrnných ocelí, podporují vznik precipitátů karbidů, nitridů a karbonitridů. Dále tyto prvky snižují riziko vzniku pórů ve svarech. Molybden a vanad zvyšují pevnost a houževnatost svarů, zvláště

při provozu svařenců z žáruvzdorné a žárupevné oceli za vysokých teplot. Chrom je základní legurou přídatných materiálů všech korozivzdorných ocelí, nikl pak pro austenitické a feriticko – austenitické korozivzdorné oceli [16], [17].

2.7. Vliv ochranných plynů na svarový kov

Aktivní plyny při svařování MAG zajišťují ochranu konce tavící se elektrody, ochranu odtavených kapek tekutého kovu, ochranu svarové lázně a intenzivně vyhřátých oblastí základního materiálu před negativními účinky okolní atmosféry (O₂, H₂, N₂), především před jejich oxidací a naplyněním. Další funkcí ochranné atmosféry je zajištění co nejpríznivějších podmínek pro zapálení a hoření oblouku a dále pro přenos kovu v elektrickém oblouku a jeho stabilitu [18].

Aktivní plyny mají vliv na tepelný výkon elektrického oblouku, přenos kovu v oblouku, chemické složení, formu a rozměry závaru, dále na celistvost a vlastnosti svarových spojů a produktivitu a hospodárnost svařovacího procesu [7].

2.7.1. Klasifikace ochranných atmosfér

Dle normy ČSN EN ISO 14175 jsou ochranné plyny klasifikovány do skupin podle možného ovlivnění svařovacího, nebo řezacího procesu a dále jsou klasifikovány do podskupin podle obsahu hlavních složek. Hlavní skupiny ochranných plynů jsou uvedeny v následující tabulce 1.

Tabulka 1: Hlavní skupiny technických plynů dle ISO 14175

Označení skupiny	Charakteristika ochranného plynu
I	Inertní plyny a směsi inertních plynů
M1, M2 a M3	Oxidační směsi obsahující kyslík, a/nebo oxid uhličitý
C	Vysoce oxidační plyn a vysoce oxidační směsi
R	Redukční směsi plynů
N	Plyn s malou reaktivitou nebo redukční směsi plynů obsahující dusík
O	Kyslík
Z	Směsi plynů obsahující neuvedené složky nebo směsi se složením mimo rozsahy uvedené v tabulce 1.

Skupina M1, M2 a M3 představuje slabě oxidační, středně oxidační a další oxidační směsi obsahující argon + kyslík +/- nebo oxid uhličitý. Tyto ochranné směsi jsou určeny především pro svařování MAG a jejich složení je uvedeno v tabulce 2.

Tabulka 2: Chemické složení skupiny M1, M2 a M3 dle ISO 14175

Hlavní skupina	Složky v objemových %			
	oxidační		inertní	redukční
	CO ₂	O ₂	Ar	H ₂
M1	0 až 5,0	0 až 3,0	zbytek	0 až 5,0
M2	0 až 25	0 až 15	zbytek	
M3	0 až 50	0 až 15	zbytek	

Skupina R představuje redukční plynové směsi, které jsou založeny na dominantním obsahu argonu s určitým podílem vodíku. Skupina N jsou plyny, které obsahují dusík, event. ve směsi s argonem či vodíkem. Pro MAG svařování lze použít skupinu N obvykle pro sekundární ochranu kořene.

2.7.2. Oxid uhličitý

Oxid uhličitý (chemická značka CO₂) je nehořlavý, bezbarvý plyn, při vysokých koncentracích specifické kyselé chuti. Při teplotě 15 °C a atmosférickém tlaku 0,1 MPa dosahuje CO₂ hustoty 1,9136 kg·m⁻³, je přibližně 1,5 krát těžší než vzduch. V tuhém stavu (-57 °C) je bílý a tvrdý a při pokojové teplotě se pozvolně mění na plyn [7].

Je získáván z přírodních zdrojů, či z kvasných procesů a poté je čištěn. Vyšším tlakem je možné CO₂ zkapalnit (např. při 0 °C tlakem 3,6 MPa). Oxid uhličitý je dodáván v ocelových tlakových nádobách, které dosahují obsahu od 5 l až do 40 l, v kapalném stavu. Z 1 kg tekutého CO₂ získáme asi 500 l plynu a jedna tlaková nádoba s 10 kg plynu vydrží při spotřebě 15 l·min⁻¹ asi 5,5 hod čistého svařovacího času. Plyn je z lahve odebíráán přes redukční ventil, který slouží k zabezpečení potřebného pracovního tlaku. Při průchodu ventilem se mění skupenství a CO₂ opět zaujímá svou plynnou podobu. Tlakové nádoby s CO₂ jsou označeny šedým pruhem dle EN 1089-3 [5], [18].

Při svařování metodou MAG se čistý oxid uhličitý (tzn. 99,7 % CO₂) používá jen výjimečně, většinou se používá jako složka směsných plynů (např. Ar + CO₂ (82/18)). Čistotu CO₂ stanovuje norma ČSN EN ISO 14175 [7].

Oxid uhličitý je stabilní a chová se jako inertní plyn až do teploty 700°C, při vyšších teplotách disociuje na oxid uhelnatý CO⁺ a kyslík O⁻, což znamená, že na základní materiál působí oxidačně [7].

Jedním z ukazatelů, dle kterých ochranné plyny hodnotíme, je stabilita a zapalování oblouku. Čím menší je disociační a ionizační energie, tím snazší je zapalování oblouku. Součet disociační a ionizační energie pro CO₂ je 18,7 eV, jak je patrné z tabulky 3.

Tabulka 3: Disociační a ionizační energie plynů [7]

Druh plynu	Disociační energie (eV)	Ionizační energie (eV)
H ₂	4,5	13,6
O ₂	5,1	13,6
CO ₂	4,3	14,4
N ₂	9,8	14,5
He		24,6
Ar		15,8

V čistém oxidu uhličitém nelze dosáhnout stabilního bezzkratového přenosu (tzn. sprchového oblouku) kovu v oblouku. Proto se čistý oxid uhličitý používá především při svařování zkratovým přenosem. Při svařování dlouhým obloukem, či sprchovým přenosem se používají pouze směsi plynů na bázi argonu [7], [18].

Rozstřík svarového kovu je jev, který doprovází jak zkratový, tak bezzkratový přenos. Intenzita rozstříku narůstá s vyšší koncentrací CO₂ ve směsných atmosférách na bázi argonu. Přidáním O₂ do směsi se rozstřík naopak snižuje [7].

2.7.3. Argon

Argon (Ar) je jednoatomový plyn bez barvy i bez zápachu a chuti. Jedná se o plyn, který je obsažen ve vzdušné atmosféře v obsahu 0,94 obj.% a vyrábí se frakční destilací vzduchu. Pro účely svařování je argon dodáván v plynném v kovových tlakových lahvích. Jeho hustota je $1,784 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, je těžší než vzduch. Tato vlastnost podporuje efektivitu ochranné atmosféry [7], [18].

Argon má nízkou tepelnou vodivost, zároveň se vyznačuje velmi dobrými ionizačními vlastnostmi, což činí z argonu nejpoužívanější ochranný plyn. Tyto parametry mají vliv na vlastnosti a teplotu elektrického oblouku. Ten se v argonu dobře zapaluje a má vysokou stabilitu.

Argon je dodáván v čistotě Ar 99,996 (označení 4.6), nebo Ar 99,999 (označení 5.0). Obvykle je dodáván v lahvích o objemech 20, 40, nebo 50 l, přičemž plnicí tlak činí 15 až 20 MPa. Pro větší odběry se používají zásobníky na argon v kapalném stavu [5], [7].

Cena technického argonu se odvíjí od jeho čistoty. Čistý argon se při svařování tavící se elektrodou používá při svařování hliníku (MIG). Častěji se však používá jako směsný plyn a dalšími plyny [18].

2.7.4. Kyslík

Kyslík (O_2) je silně oxidační plyn, proto nelze použít jako ochranný plyn (samostatně), ale v omezeném množství lze použít do ochranných směsí (s Ar). Průmyslově se vyrábí rektifikací, tedy mnohonásobnou částečnou destilací zkapalněného vzduchu při nízké teplotě, nebo elektrolytickým rozkladem vody. Atmosférický kyslík obsahuje stopy dusíku a dalších plynů (nečistot), a proto se pro svařování používá kyslík průmyslový [18].

2.7.5. Směsi plynů

Při svařování čistým oxidem uhličitým není dosaženo stabilního svařovacího procesu a pravidelného přenosu kovu v oblouku. Tvar, či celistvost svaru taktéž nedosahuje požadované kvality, a proto se jednokomponentové plyny nahrazují vhodnými směsmi na bázi argonu [7]. Při optimálním složení směsi lze podstatně zvýšit stabilitu oblouku, produktivitu svařovacího procesu, dosažený průvar, snížit rozstřík a zlepšit formování svarové housenky. Vždy je taktéž nutné zohledňovat technologické vlastnosti základního materiálu (např. náchylnost na oxidaci) a dle nich zvolit ochrannou atmosféru [7].

Ve velkých provozech a v případech, kdy je kladen důraz na kvalitu a produktivitu svařování, se používá již výhradně směs argonu a oxidu uhličitého. Podíl CO_2 ve směsi může být maximálně 25 %. Při vyšším podílu CO_2 už by argon ve směsi byl zbytečný. Používá se hlavně při svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí. Nejznámější směsi jsou směsi 82 % Ar + 18 % CO_2 nebo 92 % Ar + 8 % CO_2 .

Směsný plyn na bázi argonu s příměsí kyslíku se používají zejména při svařování vysokolegovaných (např. korozivzdorných) ocelí. Podíl kyslíku ve směsi by neměl překročit 5 %. Nejpoužívanější plyny jsou 97 % Ar + 3 % O_2 nebo 99 % Ar + 1 % O_2 .

Vícesložkové směsi na bázi argonu obsahují mimo složku argonu CO₂, O₂ a další. Jedná se o plyny pro speciální účely svařování (např. svařování s menší emisí škodlivin). Klasickým aktivním vícesložkovým plynem je 93 % Ar + 5 % CO₂ + 3 % O₂ [9].

Vždy je taktéž nutné zohledňovat technologické vlastnosti základního materiálu (např. náchylnost na oxidaci) a dle nich zvolit ochrannou atmosféru [7].

3. Vysokopevné oceli

Vysokopevné oceli HPS, z anglického "High Performance Steels", je označení typu ocelí, které vykazují vyšší hodnoty mechanických vlastností, jako je mez pevnosti a mez kluzu v porovnání s oceli, které se běžně používají pro stavbu konstrukcí. Tyto oceli se zároveň vyznačují dobrou houževnatostí, svařitelností a tvařitelností za studena.

Vysokopevné oceli jsou vyvíjeny více než 50 let a pro své vynikající mechanické vlastnosti a svařitelnost se používají v mnoha oblastech [19]. V současné době dochází díky vývoji a aplikacím v oblasti konstrukčních ocelí ke stále většímu používání. V posledních 15 letech významně vzrostla spotřeba těchto materiálů a pro výrobu běžných konstrukcí se již často používají oceli pevnostní třídy S420 až S690. Tyto oceli se vyrábí až do pevnostní třídy S1100. Široké využití vysokopevných ocelí ve stavebnictví a strojírenství má příznivý vliv na vývoj cen těchto perspektivních materiálů a v mnoha případech je dokonce z hlediska nákladů hospodárnější použití vysokopevných ocelí než použití klasických konstrukčních ocelí s horšími pevnostními vlastnostmi [4].

Konstrukční požadavky na materiál často vyžadují jednu, nebo několik optimalizovaných charakteristik. Ocele HPS mají například vyšší mez kluzu a mez pevnosti a zachovávají si vynikající poměr hmotnosti k pevnosti [20]. Výrobou HPS byla uspokojena poptávka po redukci celkové hmotnosti konstrukcí ve stavebních projektech a průmyslových aplikacích. Tyto oceli se používají pro stavbu výškových budov, hal, mostů s dlouhým rozpětím a průmyslových svařovaných výrobků (nakladače, jeřáby apod.).

Na obr. 12 je vyobrazen most z konstrukční oceli S690QL a na obr. 14 jeřáb z těžké oceli, která má velmi široké využití i při výrobě zvedacích souprav, zdvihacích zařízeních, zemědělských strojů a přívěsů [4], [21]. Oceli s mezí kluzu R_e nad 500 MPa se také používají pro namáhané díly speciálních konstrukcí, např. pro zařízení na těžbu a dopravu rud, uhlí a jejich části jako skipové nádoby pro vertikální dopravu rud a uhlí, klece, skipoklece a ostatní části důlních zařízení. Na obr. 13 je znázorněna ropná věž, jejíž konstrukce je vyhotovena taktéž z oceli S690QL.



Obr. 12: Konstrukce mostu z oceli S690QL [21]



Obr. 13: Konstrukce ropné věže z oceli S690QL [21]



Obr. 14: Jeřáb z vysokopevné oceli S690QL [22]

Ve Spojených státech amerických byla první vyvinutou vysokopevnou ocelí HPS 485W (označovaná také jako HPS 70W) s minimální mezí kluzu R_e 485 MPa, která je dnes na trhu velmi dobře dostupná a je uvedena v americké normě ASTM A709. HPS 485W lze vyrobit kalením a popouštěním, nebo termomechanickým řízeným válcováním. USA přijaly pro výrobu HPS 485W postupy termomechanického zpracování, protože proces kalení a následného popouštění omezuje délky polotovarů na 15,2 m, zatímco termomechanickým zpracováním lze vyrábět desky do délky 38 m, a to v závislosti na hmotnosti [20].

3.1 Jemnozrnné oceli

Současný trend v oblasti svařovaných ocelových konstrukcí klade vysoké nároky na výběr základního materiálu. Jednak musí konstrukce vyhovovat maximálnímu stanovenému zatížení (pevnost, houževnatost) a jednak je kladen důraz na redukcii hmotnosti, díky čemuž dochází i k poklesu nákladů při výrobě (čas dělení materiálu, manipulace, počet vrstev svaru aj.), i při provozu vlastního zařízení [23].

Takovéto požadavky splňují v současnosti tzv. jemnozrnné oceli, jejichž struktura vykazuje velmi dobré pevnostní vlastnosti. Legující prvky společně s tepelným zpracováním těchto ocelí mají příznivý vliv na velikost zrn ve struktuře. Zrno se stává menším, což vede k nárůstu hodnot mechanických vlastností v důsledku zpevnění hranicemi zrn, které jsou v případě jemnozrnných ocelí delší. V současnosti je předmětem aplikovaného výzkumu výroba materiálů s ultrajemnozrnnou strukturou, tedy nanostrukturou [23], [24]. U takových materiálů, hlavně ocelí, ale také hliníku a titanu, dosahují pevnostní charakteristiky společně s plasticitou vysokých hodnot. Tyto materiály budou použity především tam, kde bude kladen důraz na snížení hmotnosti konstrukce, a to při dobré houževnatosti (slitiny hliníku v leteckém průmyslu, vysokopevnostní ocel v jeřábové technice), nebo kde vysoká pevnost a houževnatost v kombinaci s biokompatibilitou zabezpečí větší životnost součásti (titan v implantátech).

Příznivý vliv na pevnost ocelí má kromě zjemňování zrna také vylučování tvrdých částic karbidů a nitridů, tzv. precipitátů, díky nimž dochází ke zpevnění v matici. Na pevnostní charakteristiky nelegovaných konstrukčních uhlíkových ocelí má hlavní vliv množství uhlíku a manganu. Vzhledem ke skutečnosti, že uhlík vytváří se železem karbidy, významně přispívá ke zvýšení tvrdosti a pevnosti. Mangan v oceli zvyšuje pevnost a tvrdost, taktéž ale snižuje tažnost [23], [25].

Vhodným zvyšováním obsahu legur (do určité hranice) dochází sice k nárůstu hodnot mechanických vlastností dané oceli, ale zároveň se snižuje svařitelnost. Aby byla zachována dobrá svařitelnost ocelí, používá se tzv. mikrolegování. Jedná se o dolegování materiálu velmi malým obsahem prvků, jako je hliník, titan, niob a vanad, kdy celkové množství legur nepřesahuje 0,15 % hm. Tyto prvky vytváří v oceli fáze, jako jsou karbidy, nitridy a karbonitridy, které významně ovlivňují velikost zrna v matici [6]. Zároveň jsou vytvořené precipitáty stabilní i za vysokých teplot (1350 °C), a proto v TOO snižují růst zrna. Po svařování je tedy redukována velikost oblasti růstu zrna v TOO, což je jednou z největších předností mikrolegování. Pomocí mikrolegování je tedy zpevnění materiálu zajištěno jednak precipitáty a jednak jemnozrnností struktury, která má větší počet hranic zrn.

Konečné vlastnosti těchto materiálů závisí nejen na chemickém složení, ale taktéž na tepelném zpracování, v rámci něhož se běžně provádí normalizační žíhání, zušlechťování, termomechanické zpracování apod [23], [26]. Těmito procesy se výrazně zvyšuje vliv legur u mikrolegovaných ocelí.

Dle zmíněného tepelného zpracování lze jemnozrnné oceli rozdělit na:

- I. normalizačně žíhané jemnozrnné oceli (N),
- II. zušlechtěné jemnozrnné oceli (Q),

III. termomechanicky zpracované jemnozrnné oceli (M) [25].

Jak již bylo zmíněno, svařitelnost takové oceli je zachována, a to hlavně z důvodu relativně nízkého uhlíkového ekvivalentu CE (viz kapitola 4.1).

3.1.1. Vývoj v oblasti vysokopevných jemnozrnných ocelí

Z klasických konstrukčních svařitelných ocelí byly systematickým zvyšováním meze kluzu vyvinuty nízkolegované, jemnozrnné materiály s vyšší pevností. Vznikly 2 základní skupiny svařitelných vysokopevných ocelí, které vychází z odlišných fyzikálně – metalurgických koncepcí:

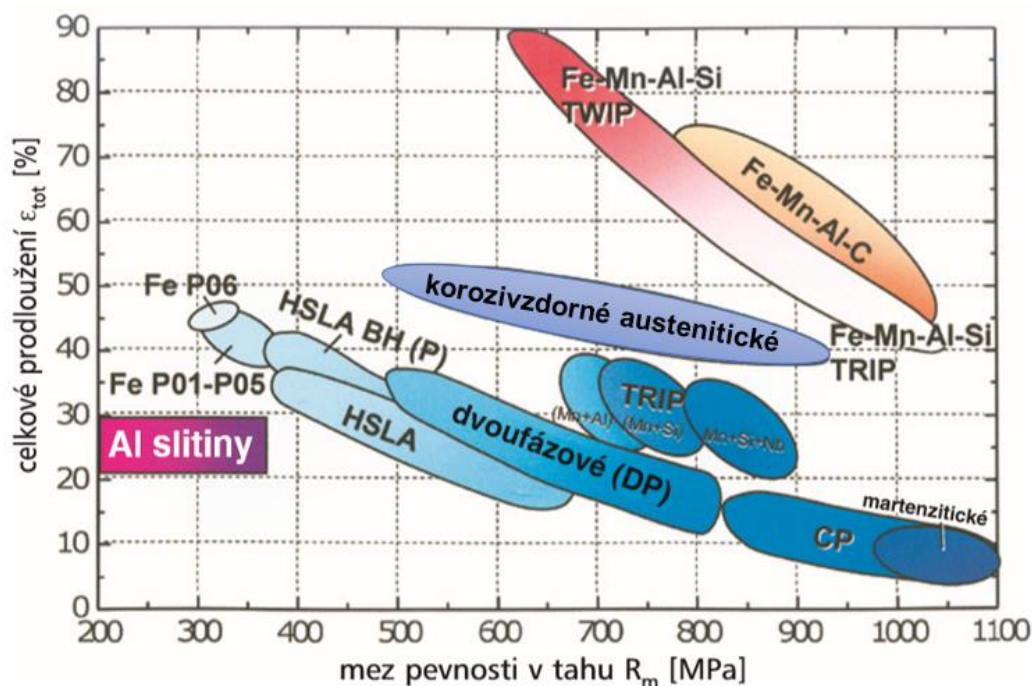
- I. AHSS (Advanced high strength steels) oceli se vyrábí řízeným chlazením a následnou transformací austenitu při nízké teplotě. Konečné vlastnosti a mikrostruktura AHSS závisí na procentuálním obsahu různých mikrolegujících prvků a na procesu chlazení. Příkladem této skupiny jsou oceli DP, CP, TRIP a další, které jsou popsány níže.
- II. HPS (High Performance Steels) oceli zahrnují hlavní třídy, a to HSLA a HSS oceli, které se vyrábí termomechanickým zpracováním, kalením a temperováním. Struktura je velmi jemnozrnná a sestává z temperovaného martenzitu a bainitu, jak spodního, tak i horního, indukovaného řízeným válcováním.

Některé typy vysokopevných ocelí jsou popsány v tabulce č. 4 a závislost jejich prodloužení na mezi pevnosti v tahu je patrná z obrázku č. 15.

Tabulka 4: Typy vysokopevných ocelí

Druh oceli	Popis
Dvoufázová ocel DP (dual phase steel)	Struktura této oceli se skládá z feritu a až 20 % martenzitu. V tomto případě jsou pevnostní vlastnosti závislé na procentuálním podílu martenzitu. Dobrá plasticita je dána vhodnou velikostí zrn feritu.
Vícefázová ocel CP (complex-phase steel)	Struktura obsahuje velmi jemný ferit, bainit, martenzit a zbytkový austenit.
TRIP ocel (transformation induced plasticity)	Multifázová struktura obsahuje 50 – 60 % feritu, 25 – 40 % bainitu a 5 – 15 % zbytkového austenitu. Zbytkový austenit je při 20 °C nestabilní a při deformaci může transformovat na martenzit.
TWIP ocel (twinning induced plasticity)	Jedná se o skupinu uhlíkových ocelí na bázi FeMnAlC (0,5 – 0,7 % C, 17 – 24 % Mn, 9 % Al) se zcela austenitickou strukturou při všech teplotách, jejímž základním deformačním mechanismem je dvojčatění.
IF ocel (interstitial-free steel)	Tato ocel má velmi nízký obsah uhlíku a dusíku, do které je přidáno malé množství Ti a Nb k zamezení nežádoucího zpevnění způsobeného zbytkovým množstvím interstiticky rozpuštěného uhlíku a dusíku.
HSLA (high strength low alloy steel)	Tato ocel obsahuje mikrolegující prvky jako Ti, V a Nb, které zvyšují pevnost řízením velikosti zrna a rovněž precipitačně

zpevňují strukturu. Dalším příspěvkem ke zvýšení pevnosti je také substituční zpevnění, velikost zrna a tepelné zpracování.



Obr. 15: Závislost meze pevnosti na prodloužení vybraných druhů vysokopevných ocelí

Vysokopevná zušlechťená ocel S960QL odpovídající normě ČSN EN 10025-6 se v grafu nachází úplně napravo v oblasti martenzitických vysokopevných ocelí.

3.1.2. Rozdělení konstrukčních za tepla tvářených ocelí

Norma ČSN EN 10025 Výrobky válcované za tepla z konstrukčních ocelí se člení do šesti částí, které jsou patrné z tabulky 5.

Norma ČSN EN 10025 stanovuje dodací požadavky na plechy a tvarové tyče vyrobené válcováním za tepla z konstrukčních ocelí, které se používají pro výrobu svařovaných, šroubovaných a nýtovaných konstrukcí [27].

Pro stavební ocelové konstrukce lze použít oceli podle tab. 5. V prvním sloupci tabulky je uvedena značka (např. S960) a jakostní stupeň (QL) oceli podle ČSN EN 10027-1. Značka oceli odpovídá minimální mezi kluzu při jmenovitých tloušťkách menších než 16 mm. Při větších tloušťkách minimální mez kluzu klesá. Jakostní stupeň oceli označuje minimální hodnotu nárazové práce (L – 27J při -40 °C) při zkoušce rázem v ohybu v závislosti na teplotě [27].

Termomechanicky válcované oceli podle ČSN EN 10025-4 jsou vyráběné řízeným válcováním. Specifické chemické složení oceli a doválcování za nízké teploty vede k vytvoření jemnozrnné struktury s dobrou svařitelností, tvařitelností za studena (ohýbání, lemování apod.) a s vysokými hodnotami nárazové práce [27].

Tabulka 5: Přehled ocelí dle ČSN EN 10025-2 až 10025-6 [27]

ČSN EN 10025-2 Nelegované konstrukční oceli	ČSN EN 10025-3 Normalizačně žíhané/válcované jemnozrnné konstrukční oceli	ČSN EN 10025-4 Termomechanicky válcované jemnozrnné konstrukční oceli	ČSN EN 10025-5 Konstrukční oceli se zvýšenou odolností proti atmosférické korozi	ČSN EN 10025-6 Ploché výrobky s vyšší mezí kluzu po zušlechťování
S235JR	S275N	S275M	S235J0W	S460Q
S235J0	S275NL	S275ML	S235J2W	S460QL
S235J2	S355N	S355M	S355J0WP	S460QL1
S275JR	S355NL	S355ML	S355J2WP	S500Q
S275J0	S420N	S420M	S355J0W	S500QL
S275J2	S420NL	S420ML	S355J2W	S500QL1
S355JR	S460N	S460M	S355K2W	S550Q
S355J0	S460NL	S460ML		S550QL
S355J2				S550QL1
S355K2				S620Q
S450J0				S620QL
				S620QL1
				S690Q
				S690QL
				S690QL1
				S890Q
				S890QL
				S890QL1
				S960Q
				S960QL

Konstrukční oceli s vyšší mezí kluzu po zušlechťování dle ČSN EN 10025-6 představují legované ušlechtilé oceli. Norma obsahuje oceli S460 až S960 s minimální hodnotou meze kluzu od 460 do 960 MPa, která platí pro jmenovité tloušťky do 50 mm. Pro větší tloušťky je mez kluzu nižší. Oceli mohou být dodávány ve třech jakostních stupních: s minimálními hodnotami nárazové práce při teplotách do $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (bez označení), do $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ (označeno symbolem L), nebo do $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ (označeno symbolem L1). Oceli jsou vyráběné válcováním za tepla a výsledným polotovarem jsou plechy a tvarové tyče (profily) [27].

3.1.3. Obchodní značení vysokopevných ocelí

Nejznámější vysokopevné konstrukční oceli nesou obchodní značení WELDOX, nebo StrenX, DOMEX, XABO a ALFORM a jsou distribuovány společnostmi SSAB, VoestAlpine, ThyssenKrupp aj. Tyto oceli dosahují meze kluzu až 1100 MPa. Jedná se o houževnaté, svařitelné a za studena tvaritelné konstrukční oceli [4].

Příbuznými oceli StrenX jsou oceli HARDOX, které dosahují vysoké pevnosti a především tvrdosti (až 600 HB). Jsou vyráběny podobným způsobem jako StrenX, ale nejedná se o konstrukční oceli, nýbrž o oťěrzdorné oceli. Vysokopevné pancéřové oceli nesou obchodní značení ARMOX a vysokopevné nástrojové oceli TOROX [4].

Konstrukční ocel S690QL odpovídající normě ČSN EN 10025-6 nese obchodní značení StrenX 700 (dále také IMEX 700) a je běžně dodávána jako plech o tloušťkách 4 – 6 mm, 8 – 80 mm, nebo 90 – 120 mm, a to ve formátech 1500 × 6000 mm, 2500 × 6000 mm, nebo 2000 × 4000 mm [28].

Vysokopevnostní ocel S960QL odpovídající normě ČSN EN 10025-6 nese obchodní značení StrenX 960, XABO 960, dále také IMEX 960 [28]. Pro účely experimentální části práce byla použita ocel XABO 960 (viz kapitola 3.3).

3.2 Mechanismy zpevňování jemnozrnných ocelí

Pro docílení vysoké pevnosti za současného zachování houževnatosti (vysoká hodnota meze kluzu Re a vysoká hodnota koeficientu deformačního zpevnění) se používají pro konkrétní materiály různé metody ovlivnění struktury. Závěrem výzkumu probíhající v 60. letech minulého století, který se zabýval příčinou pevnosti ocelí a dalších kovů, bylo objevení několika mechanismů zpevňování, které ovlivňují výslednou pevnost materiálu v závislosti na intenzitě daného mechanismu [25]. Jen zmíněné zjemňování zrn u mikrolegovaných ocelí přispívá ke zvýšení pevnosti, ale vede i k příznivému ovlivnění přechodové teploty (přechod mezi křehkým a houževnatým lomem) a tím ke zvýšení houževnatosti. Z tohoto důvodu je ve vědecké sféře pozornost zaměřena právě na tento způsob zpevnění struktury a jsou hledány limitní možnosti. Současně mohou na pevnost materiálu působit v různé míře i další mechanismy zpevnění, které však mohou negativně snižovat houževnatost materiálu, a proto je nutné hledat kompromis mezi oběma charakteristikami [29].

Lze charakterizovat následující mechanismy zpevnění, které se uplatňují u všech kovových materiálů:

- I. zpevňování hranicemi zrn,
- II. zpevnění tuhého roztoku atomy příměsí,
- III. zpevnění částicemi jiných fází,
- IV. dislokační neboli deformační zpevnění,
- V. vliv struktury matrice,
- VI. spolupůsobení jednotlivých mechanismů [23], [25].

3.2.1. Zpevňování hranicemi zrn

Již v dávné minulosti bylo známo, že v důsledku snižování velikosti zrna, tzn. se vrůstající plochou hranice zrna, dochází ke zvýšení tvrdosti a pevnosti. Až na počátku 50. let 20. století vědci Norman James Petch a Eric Ogilvie Hall stanovili vztah pro závislost pevnosti polykrystalického materiálu na velikosti zrna. Vztah je známý jako Hall – Petchův a jeho tvar je:

$$\sigma_e = \sigma_o + k \cdot d^{-0,5}, \quad (3.2)$$

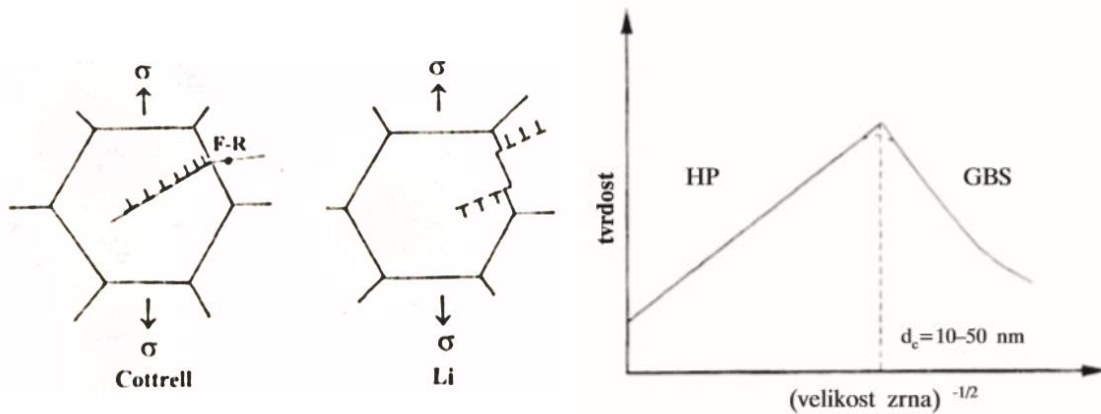
kde σ_e je mez kluzu,

σ_o je napětí charakterizováno třecím napětím mřížky, odporem rozpuštěných cizích atomů, odporem precipitátů přítomných v matici a defekty mřížky,

k je konstanta zohledňující napětí potřebné pro uvolnění nahromaděných dislokací,

d je průměr zrna [29].

Z Hall – Petchova vztahu (3.2) vyplývá, že mez kluzu určitého materiálu je tím větší, čím menší je rozměr zrna. Obdobná zákonitost platí pro tvrdost, i pro lomové napětí při křehkém lomu vysokopevných ocelí. Čím menší je zrno, tím větší napětí je třeba k indikaci trhliny. Vztah lze aplikovat pro různé materiály, a to do rozměru zrna cca 20 – 30 nm, tudíž do oblasti nanokrystalických materiálů, poté se pevnost už nezvyšuje, nebo dokonce klesá, což znázorňuje obrázek 17. Jak je patrné, tvrdost, respektive pevnost, se zvyšuje až do kritické velikosti zrna d_c , což odpovídá velikosti 20 – 30 nm, a to podle Hall – Petchova vztahu. Poté přestávají působit dislokační mechanismy a tvrdost, respektive pevnost, klesá.



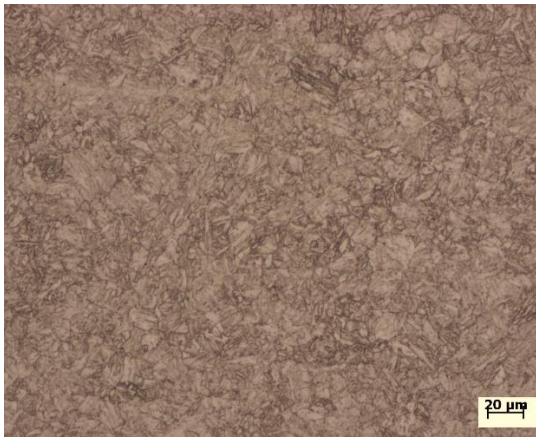
Obr. 16: Modely navržené pro vysvětlení Hall – Petchova vztahu

Obr. 17: Závislost tvrdosti (pevnosti) na velikosti zrna

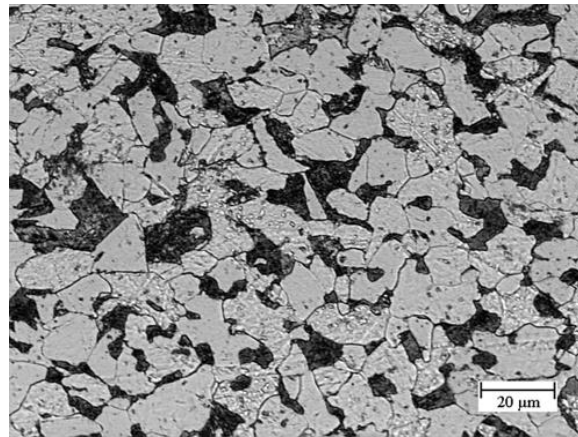
Pro vysvětlení Hall-Petchova vztahu byla předložena řada mechanismů. Příkladem jsou 2 mechanismy, které jsou znázorněny na obrázku 16:

- I. Dle Cottrellova mechanismu dojde ke zpevnění tak, že nahromaděné dislokace před hranicí zrna aktivují tzv. Frank – Readův zdroj v sousedním zrna, který způsobí šíření dislokací po celém materiálu – viz obrázek č. 16 vlevo.
- II. Druhý mechanismus vychází z předpokladu, že se dislokace generují na výběžcích hranic zrn, vznikajících při deformaci – viz obrázek č. 16 vpravo [29].

Pro názornost jsou zde uvedeny dva snímky mikrostruktur v podobném zvětšení, kdy na obr. 18 je patrná jemnozrná struktura bainitické vysokopevné oceli S960QL a na obr. 19 feriticko perlitická struktura oceli S235J2 s většími zrny. Minimální mez kluzu vysokopevné oceli S96QL je 960 MPa a velikost zrna se pohybuje v rozmezí od 5 do 20 μm [30]. Velikost zrn vysokopevné oceli ovlivňuje vanad, hliník aj., díky kterým dochází k blokování růstu zrn v přítomnosti karbidů [30]. Průměrná velikost zrn feriticko – perlitické struktury oceli S235J2 je přibližně 32 μm [31].



Obr. 18: Bainitická struktura oceli S960QL



Obr. 19: Feriticko perlitická struktura oceli S235J2[32]

3.2.2. Zpevnění tuhého roztoku atomy příměsí

Dojde-li v tuhém roztoku k rozpuštění atomů příměsí, které mají rozdílnou velikost než částice tuhého roztoku, vznikne okolo těchto atomů napětové pole bránící pohybu dislokací v krystalové mřížce při plastické deformaci. Hromadění dislokací má za následek zpevnění materiálu [25].

V případě substitučního zpevnění dojde k nahrazení atomu cizí částicí v jeho základní poloze a v případě intersticiálního zpevnění se cizí atomy menšího rozměru vměstnají mezi atomy mřížky. Příkladem substitučního zpevnění jsou cizí částice fosforu a manganu ve feritických ocelích, které přispívají k vyšší pevnosti. Příkladem intersticiálního zpevnění je uhlík, či dusík rozpuštěný v krystalové mřížce železa [29].

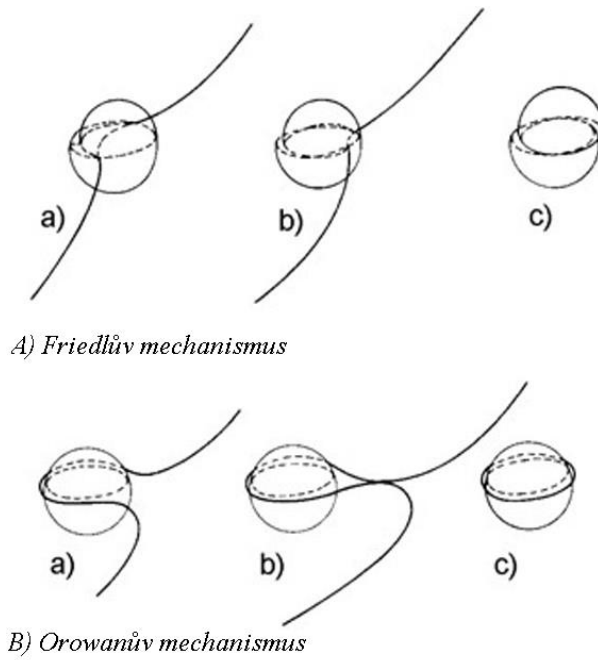
Ke zpevnění materiálu pomocí cizích částic přispívají významně rozdíly v rozměrech atomů příměsí, dále odlišné hodnoty modulů ve střihu příměsí a také elektronegativita.

Pro stanovení přírůstku zpevnění legujícími prvky se používají empiricky zjištěné vztahy, které jsou blíže popsány například v [29]. Ke zpevnění struktury přispívají zejména následující prvky: C, P, Si, Cu, Mn atd.

3.2.3. Zpevnění částicemi jiných fází

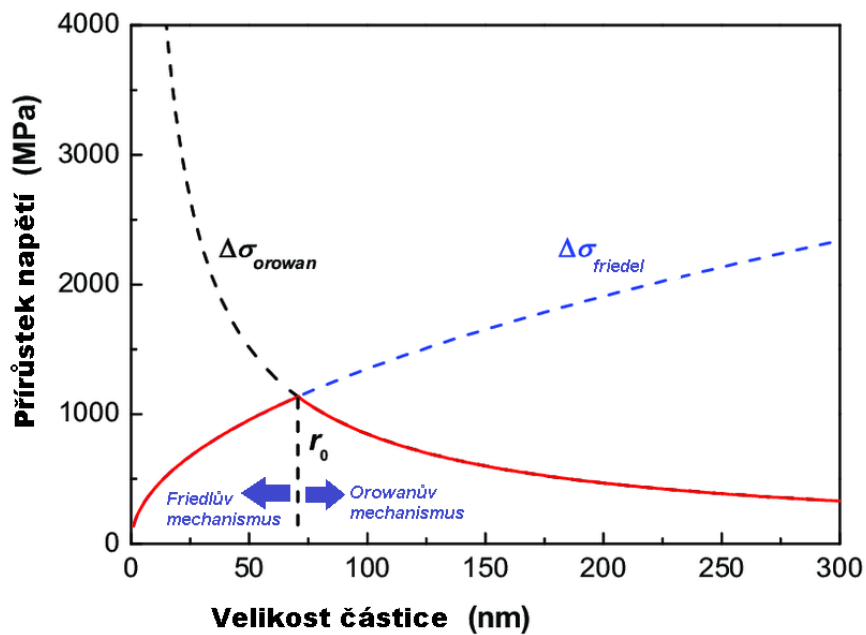
Ke zpevnění oceli částicemi jiných fází dochází, pokud jsou v matici přítomny fáze ve formě jemně rozptýlených disperzních částic. Ty se rozptýlí do struktury precipitací z přesyceného tuhého roztoku a brání pohybu dislokací, čímž je zvýšena pevnost [25], [29].

Byly popsány 2 mechanismy – viz kapitola 3.2.1. a 3.2.2., podle kterých dochází k interakci dislokace s pevnou částicí. Podle Friedlova mechanismu (obr. 20 A) se částice při průchodu dislokace deformuje a dle Orowanova mechanismu (obr. 20 B) dislokace obejdou částici a v konečné fázi zanechají kolem částice dislokační smyčku. Celý průběh interakce budou ovlivňovat moduly pružnosti ve střihu a elastické deformace způsobené nesouhlasem mřížek precipitátu a matrice [33].



Obr. 20: Interakce dislokace s pevnou částicí dle A) Friedlova mechanismu: a) protnutí měkké částice dislokací, b) průchod dislokace částicí, c) antifázové rozhraní; B) Orowanova mechanismu: a) ohýbání dislokace kolem tvrdé částice, b) obcházení částice dislokací, c) dislokační smyčka [34]

Zda bude uplatněn Friedlův, nebo Orowanův mechanismus interakce částice s dislokací, závisí na velikosti dané částice a její pevnosti ve střihu. Mezní hodnota poloměru částice r_0 (nm) rozděluje následující graf (obr. 21) na 2 křivky. U první části křivky, kde se velikost poloměru částice pohybuje v rozpětí od 0 do 72 nm, bude uplatněn Friedlův mechanismus. U druhé části křivky je uplatněn Orowanův mechanismus.



Obr. 21: Graf závislosti přírůstku napětí na velikosti částice jako kritérium uplatnění Friedlova, nebo Orowanova mechanismu [33]

Precipitáty mohou v ocelích působit jak pozitivně, tak negativně. Precipitace nitridů hliníku má vliv na stárnutí materiálu a může způsobit zkřehnutí oceli. Co se pozitivních vlivů týče, zvyšují v mikrolegovaných ocelích precipitáty V_3C_4 žárpevnost a nanometrické precipitáty NbC a VN pevnost. Zároveň představují precipitáty NbC a VN krystalizační zárodky, díky kterým se zvyšuje počet zrn ve struktuře na jednotku plochy [25], [26].

3.2.4. Dislokační (deformační) zpevnění

Pevnost oceli lze definovat jako míru odporu struktury proti pohybu dislokací daným napětím. Pevnost oceli bude tedy záviset na množství překážek bránící pohybům dislokací. Za překážky nacházející se ve struktuře můžeme považovat hranice zrn, precipitáty, cizí částice a taktéž nepohyblivé dislokace. Dislokační substruktura je tvořena hranicemi zrn, subzrn a dislokacemi uvnitř zrn. Velikost dislokačního zpevnění závisí na velikosti energie, která je potřebná k protlačení dislokace dislokačním síťovým, které je charakterizováno hustotou dislokací [29].

3.2.5. Zpevnění maticí

Dalším způsobem, kterým lze zvýšit pevnost a zároveň tvrdost a odolnost proti opotřebení oceli, je kalení. Tímto způsobem tepelného zpracování materiálu se zvýší tvrdost, sníží houževnatost a součástí se stává křehčí. Tyto vlastnosti nabízejí částečně nebo úplně nerovnovážné struktury. Princip spočívá v ohřevu materiálu na kalící teplotu, krátké výdrži na této teplotě a následném rychlém ochlazení, které má za následek přeměnu austenitu na martenzit nebo bainit. Kalící teplota se pohybuje v rozmezí 30 – 50°C nad teplotami A_{C1} a A_{C3} .

Ochlazování materiálu probíhá v kalícím prostředí (voda, olej, roztavené solné lázně a vzduch). Vhodné kalící prostředí se určuje dle kalitelnosti a prokalitelnosti materiálu. Čím méně je uhlíku v materiálu, tím větší by měla být ochlazovací rychlost. S rostoucím obsahem uhlíku se rychlost ochlazování zpomaluje. Nejnižší rychlost ochlazování se uplatňuje u vysoce legovaných ocelí, protože legury špatně vedou teplo a při vyšší rychlosti ochlazování by docházelo k praskání oceli.

Nejintenzivnější rychlost ochlazování nastává vodě, kde se dosahuje nadkritických rychlostí ochlazování, potřebných pro vznik martenzitu. Při intenzivním ochlazování však dochází k velkému pnutí v materiálu, což může mít za následek praskání kalené součásti.

Pomalejší rychlost ochlazování je v oleji. V porovnání s vodou je rychlost ochlazování asi 10 krát menší. Nejčastěji se používá minerální olej o teplotě 50 °C. Ještě nižší rychlosti ochlazování se dosahuje v roztavené solné lázně. Ty se vyznačují plynulým ochlazováním a také se dosahuje nejmenšího pnutí materiálu.

Kalení na vzduchu se využívá u samokalitelných ocelí, jako je například rychlořezná ocel. Vhodnost oceli ke kalení a také dosažitelná tvrdost je dána především obsahem uhlíku. Oceli s obsahem uhlíku pod 0,2 % jsou označovány jako nekalitelné a oceli s obsahem uhlíku větším než 0,35 % jako dobře kalitelné.

Prokalitelnost, neboli schopnost materiálu dosáhnout určité tvrdosti v určité hloubce, se zjišťuje Jominyho čelní zkouškou prokalitelnosti. Principem této zkoušky je ochlazování čela válcového zkušební vzorku proudem vody. Vzorek je třeba ohřát na kalící teplotu a následně ochladit. Rychlost ochlazování je největší na čele vzorku a s rostoucí vzdáleností klesá. Po vychladnutí se na vzorku vybrousí po celé délce ploška, na které se změří tvrdost dle Vickerse v různých vzdálenostech od čela. Naměřené hodnoty se posléze vynesou do grafu a vznikne křivka prokalitelnosti. Z důvodu určitých odchylek v chemickém složení daného materiálu se může obsah uhlíku pohybovat v rozmezí 0,1 %. Proto se blízká oblast kolem křivky prokalitelnosti nazývá pás prokalitelnosti. V tomto pásu poté musí ležet každá křivka prokalitelnosti dané oceli.

3.3 Vysokopevná ocel S960QL

Vysokopevná ocel S960QL se vyrábí řízeným válcováním, kalením a popouštěním (viz kapitola 3.4). Tato ocel se vyznačuje jemnozrnnou martenzitickou a bainitickou strukturou s velikostí zrn 5 – 25 μm . Pro srovnání jsou mechanické vlastnosti oceli S960QL uvedeny v tabulce 6 společně s hodnotami mechanických vlastností oceli S355J2, která je dnes považována za standardní materiál mezi konstrukčními ocelmi. V tabulce 7 je uvedeno chemické složení pro obě oceli.

Tabulka 6: Mechanické vlastnosti oceli S960QL a porovnání s ocelí S355J2 [30], [35]

	R_e MPa	R_m MPa	A₅ %	Z %	E MPa	Nárazová práce, J		
						0°C	- 20°C	-40°C
S960QL	Min 960	980 - 1150	Min 10	45,6	220 000	40	35	30
S355J2	Min 355	470 - 630	30,7	64,4	192 000	–	27	–

Tabulka 7: Chemické složení oceli S960QL a porovnání s ocelí S355J2 (hodnoty uvedeny v hmot. %) [30], [35]

	C	Si	Mn	B	Nb	Cr	V	Al
S960QL	0,22	0,86	1,8	0,006	0,07	1,6	0,14	0,11
S355J2	0,17	0,04	1,54	–	–	0,02	–	0,07
	Cu	Ti	Mo	Ni	N	P	S	–
S960QL	0,55	0,07	0,74	2,1	0,016	0,025	0,012	–
S355J2	0,08	–	–	0,04	–	–	–	–

S960QL je v současné době nejpevnější konstrukční materiál, který je zahrnutý v evropských normách (EN 10025-6 - viz tabulka 5). Při aplikacích v reálných konstrukcích představuje S960QL v porovnání s ocelí S355NL úsporu tloušťky plechu až o 60 %. Další úspora při svařování oceli S960QL se odráží ve výrobních nákladech, kdy dochází ke snížení nákladů na dělení materiálu a na svařování (v důsledku snížení tloušťky ZM se sníží i množství svarového kovu). Vysoké náklady jsou však generovány při samotném nákupu materiálu. Uvádí se, že ocelový plech jakosti S960QL může být až 4 krát dražší než plech jakosti S355J2.

V současné době jsou na některé výrobky kladeny značné nároky na nosnost, bezpečnost, ale také na omezení hmotnosti z hlediska manipulace, dopravy, legislativních

předpisů aj. Jedná se především o mobilní jeřáby, důlní zařízení, některé součásti zdvihacích zařízení, konstrukce ropných plošin [24].

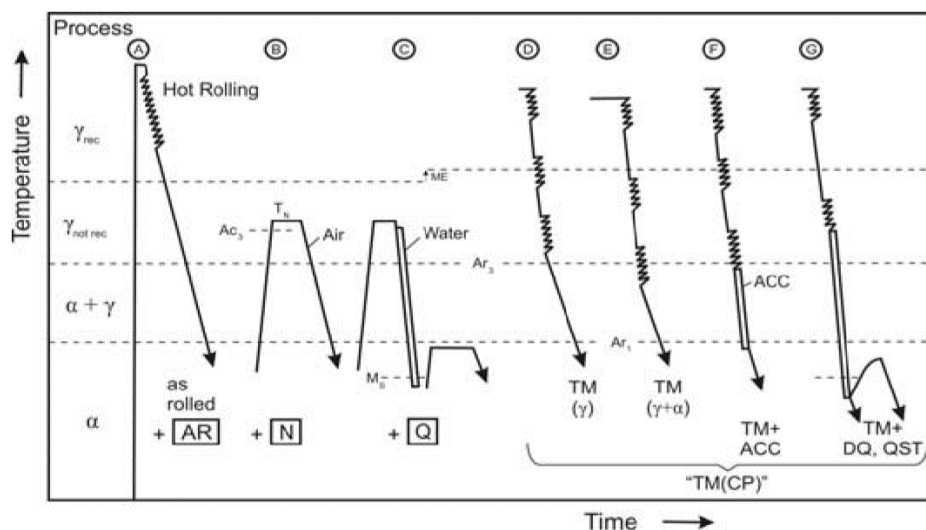
3.4 Výroba vysokopevných zušlechtěných ocelí

Výroba zušlechtěných vysokopevných konstrukčních ocelí spočívá v řízeném válcování, kalení a následném popouštění. Proces výroby je velmi podobný jako při výrobě otěruvzdorných ocelí HARDOX. Hlavní rozdíl nastává až v závěrečné fázi výroby při popouštění, kdy otěruvzdorné oceli se popouštějí při teplotách nižších (cca 200 °C) a vysokopevné oceli při teplotách značně vyšších (cca 600 °C) [24].

Konstrukční oceli s nižšími požadavky na pevnost a houževnatost (oceli až do S460N) se vyrábějí klasickým válcováním za tepla, které se provádí při teplotách nad 950 °C. Válcované plechy jsou zahřáty na teplotu asi 900 °C a následně pomalu ochlazovány na vzduchu, čímž se vytvoří feriticko – perlitická struktura [36].

Vysokopevné oceli se vyrábějí termomechanickým válcováním, jehož plán je individuálně navržen pro každou ocel v závislosti na jejím chemickém složení, požadované pevnosti, houževnatosti a tloušťce plechu. Zejména při výrobě silných plechů je pro dosažení vhodné mikrostruktury nutné zrychlené ochlazení po konečném válcování [36].

Výroba probíhá ve válcovnách s širokopásovými tratěmi, ve Steckelových válcovnách, nebo v kvarto – válcovnách plechů. Vzhledem k tomu, že se při válcování dosahuje relativně vysoké logaritmické deformace ($\epsilon \sim 4 - 5$), jsou nutným předpokladem pro zpracování plechu silná válcovací zařízení. Např. v německém Dillingenu disponuje válcovna dvěma válcovacími stolicemi se zatěžující silou až 108 MN a krutícím momentem 4,5 MNm. Rozměry většího stojanu umožňují válcování plechů až do šířky 5,2 m a velikost celého zařízení činí 4,5 m x 36 m. Během celého procesu je nutné kontrolovat parametry jako deformace při jednotlivých válcovacích průchodech, řízení teploty až do konečné teploty válcování, počáteční a konečná teplota chlazení, průtok vody atd. Schéma válcování a následného tepelného zpracování je znázorněno na obrázku 22, kde výroba zušlechtěných vysokopevných ocelí odpovídá procesům A+C [29], [36].



Obr. 22: Schématické znázornění procesů výroby v grafu teplota (temperature) – čas (time) [36]

Výroba normalizačně zpracovaných ocelí odpovídá procesům A + B, výroba temperovaných ocelí odpovídá procesům A + C a procesy D až G jsou uplatňovány při výrobě různých termomechanicky zpracovaných ocelí.

Plynule odlitá brama je rovnoměrně ohřívána v peci, poté jsou odstraněny okuje a brama je válcována v předválcovací stolici několika průchody. Následuje válcování vývalku s počáteční teplotou nižší, než je teplota ukončení rekrytalizace (obvykle 925 °C) několika průchody tam a zpět za použití pecních navíječek. Ocelový pás vystupuje ze stolice a je intenzivně zchlazen. Zrychlené chlazení je v závislosti na chemickém složení ukončeno v teplotním rozsahu 625 – 525 °C [29].

Následuje kalení a popouštění, jejichž cílem je vytvoření mikrostruktury sestávající především z popuštěného nízkouhlíkového martenzitu a dolního bainitu. Kalení vysokopevnostních ocelí se provádí po austenitizaci při teplotách 900 až 960 °C a aby nedošlo k vytváření měkké mikrostruktury (feritu), je nutné materiál rychle zchladit. Nejrychlejší ochlazení se dosáhne vystavením plechu proudu vody. Při této operaci se samotný povrch během několika sekund ochladí na teplotu pod 300 °C. Jádro plechu chladne podstatně pomaleji, přičemž rychlost chlazení s rostoucí tloušťkou desky klesá [36], [24].

Po kalení a následném zchlazení ve vodě je struktura značně křehká a pro dosažení dobrých vlastností je nutné martenzitickou strukturu popouštět. Během tohoto procesu je přesycení uhlíku v matici sníženo vylučováním karbidů, což vede k relaxaci materiálu. Dochází také ke snížení dislokační hustoty, která je spojená s tvorbou martenzitu. Oba tyto efekty výrazně zlepšují houževnatost materiálu [36].

4. Svařitelnost oceli S960QL

Svařitelnost je schopnost vytvořit kvalitní svarový spoj a jedná se o jednu z nejdůležitějších technologických vlastností materiálů. Obvykle je svařitelnost posuzována z hlediska metalurgického, tzn. závisí především na způsobu výroby, chemickém složení, aj. Svařitelnost posuzujeme také z hlediska technologického, tzn. závisí na možné technologii svařování a použitých parametrech. Svařitelnost posuzujeme i z hlediska konstrukčního, tzn. závisí na tvarovém a rozměrovém řešení spoje a jeho tuhosti. Celkové hodnocení svařitelnosti je pak komplexním posouzením výše uvedených hledisek. Z uvedených hledisek lze kovové materiály rozdělit na svařitelné, svařitelné za určitých podmínek a běžně nesvařitelné (dle ČSN 05 1309). Konkrétní svarový spoj je však třeba posuzovat ze všech hledisek, dnes se svařitelnost posuzuje podle kvalifikace svařovacího postupu např. podle EN ISO 15614.

4.1 Vliv chemického složení

Z hlediska chemického složení základního materiálu lze svařitelnost vyjádřit pomocí uhlíkového ekvivalentu, kdy nejčastěji se uvádí vzorec dle IIW.

$$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Cu+Ni}{15} \quad (IIW) \quad (4.1)$$

Poslední poznatky plynoucí z výzkumu však vedou k používání vhodnějšího modifikovaného vzorce pro výpočet uhlíkového ekvivalentu (4.2).

$$CET = C + \frac{Mn+Mo}{10} + \frac{Cr+Cu}{20} + \frac{Ni}{40} \quad [\%] \quad (4.2)$$

Tento vzorec lépe vystihuje vliv prvků, které mají vliv na vytváření trhlin za studena zapříčiněných vodíkem. Uhlíkový ekvivalent CET pro ocel S960QL je roven hodnotě 0,634 % a jelikož je hodnota vyšší než mezní hodnota 0,45 %, bude nutné při svařování použít zvláštní opatření, aby se zamezilo vzniku studených trhlin. K těmto opatřením patří zejména předehřev, řízený přívod tepla během svařování a následné tepelné zpracování svařovaného spoje.

Vliv uhlíkového ekvivalentu CET na teplotu předehřevu T_p lze vyjádřit přímkovou závislostí, kdy platí, že s rostoucím uhlíkovým ekvivalentem roste i teplota předehřevu. Zušlechtné oceli obsahují slitinové prvky jako Ni, Cr a Mo se významně podílí na zvyšování hodnoty uhlíkového ekvivalentu. Při uhlíkovém ekvivalentu 0,6 % bude teplota předehřevu vyšší než 250 °C ($d = 30$ mm; $Q = 1$ kJ/mm).

4.2 Teplota předehřevu a interpass

Vysokopevné oceli jsou během svařovacího procesu náchylné na vznik trhlin za studena způsobené přítomností vodíku, a proto je nutné základní materiál předehřívát, obzvláště plechy s velkými tloušťkami (v praxi aplikován pro S960QL předehřev na $t > 8$ mm). Výše teploty předehřevu je určována v závislosti na chemickém složení, svařované tloušťce a také tuhosti konstrukce. Předehřev při svařování snižuje rychlost ochlazování a je potřebný jak na začátku svařování, tak i potom v celém procesu s doplněním kontroly teploty interpass. Teplota interpass je teplota vícevrstvého svaru a přiléhajícího základního materiálu bezprostředně před aplikací další svarové housenky, která v procesu svařování nesmí být překročena a brání tak celkové kumulaci tepla a tím přehřátí materiálu. [37].

Obsah difúzního vodíku ve svarovém kovu HD (měřen v ml/100 g) je z hlediska stanovení teploty předehřevu velmi podstatným parametrem, jelikož má největší vliv na potenciální vznik trhlin za studena. Vodík se může do svarového kovu dostat i ze svařovacích elektrod, a proto je nutné obalené elektrody vždy před svařovacím procesem vysoušet. Aby se snížilo riziko trhlin vyvolaných vodíkem, musí se teplota předehřátí zvýšit s rostoucím obsahem vodíku. Pokud obsah vodíku převyšuje hodnotu 5 ml/100 g, je bezpodmínečně nutné předehřát materiál na teplotu 150 °C. Podle EN 1011 teplota předehřevu T_p (ve °C) za normálních podmínek závisí také na tepelném příkonu Q (v kJ/mm), uhlíkovém ekvivalentu CET (v %) a tloušťce základního materiálu d (v mm) [37]:

$$T_p = 697 \times CET + 160 \times \tanh\left(\frac{d}{35}\right) + 62 \times HD^{0.35} + (53 \times CET - 32) \times Q - 328 \quad (4.3)$$

Vzorec (4.3) je platný pro tloušťky materiálu d od 5 do 90 mm, pro obsah vodíku HD do 20 ml/100 g a pro tepelný příkon Q od 0,5 do 4 kJ/mm. Zároveň interpass teplota,

tedy mezihousenková teplota, nesmí překročit hodnotu 300 °C [37].

Výše teploty předehřevu stanovena v závislosti na tloušťce základního materiálu je patrná z tabulky 8. Do tloušťky 30 mm je možné ocel S960QL předehřívát na teplotu 100 °C, větší tloušťky je nutné předehřívát na teplotu 150 °C. Tabulka je platná pro jemnozrnné zušlechtěné oceli.

Tabulka 8: Teplota předehřevu stanovena pomocí tloušťky materiálu [38]

Ocel	Tloušťka [mm]							
	10	20	30	40	50	60	70	80
S235								
S380								
S460								
S500								
S550								
S690								
S960								
S960								

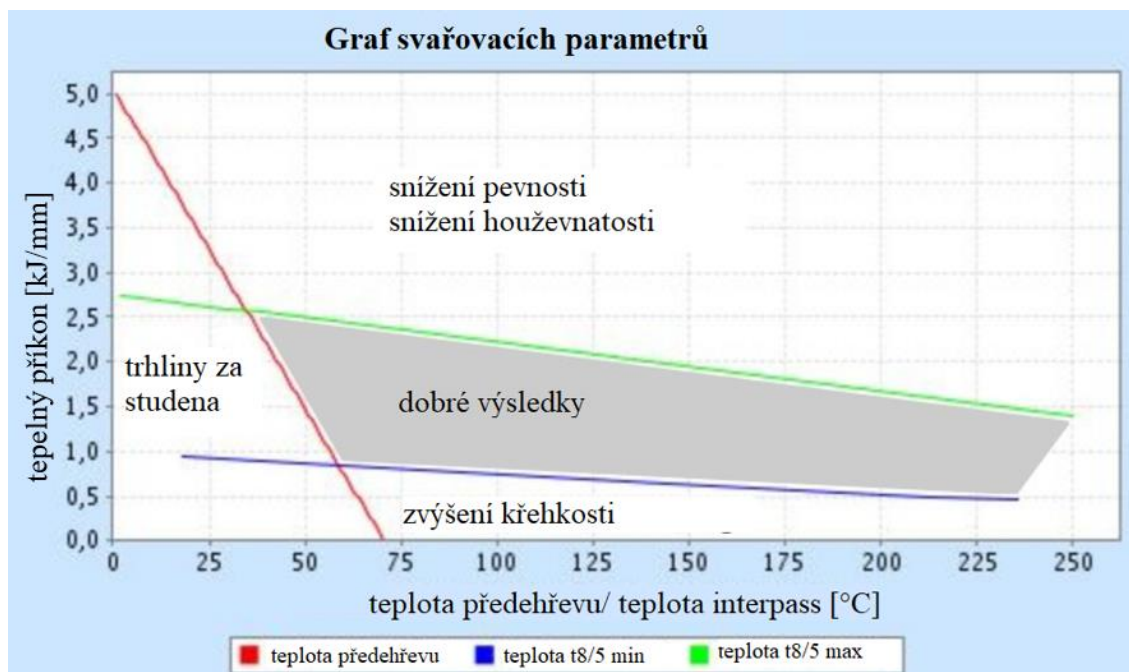
4.3 Rychlost ochlazování

Rychlost ochlazování lze hodnotit pomocí parametru $t_{8/5}$ [s], který představuje dobu ochlazování svarového spoje z teploty 800 °C na 500 °C a popisuje podmínky chlazení svarového kovu a přilehlé tepelně ovlivněné oblasti. Ochlazovací doba $t_{8/5}$ závisí na tepelném příkonu během svařování, teplotě interpass, tvarovém faktoru (geometrii) a tloušťce základního materiálu.

K dosažení vhodných mechanických vlastností ve svaru a v tepelně ovlivněné oblasti je nutné, aby se hodnota času $t_{8/5}$ pohybovala mezi horní a dolní hranicí předepsané výrobcem. Při překročení horní meze, tedy při dlouhém čase $t_{8/5}$, dochází ke zhoršení mechanických vlastností vlivem tepelného zatížení. Dochází ke snížení pevnosti a houževnatosti. U klasických konstrukčních ocelí lze konstatovat, že s rostoucí dobou ochlazování dochází k nepříznivému zvýšení přechodové teploty a snížení hodnoty energie rázem v ohybu, zároveň se snižuje tvrdost. Na druhé straně u jemnozrnných ocelí, které nejsou náchylné k růstu zrna a ke stárnutí, s rostoucí dobou ochlazování $t_{8/5}$ se pokles hodnot houževnatosti rázem v ohybu a pokles přechodové teploty výrazně neprojeví.

Naopak při krátkém ochlazovacím čase hrozí zkřehnutí struktury v tepelně ovlivněné oblasti, které může vést ke vzniku trhliny.

V praxi existují tři proměnné pro nastavení ochlazovací doby $t_{8/5}$. Jedná se o teplotu předehřevu a teplota interpass a vnesené teplo Q [$\text{kJ}\cdot\text{cm}^{-1}$] (tepelný příkon). Zvýšení teploty předehřevu a teploty interpass vede k pomalejšímu ochlazování a delší době chlazení $t_{8/5}$. Aby se dosáhlo uspokojivých vlastností svarového kovu, měla by se hodnota doby chlazení pohybovat mezi 5 až 15 s. To platí pouze pro vysokopevné oceli od S960QL. Platí, že čím vyšší je mez kluzu, tím užší bude interval ochlazovacího času $t_{8/5}$. Na obrázku 23 je znázorněn graf parametrů svařování pro vysokopevnou ocel S690QL. Obdobné grafy lze vytvořit pro určitý materiál pomocí speciálních SW výrobců základního materiálu (např. WeldCalc od společnosti SSAB).



Obr. 23: Graf parametrů svařování pro ocel S690QL, $d = 20 \text{ mm}$, $CET = 0,34$, $HD = 2 \text{ ml}/100\text{g}$ [36]

Doba ochlazování $t_{8/5}$ má taktéž značný vliv na tvrdost, vrubovou houževnatost a přechodovou teplotu. Platí, že se zvyšující se ochlazovací dobou hodnoty tvrdosti klesají, tudíž by neměla být překročena dolní hranice ochlazovací doby. Stejně tomu je s hodnotami vrubové houževnatosti, které se s nadměrně rostoucí dobou $t_{8/5}$ snižují, současně ale dochází k růstu teploty přechodu mezi houževnatým a křehkým lomem. Tento proces je zapříčiněn difúzními ději, které probíhají za vyšších hodnot předehřevu v podchlazeném austenitu.

4.3.1 Stanovení ochlazovací doby

Ochlazovací dobu lze měřit pomocí termočlánků, které jsou umístěny v TOO, nebo jsou vkládány do svarového kovu. Ochlazovací dobu lze stanovit pomocí výpočtu pro trojrozměrné šíření tepla (obr.24a), který se aplikuje při velkých tloušťkách základního materiálu, nebo pro dvojrozměrné šíření tepla aplikovaný pro menší tloušťky (obr. 24b).

U dvojrozměrného obvodu tepla dochází k šíření tepla ve 2 směrech a je zde podstatná tloušťka plechu. Ochlazovací dobu lze spočítat ze vzorce:

$$t_{8/5} = (4300 - 4,3T_0) \cdot 10^5 \frac{Q^2}{d^2} \cdot \left[\left(\frac{1}{500-T_0} \right)^2 - \left(\frac{1}{800-T_0} \right)^2 \right] \cdot F2, \quad (4.4)$$

ve kterém $F2$ je faktor svarového spoje:

návar	$F2 = 1$
tupý svar	$F2 = 0,9$
koutový svar	$F2 = 0,67 - 0,9$

Q je tepelný příkon v kJ/mm,

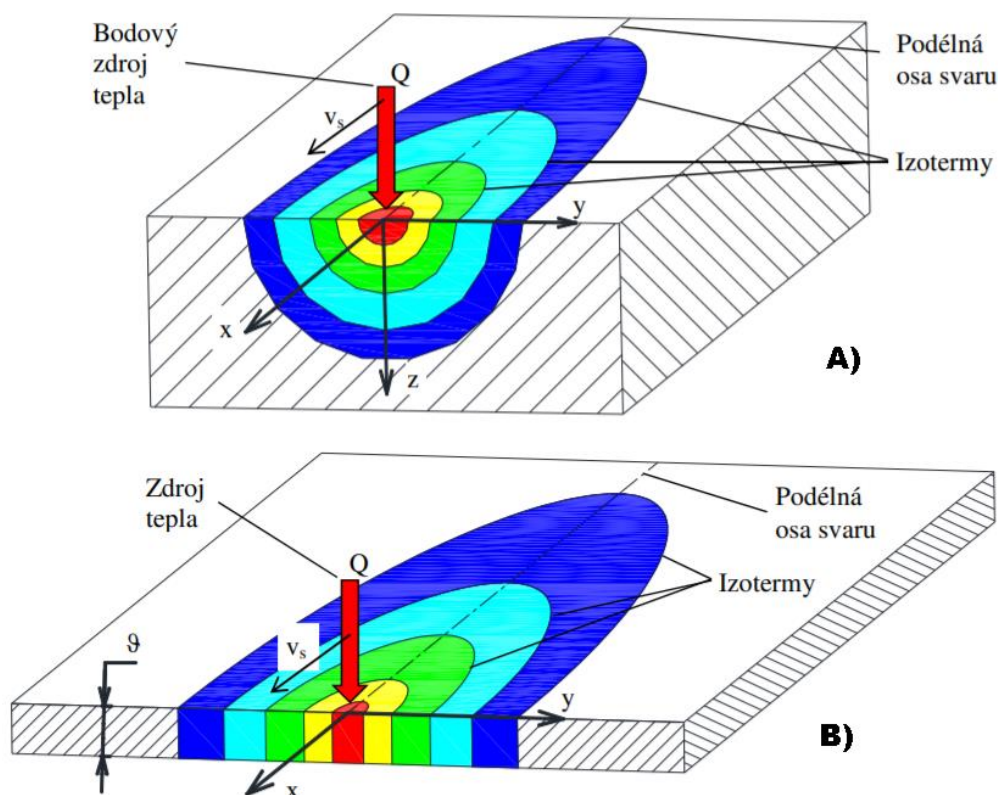
d je tloušťka materiálu v mm,

T_0 je počáteční teplota svařovaného materiálu ve °C.

Dobu ochlazování u trojrozměrného tepelného toku lze vyjádřit pomocí tohoto vztahu.

$$t_{8/5} = (6700 - 5 \cdot T_0) \cdot Q \cdot \left(\frac{1}{500 - T_0} - \frac{1}{800 - T_0} \right) \cdot F3,$$

kde $F3$ je faktor svarového spoje pro trojrozměrný tepelný tok. (4.5)



Obr. 24: Kvazistacionární teplotní pole: a) trojrozměrné, b) dvourozměrné [37]

4.4 Přídavný materiál

Volba přídavného materiálu vychází z požadavků, které jsou kladeny na mechanické vlastnosti svaru. Při svařování ocelí StrenX, XABO, nebo WELDOX je nutné používat přídavný materiál s obsahem vodíku $< 5 \text{ ml}/100\text{g}$ svarového kovu. Používají se k tomu svařovací dráty s nižší mezí kluzu, než je mez kluzu základního materiálu. Pro dosažení výrazně nižší meze kluzu svarového kovu se používají přídavné materiály G69, pro dosažení nižší meze kluzu pak G89. Dále je možné kombinovat přídavné materiály G69 a G89.

Při svařování vysokopevných ocelí StrenX s mezí kluzu od 690 MPa do 1100 MPa se doporučuje kombinovat elektrody s odlišnou pevností, například měkké elektrody pro kořenovou část svaru a elektrody s vyšší pevností pro zbývající část svaru.

Příkladem běžně užívaných přídavných materiálů, které se používají při svařování oceli S960QL, jsou plné dráty firmy Böhler nesoucí značení Union X90 (G 89 6 M Mn4Ni2CrMo), Union X96 (G89 5 M Mn4Ni2,5CrMo), nebo dráty firmy FLIESS se značením G 79 4 M Mn4Ni2CrMo (norma EN ISO 16834-A). Jedná se o poměděné dráty určené ke svařování zušlechťených a termomechanicky zpevněných ocelí. Tyto přídavné materiály se vyznačují vysokými mechanickými vlastnostmi, dobrou odolností proti

vzniku trhlin, vysokou houževnatostí a vysokou metalurgickou čistotou. Mechanické vlastnosti a chemické složení těchto přídavných materiálů jsou uvedeny v tabulce 9.

Tabulka 9: Mechanické vlastnosti a chemické složení přídavných materiálů

Union X 90 G 89 6 M Mn4Ni2CrMo ER120S-G	Rm 950 N/mm ² Re 890 N/mm ² A5 15 % Kv 90 J Kv 47 J /-60°C	C 0,1 Si 0,8 Mn 1,8 Cr 0,35 Mo 0,6 Ni 2,3
Union X 96 G 89 5 M Mn4Ni2,5CrMo ER120S-G	Rm 980 N/mm ² Re 930 N/mm ² A5 14 % Kv 80 J Kv 47 J /-50°C	C 0,12 Si 0,8 Mn 1,9 Cr 0,45 Mo 0,55 Ni 2,35

Dalším příkladem přídavných materiálů, které se v praxi výjimečně používají ke svařování kořenových vrstev svarů z oceli S960QL, jsou dráty G4Si1 (SG3) odpovídající normě AWS A5.18: ER 70S-6 podle Americké svářečské společnosti. Lze taktéž použít přídavný materiál, který odpovídá americké normě AWS A5.28: ER 120 OS-X.

5. Deformace a napětí při svařování

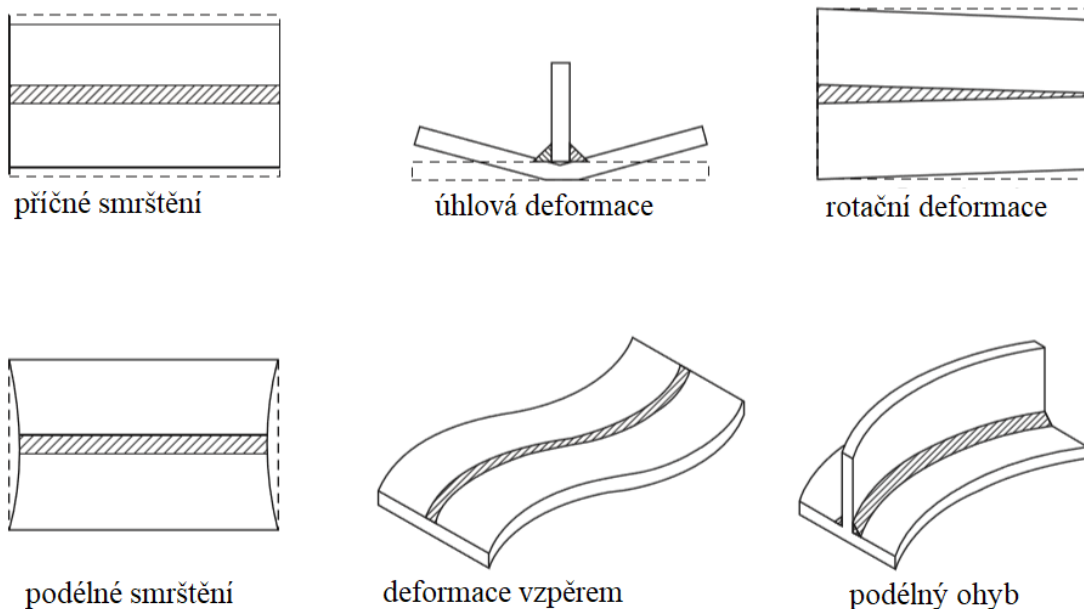
Následkem přívodu tepla do místa svarového spoje a jeho odvodem do základního materiálu vznikají při svařování napětí a deformace. K jejich vzniku dochází v průběhu ohřevu a ochlazování svařovaného materiálu v důsledku metalurgických pochodů a dilatačních změn. Deformace a napětí vznikají při každém procesu svařování a není možno jim zabránit. Lze pouze snížit jejich velikost a poměr, nebo je přenést do málo exponovaných míst vhodnou volbou technologie svařování a vhodným konstrukčním řešením.

Mezi deformacemi a napětím existuje úzký vztah, kdy zamezení deformací vede obvykle k nárůstu vlastního napětí ve svařenci. Napětí, která vznikají v průběhu procesu svařování, nazýváme jako vnitřní. Jedná se o napětí, která jsou uvnitř tělesa, aniž by na těleso působily vnější síly. Vnitřní napětí vznikají i při jiných technologických operacích, jako je tepelné zpracování, tváření, nebo slévání. Např. při kalení dochází ke zvyšování velikosti zbytkového napětí a naopak při žihání ke snížení napětí dochází k jeho zmenšování [38]. Vnitřní napětí představují v tělese rovnovážný stav, jelikož statické účinky sil a jejich momentů se v libovolném průřezu navzájem ruší. Z hlediska fyzikálně – metalurgického budou pro vznik a velikost vnitřních napětí a deformací rozhodující:

- I. Teplotní gradienty a tvar nestacionárních teplotních polí v ZM.
- II. Množství tepla, které je vneseno do svaru.
- III. Tepelně – fyzikální vlastnosti ZM a rozdílnost vlastností přídavného materiálu.
- IV. Mechanické vlastnosti jako mez kluzu v tahu i tlaku a jejich teplotní závislost.
- V. Strukturální změny projevující se změnou objemu při fázové přeměně.
- VI. Konstrukční řešení, vlastní tuhost konstrukce a tuhost upnutí při svařování [39].

Napětí tepelného původu můžeme podle mechanismu vzniku rozdělit do tří skupin: napětí způsobené změnou objemu, napětí způsobené rozdílnou tepelnou roztažností a napětí způsobené vznikem teplotního gradientu v materiálu [38], [40].

Příkladem napětí způsobené změnou objemu je ohřev materiálu. Během procesu svařování roste teplota, objem materiálu a tím i napětí v oblasti svarového spoje až na mez kluzu a vzniká tak zplastizovaná zóna. V té se zahřátý materiál napěchovává (plasticky deformuje) na vzdálenější materiál o nižší teplotě. Nulová pevnost je přítomna v tekuté svarové lázni tvořené přídavným materiálem a jeho směsí se základním materiálem, protaveným do určité hloubky. Při postupném ochlazení zplastizované, napěchované oblasti nejdříve stahují oblasti teplejšího svarového kovu. Postupným chladnutím roste mez kluzu svarového spoje a taktéž dochází ke smršťování svarového kovu a přilehlého napěchovaného materiálu, což způsobí vznik vnitřního napětí. Takovéto napětí se v závislosti na tuhosti spoje částečně přenáší do celého svaru a uvolňuje se ve formě vnější deformace, kterou můžeme buď vhodným postupem omezit, nebo ji později pracně odstranit [38]. Názorné ukázky typů deformací svarového spoje jsou patrné z obrázku 25.



Obr. 25: Ukázky deformací svarových spojů [41]

Pokud vznikne teplotní gradient podél některého rozměru svařence lokálním ohřevem (resp. ochlazením), dojde k různé rychlosti rozpínání (resp. smršťování) uvnitř materiálu. Následkem je zvýšení napětí [40].

Zbytkové vnitřní napětí se může plastickou deformací uvolňovat v průběhu provozu, ale může také vést k tvorbě trhlin a lomů v důsledku překročení meze pevnosti. Příčinou porušení může být např. nízká zásoba plasticity materiálu, nízké provozní teploty, nebo přítomnost víceosé napjatosti na okrajích vrubů [41].

5.1 Teplotní pole

Při tlakovém i tavném svařování vznikají ve svaru vnitřní napětí. Při tavném svařování dochází v důsledku koncentrovaného přívodu tepla do svarového spoje ke vzniku nestacionárních teplotních polí, která jsou charakteristická svou časovou proměnou. Dle počtu směrů šíření tepla mohou být vznikající teplotní pole dvourozměrná, či trojrozměrná. Při svařování tenkých desek lze uvažovat dvourozměrné teplotní pole, zatímco při tavném svařování součástí velkých průřezů je třeba uvažovat trojrozměrné teplotní pole.

Bližší popis tvaru, velikosti a časových změn teplotního pole je prováděn pomocí matematické analýzy. Vzhledem k nemalému množství vstupních parametrů (způsob vedení tepla, tvar a strmost teplotního gradientu tepelného zdroje atd.) jsou však takové výpočty velmi problematické, a proto se používají jejich zjednodušené verze. Příkladem je Fourierova diferenciální rovnice, která zohledňuje vedení tepla jako jediný způsob sdílení tepla. Dle této rovnice bude tvar teplotních polí záviset na tepelné vodivosti λ , měrné tepelné kapacitě c a na hustotě ρ použitého materiálu. Všechny tyto veličiny je možné souhrnně vyjádřit pomocí součinitele teplotní vodivosti a .

Dalším důležitým parametrem nutným ke stanovení teplotního pole je tvar a velikost zdroje tepla. Pomocí definování zdroje tepla a Fourierovy diferenciální rovnice lze stanovit časovou proměnu teplotního pole v definovaném místě vzorku, jedná se o teplotní cyklus. Strmost křivky a hodnota jejího maxima závisí na použitém zdroji tepla a také vzdálenosti od zdroje tepla [38], [40], [42].

Ke stanovení teplotního pole se v současnosti využívají numerické simulační softwary, které již dokáží uvažovat většinu jevů nastávajících v TOO svarů. Díky těmto předpokladům lze s vysokou přesností určovat hodnoty vnitřních napětí i velikost vznikající deformace [42].

5.2 Klasifikace napětí ve svaru

Dle charakteru účinku ve svařované konstrukci lze napětí rozdělit na:

- I. aktivní, která vznikají ve svaru a jeho okolí,
- II. reaktivní, která vznikají jako reakce na napětí aktivní v důsledku tuhosti svařence.

Je-li odstraněno napětí aktivní, zmizí i napětí reaktivní. Vnitřní napětí lze dále rozdělit dle charakteru vzniku na:

- I. teplotní, která vznikají nerovnoměrným ohřevem, či ochlazením svařovaného materiálu,
- II. strukturní, která vznikají v důsledku časového posunu fázových přeměn slitiny v různých částech ZM, nebo v důsledku vzniku různých struktur v částech ZM.

Dle času existence lze napětí rozdělit na:

- I. přechodná, která ve svařovaném materiálu působí pouze po určitou dobu, po kterou trvá příčina jejich vzniku (upnutí, zatížení aj.),

- II. zbytková, která ve svařovaném materiálu zůstávají i po skončení svařovacího procesu a ochlazení svařence. Vznikají nerovnoměrným ohřevem, či ochlazováním, nebo v důsledku strukturních změn (např. při vzniku nerovnovážných struktur).

Dle velikosti oblasti působení lze napětí rozdělit na:

- I. makroskopická (I. druhu), která působí v makroobjemech svařence,
- II. mikroskopická (II. druhu), která vznikají a vyrovnávají se v mikroobjemech svařence,
- III. ultramikroskopická (III. druhu), která působí v rozmezí jedné nebo několika elementárních buněk krystalické mřížky. Nemají proto význam z hlediska vnějších deformací.

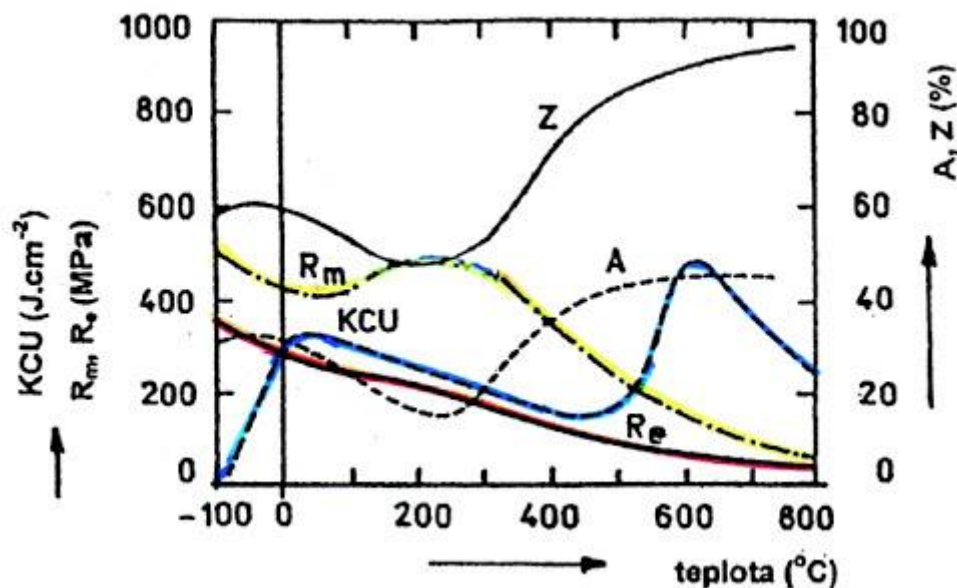
K těmto napětím lze ještě přiřadit i napětí v celé konstrukci způsobené změnou rozměrů jednoho, nebo několika elementů konstrukce.

Z hlediska stavu napjatosti působí v každém místě vzorku normálová i smyková napětí, která jsou vyjádřena pomocí tenzoru napětí. Výslednice složek napětí je vyjádřena vektorem, tedy velikostí a směrem. Dle směru působení vzhledem k ose svaru jsou napětí dále rozdělena na:

- I. Napětí podélná, působící ve směru osy svaru, tedy ve směru svařování.
- II. Napětí příčná, působící ve směru kolmém na osu svaru a na směr svařování.
- III. Napětí ve směru tloušťky, projevující se zejména při svařování tlustostěnných součástí [38].

5.3 Vznik vnitřních napětí a deformací

Vznik a rozložení napětí ve vzorku je způsobeno především nerovnoměrností a časovou proměnlivostí teplotních polí vznikajících během svařování. V závislosti na teplotě se během svařování mění tepelně – fyzikální a mechanické vlastnosti svařovaných materiálů, což vede ke vzniku napětí a deformací. S teplotou se mění teplotní roztažnost, tepelná vodivost, měrné teplo, mez pevnosti, mez kluzu, houževnatost, tažnost aj. Ukázka teplotní závislosti základních mechanických vlastností nelegované oceli je patrná z obrázku 26.



Obr. 26: Teplotní závislost mechanických vlastností nízkouhlíkové nelegované oceli (R_m je mez pevnosti v tahu [MPa], R_e je mez kluzu [MPa], KCU je vrubová houževnatost [J], Z je kontrakce, A je tažnost materiálu) [39]

Rozdílné rozložení teplot ve vzorku má za následek, že v místech s vyšší teplotou se materiál rychleji a intenzivněji rozpíná, díky čemuž dochází ke vzniku vnitřních napětí. Velikost těchto napětí se zvyšuje, čím větší je teplotní rozdíl mezi porovnávanými místy, a to až do meze kluzu. Překročení této hodnoty napětí má za následek vznik plastických deformací [42], [43].

Pro analýzu vzniku deformací má velký význam také průběh teplotní závislosti meze kluzu, která je patrná z obr. 26. Po překročení teploty 600 °C dochází k prudkému poklesu meze kluzu, což má za následek, že se ocel vlivem působení sil snadno plasticky deformuje. Na velikost napětí a deformací má velký vliv také teplotní roztažnost. Velikost prodloužení, či smrštění tělesa Δl vlivem teploty lze vyjádřit vztahem

$$\Delta l = l_0 \alpha \Delta T \text{ [m]}, \quad (5.1)$$

kde l_0 je původní délka [m],

α je součinitel lineární teplotní roztažnosti [K^{-1}]

ΔT je rozdíl konečné a původní teploty [K].

Pokud budou v důsledku pevného upnutí znemožněny volné dilatace tělesa, vznikne napětí σ , které lze vyjádřit z Hookova zákona

$$\sigma = -\alpha \Delta T E \text{ [MPa]}, \quad (5.2)$$

kde E je modul pružnosti v tahu [MPa].

Záporné znaménko v této rovnici zohledňuje skutečnost, že při kladné změně teploty dojde ve vzorku ke vzniku tlakových napětí.

Při rovnoměrném ohřevu volné tyče dojde k dilatacím, které lze určit ze vztahu (5.1) a v tyči nebude vznikat žádné napětí, ani plastická deformace. Při rovnoměrném ochlazování taktéž nevznikne žádné napětí a po ochlazení bude mít tyč původní rozměr l_0 .

Pokud by byla tyč vložena mezi dvě pevné stěny, dojde při rovnoměrném ohřevu k potlačení prodloužení tyče. Uvnitř materiálu dojde ke vzniku vnitřních tlakových napětí a deformacím, které odpovídají dilataci volné tyče ohřáté na stejnou teplotu dle vztahu (5.2). Pokud se deformace tyče bude pohybovat v oblasti pružných deformací, bude délka tyče po ochlazení opět l_0 a v tyči nezůstane žádné zbytkové napětí. Pokud při ohřevu tyče dojde k plastickým deformacím, bude po vychladnutí tyč kratší o hodnotu plastické deformace a v tyči nezůstane žádné vnitřní napětí. Již při ohřevu tyče z uhlíkové oceli o 100 °C bude překročeno napětí odpovídající mezi kluzu.

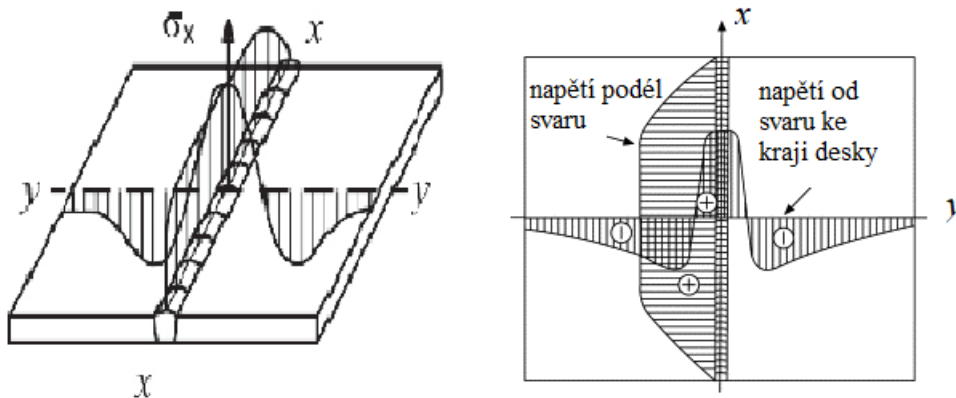
Odlišná situace ale nastane, jeli ohřívána tyč pevně upnutá. Pokud vzniknou v materiálu plastické deformace, bude se tyč snažit zkrátit o hodnotu plastické deformace, čemuž bude bránit pevné upnutí. V materiálu začnou vznikat tahová vnitřní napětí, která mohou překročit hodnotu meze kluzu. V takovém případě ve vychladlé tyči zůstanou zbytková vnitřní tahová napětí [29], [42], [43].

Z uvedeného vyplývá, že zbytková teplotní napětí a deformace vzniknou tehdy, překročí-li napětí během ohřevu mez kluzu a dojde k plastické deformaci. Zůstane-li plasticky deformovaný materiál pevně upnutý i v průběhu ochlazování, vzniknou v materiálu zbytková vnitřní tahová napětí. Pokud je svařovaný materiál dostatečně plastický, nepřekročí zbytková napětí hodnotu meze pevnosti. Velikost zbytkových napětí závisí především na rychlosti a maximální teplotě ohřevu a tuhosti upnutí. Napětí působící ve vzorku může být vyjádřeno pomocí tenzoru napětí v jednom konkrétním bodě vzorku, nebo v jednotlivých rovinách pomocí podélných a příčných napětí.

5.4 Průběh napětí tupých svarů

Pokud jsou svařovány dvě desky podélným tupým svarem bez upnutí, bude svar a jeho okolí namáháno v podélném směru silou od smršťování svaru. V příčné směru vzniká napětí, které je vyvolané nerovnoměrným jednostranným ohřevem desek. Při svařování větších tloušťek je nutné zohlednit i napětí vznikající ve směru tloušťky.

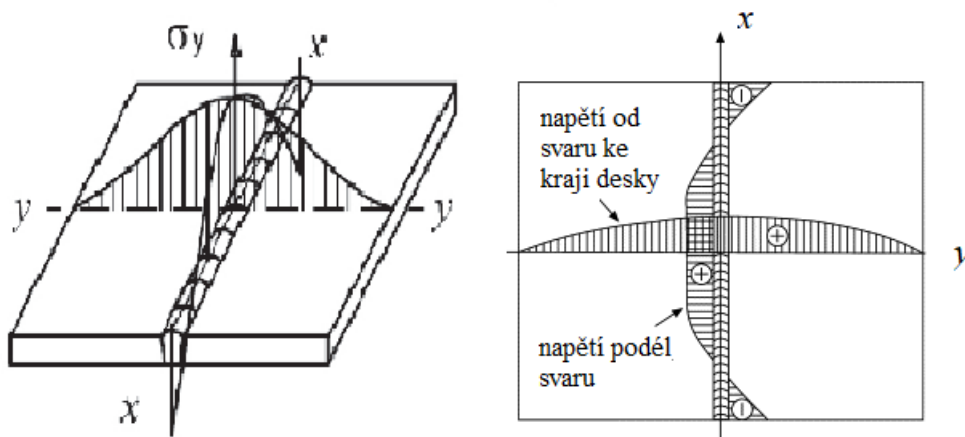
Průběh podélných zbytkových napětí na úrovni povrchu plechu je patrný z obr. 27. V oblasti svaru a jeho přilehlé oblasti působí v příčné směru napětí tahové a ve větších vzdálenostech od svaru se napětí mění z tahového na tlakové [39]. V oblasti svarového spoje vždy převládá tahové napětí a šířka této oblasti závisí na šířce svařovaných desek. Čím širší budou desky, tím vyšší budou výsledná zbytková napětí. Podélná napětí mají nejvyšší hodnotu a svým působením připomínají vzpěr prutu [38]. Při působení v neutrální ose průřezu způsobí zanedbatelné zkrácení svařence, ale pokud napětí působí mimo neutrální osu, vzniklé ohybové momenty od smršťujících sil způsobí výraznou celkovou deformaci [38].



Obr. 27: Průběh podélného napětí v tupém svaru

Na průběh podélného napětí bude mít kromě šířky desek vliv i svařovací režim. Větší deformace se projeví při svařování velkým tepelným příkonem (např. i při nízké svařovací rychlosti). Podélné napětí se mění i ve směru tloušťky desky, kdy maximální hodnota je dosažena na povrchu desky a směrem do středu se hodnota snižuje.

Průběh příčných zbytkových napětí na povrchu plechu a v ose svaru je znázorněn na obrázku 28. V poloze vodorovné je znázorněn průběh změn příčného napětí směrem k okrajům plechu. V poloze svislé je znázorněn průběh příčných napětí v ose svaru. Příčné napětí dosahuje nižších hodnot, nicméně vzhledem k menší tuhosti průřezu v tomto směru může způsobit též výrazné a těžko napravitelné místní deformace.



Obr. 28: Průběh příčných napětí v tupém svaru

Při konstantním svařovacím režimu závisí průběh příčných napětí zejména na počtu a způsobu kladení svařových housenek.

5.5 Deformace způsobené svařováním

Jelikož každá akce vyvolá odpovídající reakci, rovněž každé napětí vznikající při svařování vyvolá deformace svařovaných dílů. Deformace jsou nepříznivé hlavně z hlediska funkčnosti, ale také estetiky. Posouzení překročení mezních kritérií deformací řeší norma EN ISO 5817, která se obecně zabývá přípustností vad svařových spojů. Mezi vady

definované normou EN ISO 6520-1 patří i vady skupiny 5 (vady tvaru a rozměru), kam spadají i deformace svarového spoje.

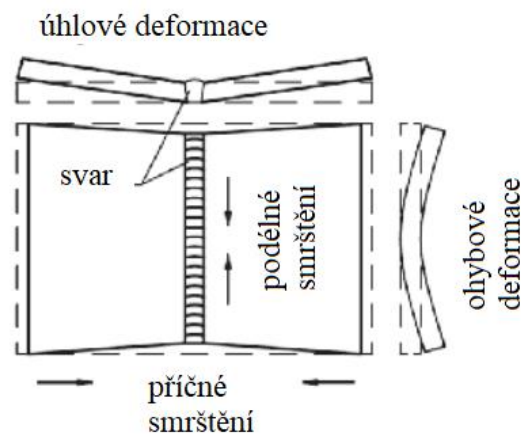
Výsledné svarové spoje je možné rovnat, nicméně se jedná o velmi pracnou činnost, při které se do materiálu vnáší další napětí mající vliv na únavovou životnost. Deformace vyvolané svařováním je možné rozdělit na:

- I. Vnější, projevující se změnou geometrického tvaru, nebo rozměrů svařované součásti.
- II. Vnitřní, uplatňující se v jednotlivých vláknech, nebo objemech průřezu. Tyto mají vliv zejména na vznik trhlin a životnost součástí.

Z hlediska oblasti, ve které se jednotlivé deformace projevují, se vnější deformace dále rozdělují na:

- i. Elementární, představující deformace svarového spoje, které jsou způsobeny smršťováním svaru. Tyto deformace jsou závislé na množství vneseného tepla, délce svaru a metodě svařování. Jedná se o podélné a příčné smrštění a úhlové deformace (viz obr. 29).
- ii. Lokální, které způsobují změny tvaru jen v části svařence a na celkovou deformaci většinou nemají vliv.
- iii. Celkové, které se projevují změnou rozměrů a geometrie celého svařence. Tyto deformace lze ovlivnit úpravou vlastního technologického postupu.

Obdobně jako napětí lze deformace rozdělit podle doby trvání na deformace přechodné, které se projevují pouze po dobu existence příčiny jejich vzniku, a trvalé, které jsou dále přeneseny i do provozní fáze.



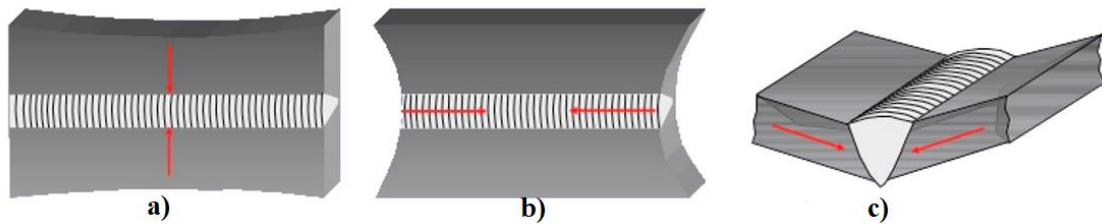
Obr. 29: Elementární deformace způsobené svařováním

Deformace svarového spoje vzniká smršťováním svaru ve všech třech směrech. Výsledná deformace sestává ze tří druhů smrštění (podélné smrštění, příčné smrštění, ve směru tloušťky). Přestože se všechna tato smrštění vyskytují současně, jejich velikost a účinek jsou odlišné. Na velikost smrštění mají vliv způsob upnutí, metoda a postup svařování a poloha při svařování [40].

5.5.1 Příčné smrštění

Příčná smrštění jsou taková smrštění, ke kterým dochází v kolmém směru na osu svaru. Jejich velikost závisí především na tvaru svaru, způsobu stehování, tloušťce svařovaného materiálu, tuhosti a způsobu upnutí a množství vneseného tepla [38].

Při svařování dané tloušťky materiálu je obvykle z hlediska příčného smrštění vhodnější použít např. svar X, který je symetrický, než svar V. Výplňová plocha V svaru je větší, a tudíž je vyšší i hodnota vneseného tepla a množství svařového kovu.



Obr. 30: Deformace po svařování: a) příčné smrštění; b) podélné smrštění; c) úhlové deformace

Hodnotu příčných smrštění lze vyjádřit pomocí vztahu dle Okerbloma (5.3) [44], který platí pro svařování širokých tuhých desek. Dle tohoto vztahu se určuje velikost příčného smrštění z_p pomocí množství vneseného tepla Q [J cm^{-1}] a tloušťky plechu s [mm].

$$z_p = 3,5 \cdot 10^{-6} \frac{Q}{s} \text{ [mm]} \quad (5.3)$$

Konstanta ve vztahu se mění v závislosti na tuhosti základního materiálu. Čím vyšší je tuhost ZM, tím nižší bude konstanta a hodnota příčného smrštění.

5.5.2 Podélné smrštění

Změna rozměru ve směru podélné osy svaru závisí především na tuhosti základního materiálu, metodě svařování a způsobu vyplnění úkosu. Při svařování většinou výrazným podélným deformacím zabrání vlastní tuhost svařence, a proto v tomto směru obvykle zůstávají zbytková tahová napětí. Čím větší je tuhost svařence, tím větší zbytková napětí vznikají. Podélné smrštění je patrné z obrázku 25 a 30.

5.5.3 Úhlová deformace

Úhlové deformace vznikají v důsledku nerovnoměrného smršťování materiálu ve směru jeho tloušťky a projevují se především u svarů s nesymetrickým úkosem a u vícevrstvých svarů. Jsou způsobeny příčným smrštěním a jsou vyjadřovány pomocí úhlu pootočení základního materiálu kolem podélné osy.

Úhlové smrštění se téměř neprojevuje u tupých I svarů zhotovených na jednu vrstvu a u svarů se symetrickými úkosy svařovanými z obou stran současně (K, X). Zamezit vzniku úhlových deformací lze vhodným postupem vyplňování úkosů z obou stran a vhodnou volbou svařovacích parametrů. Co se tloušťky základního materiálu týče, jsou úhlové deformace tím intenzivnější, čím větší je tloušťka ZM. Deformace jsou také výraznější s rostoucím počtem svařových housenek.

5.6 Vliv zbytkových napětí na svarové spoje

Z hlediska únavových vlastností a životnosti svařované součásti jsou místa s lokálními napěťovými špičkami ve svařenci velmi nebezpečná. Jedná se především o podélná zbytková napětí, která se nacházejí v blízkosti svarového spoje. Napětí mohou dosahovat hodnot vyšších, než je mez kluzu, a způsobit plastické deformace, které tak snižují zásobu plasticity materiálu v daném místě. To je problematické zejména, pokud svařujeme materiál s nízkou tažností a vysokými pevnostními charakteristikami, jelikož zásoba plasticity je u takového materiálu nízká. Pokud je plasticita vyčerpána a napětí překročí mez pevnosti, dochází k porušení materiálu.

Jelikož průběh napětí ve svařenci nelze určit pomocí zvolených technologických parametrů, provádějí se testy provozní životnosti dané součásti. Ty určí, zda daná součást vyhovuje z hlediska stanovené životnosti požadovaným zatížením. Pokud součást nevyhovuje dané životnosti a dojde k jejímu porušení dřív, zavádějí se nová opatření, která zahrnují změnu technologického postupu, změnu materiálu, nebo úpravu konstrukčního řešení. Při změně technologického postupu je vyžadována znalost problematiky rozložení napětí ve svařenci, aby bylo možné průběh napětí ovlivnit, snížit, a nebo přesunout do méně exponovaných míst.

Dle charakteru vnitřních napětí (tlak, tah) a zatěžujícího napětí může dojít ke snížení, nebo zvýšení meze únavy. Pokud mají vnitřní i zatěžující napětí stejný charakter (tah a tah, nebo tlak a tlak), dojde ke snížení meze únavy. Pokud mají napětí opačný charakter, dochází ke zvýšení meze únavy. Tohoto efektu lze záměrně využívat pro zvýšení únavových vlastností svarového spoje. Hodnoty meze únavy jsou vždy nižší pro svarový spoj a vyšší pro neovlivněný materiál. Pro stanovení životnosti svarových spojů z hlediska únavy materiálu lze použít normu ČSN EN 1993-1-9 Eurokód 3.

5.7 Omezení deformací svarových spojů

Jak zbytková napětí, tak i deformace ve svarových spojih jsou důsledkem tepelného namáhání. Pokud je materiál vystaven nerovnoměrnému teplotnímu zatížení a jeho pohyb není ničím omezen, reaguje na toto namáhání deformací. Zbytkové napětí vzniká v materiálu, pokud je nerovnoměrně tepelně namáhán, ale je mu v deformaci zabráněno. Je tedy zřejmé, že deformace i napětí spolu úzce souvisejí a jakékoliv pokusy o snížení nebo odstranění deformací musí být provedeny tak, aby v materiálu nevznikla nežádoucí zbytková napětí a naopak. Svařitelné oceli mají většinou vysokou zásobu plasticity, a proto je pozornost věnována především eliminaci deformací [40].

Obecně platí, že je lepší vzniku nežádoucích napětí i deformací předcházet a provádět opatření k jejich omezení již před nebo v průběhu svařování. Ne vždy je ovšem tato varianta realizovatelná nebo výhodná. Je proto vhodné vždy porovnat možná opatření a zvážit jejich náročnost [40].

Velikost a charakter napětí ve svarovém spoji závisí na mnoha faktorech:

- Svařovací parametry.
- Metoda svařování a postup vytváření svaru.
- Zvolený teplotní režim.

- Zvolený základní materiál (mechanické vlastnosti) a jeho tloušťka.
- Geometrie a velikost svarové housenky, jejich počet a umístění.
- Konstrukční řešení svarových uzlů, tuhost upnutí a použité upínací přípravky [38].

Existují různá opatření, která vedou ke snížení deformačních účinků během svařování. Při zavedení daných opatření ale může nastat, že eliminace jednoho typu napětí vyvolá odezvu a zvýšení jiného typu napětí. Na uvedená opatření ke snížení deformací je proto třeba pohlížet komplexně.

- Svařování neupnutých dílů vede ke snížení příčných napětí.
- Svařování s vyšší hodnotou vneseného tepla vede ke zvýšení příčných napětí.
- Lokální předpětí.
- Předehřev materiálu vede ke snížení teplotních gradientů, což snižuje výsledná napětí a částečně i deformace.
- Zařazení dodatečných operací po svařování, jako je tepelné zpracování, vibrování a lokální plastické deformace, vedou taktéž ke snížení napětí [38], [43].

5.7.1 Vliv materiálu

Komplexní vlastností materiálu, která posuzuje jeho schopnost vytvořit svar požadované jakosti při použití dané technologie, je svařitelnost. Oceli se zaručenou svařitelností mají vyhovující plastické vlastnosti. Z tohoto důvodu je možné využít konstrukční i technologická opatření k potlačení deformací bez výraznějšího ohledu na vznik napětí, která by mohla způsobit vznik trhlin. Aplikací těchto opatření dojde k zachování přesného tvaru konstrukce, sníží se velikost nutných přídavek na obrábění a konstrukci nebude nutné po svaření nákladně rovnat. Příkladem těchto opatření je svařování v tuhém upnutí, které zabrání deformacím svařenců (pomocí přípravků, nebo svěrek a upínek). Dalším příkladem těchto opatření je svařování konstrukce v tuhém sestehovaném stavu.

U ocelí s obtížnou svařitelností hrozí nebezpečí zakalení v tepelně ovlivněné oblasti a je proto vhodnější volit opatření, která primárně omezují zbytková napětí. Deformace se kompenzují předehnutím před svařením, nebo předepsáním větších přídavek na obrábění [2], [36].

Další materiálovou fyzikální veličinou ovlivňující napětí a deformace je tepelná vodivost λ , která významně působí na odvod tepla z oblasti svaru.

Velikost deformací je taktéž závislá na teplotní roztažnosti, mezi kluzu a mezi pevnosti základního materiálu. Materiály s vysokými hodnotami mechanických vlastností E , R_e a R_m jsou schopny více kumulovat napětí pod mez kluzu a méně se deformovat. Mají zpravidla nižší zásobu plasticity, a proto mohou v místech koncentrátorů napětí vznikat trhliny. Je proto nutné volit takový technologický postup, který omezí míru vzniku těchto koncentrátorů (např. křehkých struktur v TOO). U těchto ocelí lze chybějící plasticita materiálu ovlivnit vhodnou volbou přídatného materiálu [38].

5.7.2 Vliv konstrukčního řešení

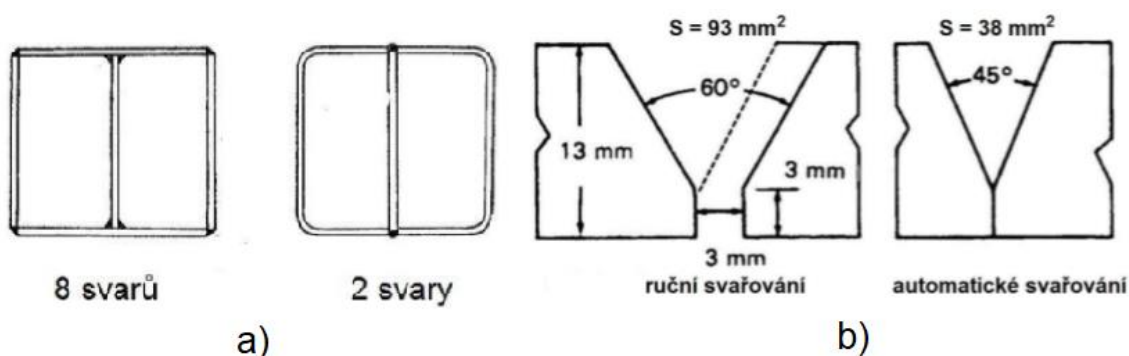
Významný vliv na velikost deformací má i konstrukční řešení svařence (především jeho rozměry, tloušťka a složitost). Tuhost roste s tloušťkou materiálu a se složitostí konstrukce. V důsledku vyšší tuhosti je omezena možnost deformace a v materiálu tak vznikají vysoká vnitřní napětí.

Obecně platí, že u tenkostěnných konstrukcí vznikají velké deformace, zatímco u tlustostěnných konstrukcí je větším problémem vznik vysokých zbytkových napětí. Hlavním předpokladem pro snížení deformací a vnitřních napětí je minimalizace svařovacího procesu (tzn. snížení množství svarů a jejich velikosti, snížení tloušťky ZM). Snížením velikosti a počtu svařových spojů dojde ke snížení hodnoty vneseného tepla, které se významně podílí při vzniku deformací. Počet svarů lze významně snížit např. využitím vhodných dílů a tvarově upravených polotovarů, jako jsou výpalky, profily, výlisky, výkovky, aj [12], [38], [41].

Zároveň by nemělo docházet ke zbytečnému předimenzování svařových spojů. Vnesené teplo totiž roste v závislosti na nosném průřezu svaru. Zmenšení průřezu svaru a svařování s menším tepelným příkonem vedou ke snížení příčných i podélných deformací. U úhlových deformací může dojít k jejich zvýšení. Velikost svarů lze ovlivnit zmenšením úhlu rozevření úkosu a volbou typu úkosu (K, X), svařováním z obou stran s využitím symetrických svarů [41].

Obecné konstrukční zásady vedoucí k potlačování deformací jsou:

- Minimalizovat počet svařových spojů (obr. 31a).
- Volit symetrické svary X, K, I.
- Zvolit menší úhel rozevření svařových ploch (obr. 31b).
- Umisťovat svar co nejbližší k neutrální ose výrobku, nebo symetricky k ní.
- Volit svařování z obou stran.
- Nehromadit svary na jednom místě [38], [41].



Obr. 31: Konstrukční opatření k potlačení deformací: a) minimalizování počtu svarů; b) zmenšení úhlu rozevření [35]

Konstrukční opatření ke snížení podélných deformací jsou:

- Snížování množství svarů.
- Volit malý průřez svaru a malý úhel rozevření úkosu.
- Používat přerušované koutové svary.

- V případě použití přerušovaných svarů jsou výhodnější svary protilehlé.

Konstrukční opatření ke snížení příčných deformací jsou:

- Volit malý úhel rozevření svarového úkosu.
- Minimalizovat počet svarových spojů.
- Omezení tloušťky základního materiálu.

Konstrukční opatření ke snížení úhlových deformací jsou:

- Volit svary I, U, nebo svary oboustranně symetrické K, X.
- Minimalizovat počet svarových housenek [38], [41].

5.7.3 Vliv technologie

Z hlediska technologického má na velikost napětí a deformací hlavní vliv energetická koncentrace tepelného zdroje. Vyšší koncentrací se docílí většího průvaru, menší potřeby rozevření svarových ploch a omezení potřeby vícevrstvého svařování. Sníží se také nutnost předehřevu a v důsledku svařování vyššími rychlostmi je proces produktivnější. Díky menšímu vnesenému teplu na jednotku délky svaru dojde ke snížení napětí a deformací. Intenzita svařovacího procesu také závisí na průměru přídavného materiálu. Optimální průměr drátu je 1 až 1,2 mm. Intenzitu procesu dále ovlivňuje kvalita zdroje a složení ochranné atmosféry, která má vliv na druh přenosu kovu do svarové lázně.

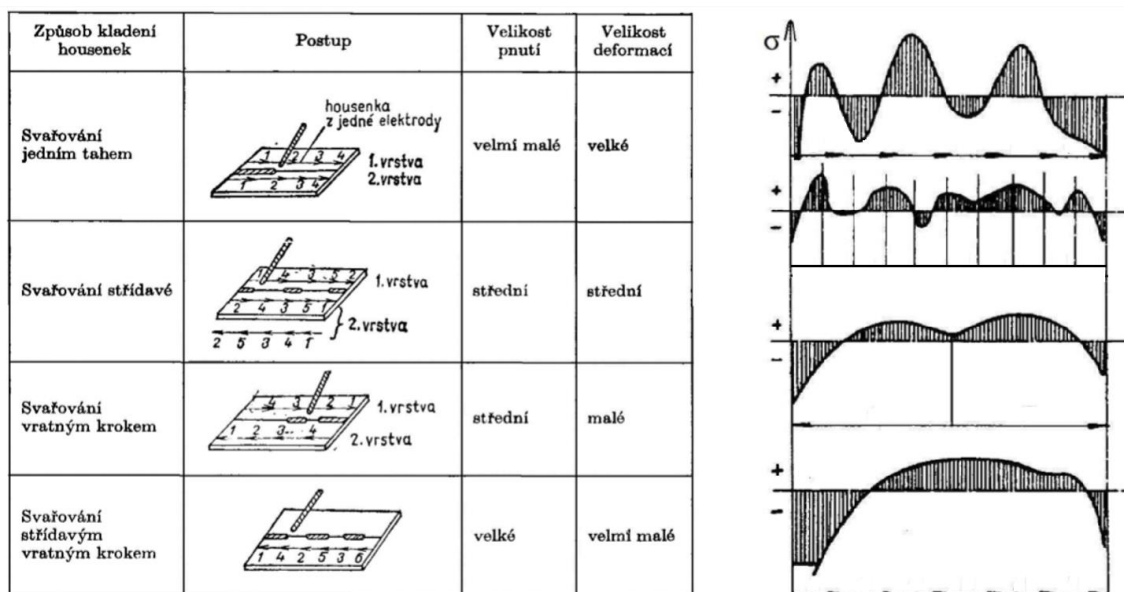
K omezení deformací sestavených konstrukcí se provádí stehování. Vzhledem k tomu, že stehování má významný vliv na velikost podélného a příčného smrštění, je třeba klást důraz na jejich správné provedení. Stehy by měly být umístěny rovnoměrně po celé délce součásti a jejich počet a délka by měla být co nejmenší. Musí být ovšem dostatečná, aby stehy zajistily předepsanou mezeru v kořeni během celého svařování. Doporučená délka stehu je 20 až 40 mm a jejich rozteč se stanovuje vztahem

$$l = 25 \cdot s, \quad (5.5)$$

kde s je tloušťka svařovaného materiálu v mm [38].

Příčné smrštění závisí na velikosti a počtu stehů, zatímco podélné smrštění závisí na postupu stehování. Většinou se nejdříve stehují konce plechů a následně jejich střed.

Velký vliv na velikost deformací a napětí mají dále technologický postup a způsob kladení svarových housenek. Nejčastěji se volí postup svařování opačný než u stehování. Při svařování jedním tahem je velikost deformací největší, zatímco velikost napětí je velmi nízká. Při kladení housenek střídavě dosahují velikosti napětí i deformací středně velkých hodnot a při svařování vratným, nebo střídavě vratným krokem jsou deformace nízké, ale zbytková napětí mohou dosahovat vysokých hodnot. Vliv kladení housenek na velikost napětí a deformací jsou patrné z obrázku 32 [38].



Obr. 32: Vliv kladení housenek na napětí a deformace

Jednotlivé vrstvy svaru je v některých případech vhodné temovat, tedy prokovat. Temováním vzniknou ve svarovém kovu tlaková napětí, která sníží velikost tahových napětí vznikajících při chladnutí svaru. Kromě omezení velikosti napětí se prokováním zmenší i velikost smrštění. Temování se provádí především při svařování konstrukcí s vysokou tuhostí. Nemělo by se provádět při teplotách v rozmezí 200 až 400 °C. Při těchto teplotách se materiál nachází v oblasti tzv. modrého žáru, kdy materiál ztrácí plastické vlastnosti a stává se křehkým.

K redukci deformací slouží i různé druhy přípravků, svěrek a upínek. Svařovací upínky umožňují rychlé, přesné a bezpečné upnutí součástí. Dokáží upnout součást při vynaložení minimální pracovní síly obsluhou. Tyto pomůcky se používají např. k nastavení plechů do takového úhlu, aby se po svaření srovnaly, nebo k pružnému předehtnutí svařovaných dílů, aby po svaření vyrovnaly. Při pevném upnutí v přípravku je sice zabráněno nežádoucím deformacím, nicméně v materiálu zůstává vysoké vnitřní napětí [4].

Technologická opatření ke snížení podélných deformací jsou:

- Vnášet co nejmenší teplo do svařence (svařovat vysokou rychlostí, nízkým svařovacím proudem a používat malé průměry elektrod).
- Svařovat vratným, nebo střídavě vratným krokem.
- Provádět svařování i stehování směrem od geometrického středu svařence k volným koncům.
- Oboustranné svary svařovat z obou stran současně.
- Provádět prokování jednotlivých vrstev svaru.

Technologická opatření ke snížení příčných deformací jsou:

- Svařovat vratným krokem.
- Svařovat vysokou rychlostí a nízkým svařovacím proudem.
- Provádět prokování jednotlivých vrstev svaru.
- Přednostně svařovat automatizovaným způsobem.

- Svařovat s co nejmenším počtem vrstev.
- Provádět stehování.

Technologická opatření ke snížení úhlových deformací jsou:

- Při vícevrstevném svařování omezit počet vrstev na minimum.
- Svařovat vratným krokem.
- Svařovat automatizovaným způsobem.
- Provádět prokování jednotlivých vrstev svaru.
- Provést pružné, či plastické předehtnutí dílů v opačném směru, než se předpokládá deformace.
- Využít předehtřev [4], [23], [38], [41].

5.8 Rovnání svařenců po svařování

Ve výrobní praxi je větší pozornost věnována deformacím než vnitřním napětím, což je dáno především tím, že deformace jsou viditelné a jejich vliv je patrný při následné montáži. Deformace je možné snížit operacemi, které se aplikují po svařování. Jedná se o mechanické a tepelné rovnání (bodový a čarový ohřev aj).

Mechanické rovnání se realizuje plastickou deformací ve směru opačném, než je stávající deformace. K narovnání je třeba vyvodit dostatečně velkou sílu, aby její plastická složka napětí zajistila snížení původní deformace. Mechanické rovnání je prováděno v několika krocích a po odlehčení je kontrolována výsledná deformace. Pro rovnání svařenců se často využívají hydraulické lisy.

Tepelné rovnání se realizuje kyslíko – acetylenovým plamenem, nebo pomocí magnetické indukce. Proces spočívá v intenzivním ohřevu ($t < A_{C1}$) zdeformované oblasti, který vede k poklesu meze kluzu materiálu v daném místě. Studený materiál v okolí brání v rozpínání ohřátého materiálu, což způsobí vznik tlakových napětí a následně i plastické deformace. Během ochlazování, kdy má materiál tendenci se smršťovat, se z důvodu předchozí plastické deformace změní tlaková napětí na tahová. V průběhu ochlazování roste mez kluzu i tahová napětí a vyrovnávají tak okolí místa ohřevu.

Bodový ohřev využívá tzv. sekvence ohřevových bodů od okraje do středu plechu. Používá se k eliminaci deformací, které vznikly při svařování např. tenkých plechů do tuhých rámců aj.

Čarový ohřev se používá především k odstranění úhlových deformací a realizuje se ze spodní strany tupého svaru v délce ohřevové linie. V místech ohřevu dochází ke vzniku tahových napětí. [4], [38], [41].

6. Praktická část

V praktické části diplomové práce je zhodnocena účinnost zvolených způsobů minimalizace deformací na základě měření výsledných deformací svařených vzorků.

V rámci experimentální části práce bylo svařeno pět vzorků plechu z oceli XABO 960, která dle ČSN EN 10027 odpovídá označení S960QL. Všechny vzorky byly svařeny tupým V svarovým spojem robotickým MAG procesem. V průběhu experimentu byla prováděna měření makroskopických deformací a teplotních cyklů v oblasti svarového spoje. Experiment byl proveden na robotickém svařovacím pracovišti Laboratoře výuky svářečských technologií na Ústavu strojírenské technologie FS ČVUT v Praze.

Postup řešení experimentu lze shrnout do následujících bodů:

1. Stanovení návrhu optimalizace svařování (výběrem čtyř metod minimalizace deformací).
2. Stanovení návrhu svarového spoje pro optimalizaci (geometrické parametry, počet housenek aj.).
3. Výběr vhodného přídavného materiálu.
4. Stanovení postupu přípravy vzorků před svařováním (stehování, zajištění polohy na stole, přivaření termočlánků).
5. Stanovení svařovacích parametrů, teploty Interpass a doby ochlazování $t_{8/5}$.
6. Návrh hodnocení vlivu deformací (stanovení bodů měření aj.).
7. Vyhodnocení výsledků.

6.1. Návrh optimalizace svařování

V rámci experimentu bylo vytvořeno pět svařenců s tupým V svarem metodou MAG. Pro srovnání velikosti deformací bylo nejprve nutné vytvořit jeden referenční vzorek, svařenec, na kterém nebyla aplikována žádná opatření vedoucí k minimalizaci makroskopických deformací.

Další čtyři vzorky, na kterých byla aplikována opatření pro minimalizaci makroskopických deformací, sloužily jako podklad pro stanovení, jaký typ opatření byl nejefektivnější. Tzn. zhodnocení, jaké opatření vedlo k nejnižším makroskopickým deformacím. Jednotlivé vzorky jsou uvedeny v následující tabulce 10.

Tabulka 10: Popis vytvořených vzorků svarových spojů

Název vzorku	Metody minimalizace deformací a jejich popis
30/1	Žádné Svařuje se jedním tahem, tzn. jedním směrem až do konce. Tento způsob má za následek značné deformace. Jejich velikost je možno snížit jen zvětšením rychlosti svařování.
30/2	Změna postupu svařování Dochází ke změně ve způsobu kladení housenek. Nesvařuje se jedním tahem, nýbrž obousměrně, kdy jednotlivé úseky 250 mm délky jsou svařovány opačným směrem, než jak se zhotovuje svar. Při tomto způsobu by mělo dojít ke zmenšení podélných deformací.

30/3	Upnutí základního materiálu Při upnutí součásti se odebírají stupně volnosti pomocí šroubovacích či pákových upínek. Základní materiál byl upnut pomocí šesti svislých upínek, čímž by mělo dojít k redukci podélných i příčných deformací.
20/1	Změna velikosti úhlu rozevření tupého V svaru Dochází ke zmenšení úhlu zkosení ze 30° na 20°. V důsledku menšího objemu svarového kovu a tím i menšího teplotního ovlivnění by mělo dojít k redukci deformací.
20/2	Změna velikosti úhlu rozevření společně s upnutím a se změnou postupu svařování Tato varianta kombinuje všechna opatření vedoucí k minimalizaci deformací.

Svařování jedním tahem má v porovnání se svařováním obousměrným za následek nejvýraznější deformace. Při svařování od jednoho ke druhému kraji totiž dochází k nepříznivému rozložení teplotních polí ve svařenci, které taktéž způsobuje větší deformace, než by to bylo v případě svařování od geometrického středu ke kraji.

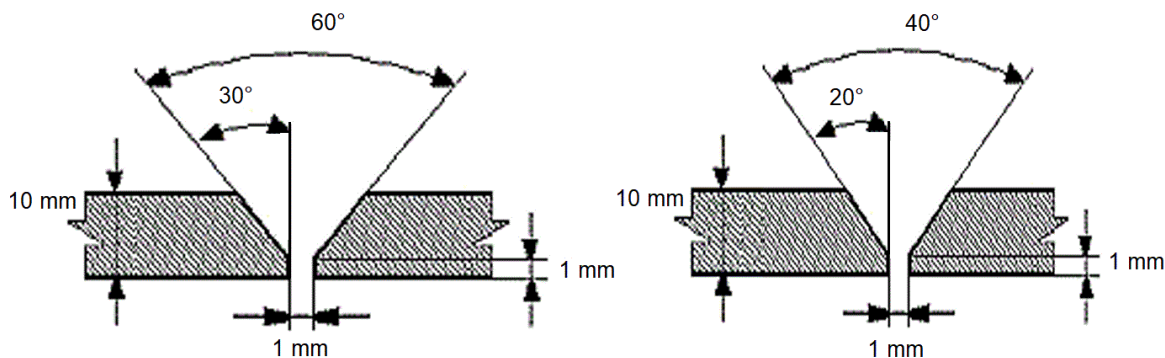
Z hlediska konstrukčního řešení svarového spoje má větší úhel rozevření taktéž nepříznivý vliv na rozvoj deformací ve svařenci. Čím větší je úhel rozevření, tím více svarového kovu je třeba k vytvoření spoje a tím více tepla je vnášeno do materiálu.

6.2. Návrh svarového spoje pro optimalizaci

Plech z oceli S960QL (viz kapitola 6.1.1) o rozměrech 500 × 150 × 10 mm byly svařeny tupým 10V svarem. Byly provedeny svary 30/1 – 3 a v rámci opatření i svary 20/1 – 2, které se lišily v úhlu zkosení, resp. úhlu rozevření. V následující tabulce 11 jsou uvedeny geometrické parametry obou typů svarů (resp. přípravy svarových ploch), které jsou taktéž znázorněny na obrázku 33.

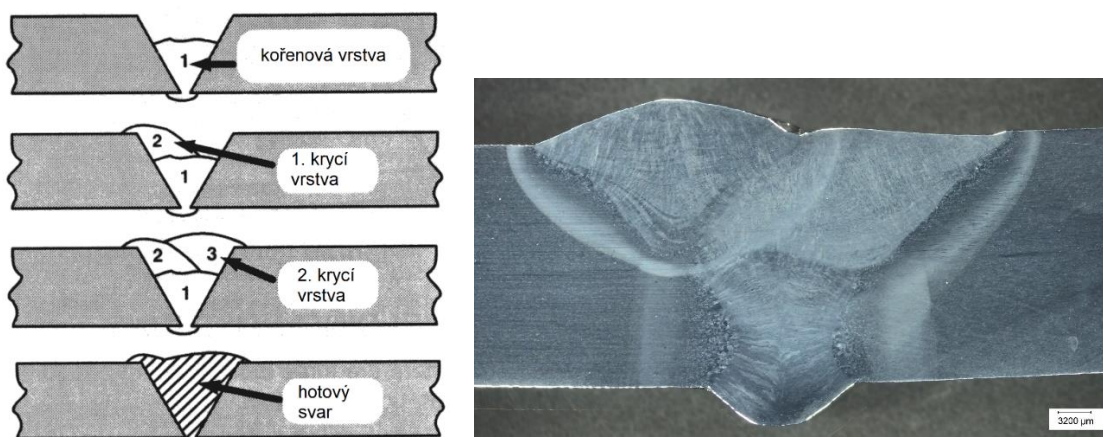
Tabulka 11: Geometrické parametry 10V svaru:

Geometrické parametry	svar 30/1 – 3	svar 20/1 – 2
Úhel otevření	60 °	40°
Úhel zkosení	30°	20°
Styková mezera	1 mm	1 mm
Otupení	1 mm	1 mm

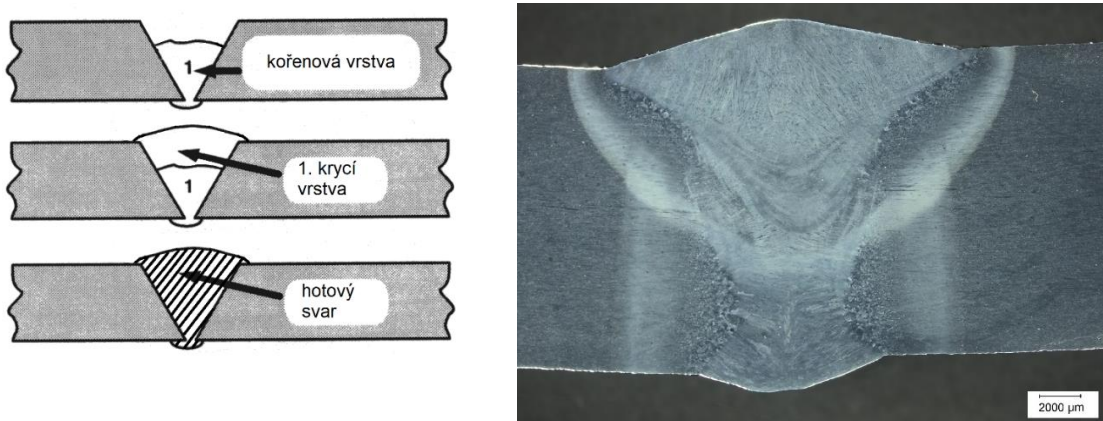


Obr. 33: Geometrie svarů (zleva 30/1 – 3, zprava 20/1 – 2)

Plechý byly svařeny vícevrstevným svarem. Při výrobě vzorků 30/1 – 3 byla nejdříve svařena kořenová vrstva a poté následovaly 1. a 2. krycí vrstva, jak je patrné z obrázku 34. Vzorky 30/1 – 3 tedy byly svařeny třemi svarovými housenkami. Při výrobě vzorků 20/1 – 2, které mají menší úhel rozevření, nebylo potřeba takové množství svarového kovu. Vzorky 20/1 – 2 byly svařeny jen dvěma svarovými housenkami. Nejdříve byla svařena kořenová vrstva a poté následovala 1. krycí vrstva, jak je patrné z obrázku 35.



Obr. 34: Postup svařování vzorku 30/1 – 3 zleva, snímek z mikroskopu zprava



Obr. 35: Postup svařování vzorku 20/1 – 2 zleva, snímek z mikroskopu zprava

Na obrázcích 34 a 35 vpravo jsou snímky z makroskopu pro vzorky 30/1 – 3 a 20/1 – 2. Z obou snímků jsou patrné jednotlivé housenky svarového spoje, jejich svarový kov společně s tepelně ovlivněnou oblastí.

6.1.1 Základní materiál

Základním materiálem je konstrukční vysokopevná ocel XABO 960, dle evropské normy označována jako S960QL. Jedná se o jemnozrnnou ocel s martenziticko – bainitickou strukturou, která se vyrábí řízeným válcováním, kalením a popouštěním.

V tabulkách 12 a 13 jsou uvedeny chemické složení, mechanické vlastnosti a hodnoty nárazové práce pro plechy z oceli XABO 960 z inspekčního certifikátu 3.1 dle normy EN 10204. Chemické složení odpovídá obecným údajům dle normy z tabulek 6 a 7. Hodnoty uvedené v tabulce 13 jsou získány z rozboru tavby použitého základního materiálu. Chemické složení a mechanické vlastnosti lze srovnat s obecnými údaji (dle normy) z tabulek 6 a 7.

Tabulka 12: Chemické složení oceli XABO 960 v hmot. %

Chem. složení XABO 960	C	Si	Mn	P	S	Al	B	Cr
	0,171	0,257	1,11	0,009	0,0005	0,087	0,0027	0,628
	Cu	Mo	N	Nb	Ni	Ti	V	Zr
	0,036	0,611	0,0034	0,029	0,041	0,003	0,003	0,001

Tabulka 13: Mechanické vlastnosti oceli XABO 960

teplota	R_{p0,2}	R_m	R_{p0,2}/R_m	A	K
°C	MPa	MPa	%	%	J
20	1020	1054	96,7	13	110

Plechý byly nařezány laserem a svarové úkosy obrobeny.

6.1.2 Přídavný materiál

Pro svařování základního materiálu (vysokopevnostní oceli S960QL) byl zvolen jako přídavný materiál plný drát firmy FLIESS ED-FK 1000 se značením G 89 6 M21 Mn4Ni2CrMo (odpovídá normě EN ISO 16834-A). Jedná se o poměděný drát určený ke svařování zušlechťených a termomechanicky zpevněných ocelí. Tento přídavný materiál se vyznačuje vysokými mechanickými vlastnostmi, dobrou odolností proti vzniku trhlin, vysokou houževnatostí a vysokou metalurgickou čistotou. Mechanické vlastnosti a chemické složení přídavného materiálu jsou uvedeny v tabulkách 14 a 15. Průměr drátu byl zvolen 1,2 mm.

Tabulka 14: Chemické složení přídavného materiálu v hmot. %

C	Si	Mn	P	S	Cu	Al	Cr	Mo	Ni	V	Ti
0,1	0,82	1,78	0,006	0,01	0,017	0,003	0,37	0,57	2,25	0,003	0,073
Nb	Co	Pb	Sn	B	As	Zr	Ta	Sb	Ca	N	O
0,002	0,001	0,003	0,005	0,001	0,001	0,004	0,001	0,003	0,001		

Tabulka 15: Mechanické vlastnosti přídavného materiálu

ED-FK 1000			
$R_{p0,2}$	R_m	A_5	K_c
MPa	MPa	%	J
902	1000	16	66

6.1.3 Postup přípravy vzorků

Postup přípravy na svařování všech vzorků před samotným procesem svařování lze shrnout do následujících bodů:

1. Byly stanoveny svařovací parametry, vhodnost parametrů se zaměřením na $t_{8/5}$ byla ověřena pomocí výpočtů.
2. Bylo provedeno stehování, a to na začátku, uprostřed a na konci základního materiálu (obr. 37). Svařovací proud a rychlost svařování, při kterých bylo provedeno stehování jsou uvedeny v následující tabulce 16.

Tabulka 16: Parametry stehování

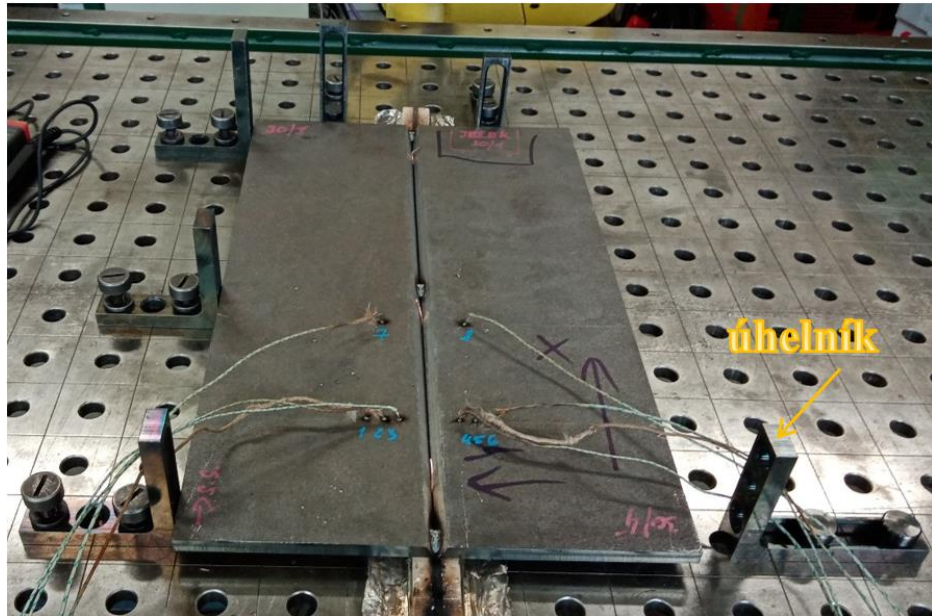
délka stehu [mm]	I [A]	U [V]	v [$\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$]
10	120	18	40



Obr. 36: Stehování základního materiálu

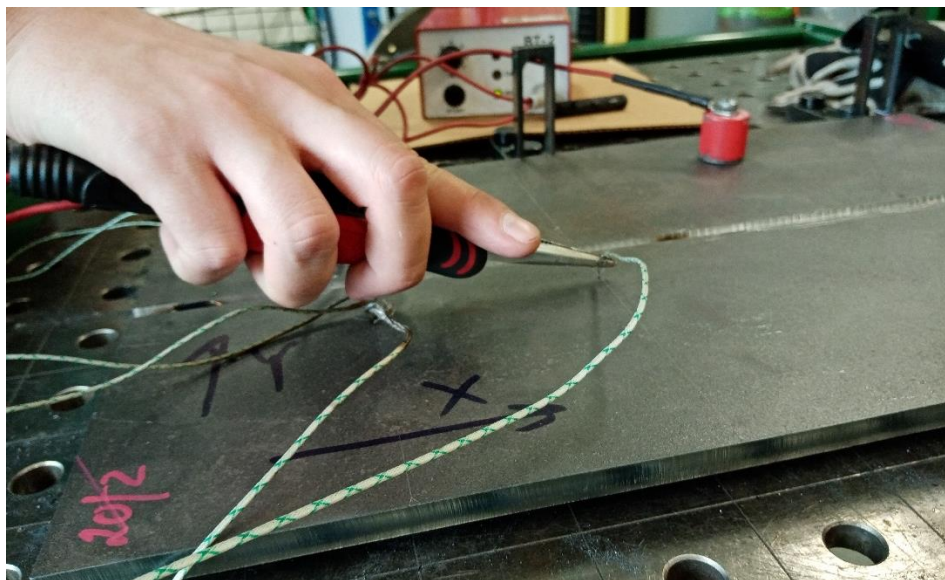
3. Po nastehování bylo nutné plechy změřit na souřadnicovém měřícím stroji (viz kapitola 6.4) pro stanovení počáteční deformace před svařováním. Nastehovaný základní materiál byl umístěn na stůl a po doplnění stavebnicovými systémy byl vytvořen přípravek (obr. 38).

Pro zajištění polohy základního materiálu byly použity stavebnicové přípravky, které využívají typizované díly skládající se do požadovaného přípravku. Bylo použito 6 úhelníků, které byly ke stolu připevněny pomocí čepů. Hlavním účelem přípravku bylo zajištění správné polohy svařence při svařování.



Obr. 37: Přípravek s umístěným vzorkem

4. Aby bylo možné sledovat teplotní cykly, bylo nutné přivařit termočlánky do budoucí tepelně ovlivněné oblasti základního materiálu (obr. 39). Přivařeno bylo celkem 10 termočlánků. Byly použity termočlánky typu K (Ni-CrNi), které byly přivařeny ke zkušebnímu vzorku pomocí bodové kondenzátorové svářečky (BT – 2). Dále byly spojeny s kompenzačním vedením a připojeny pomocí adaptéru k vícekanálové měřicí ústředně AHLBORN ALMEMO 5690-2M. Pomocí měřicí ústředny bylo možné odečítat i teplotu Interpass.



Obr. 38: Přivařování termočlánků

6.3. Návrh svařovacího procesu

Byly stanoveny svařovací parametry, které byly následně ověřeny výpočtem s ohledem na $t_{8/5}$. Svařovací parametry pro jednotlivé vzorky jsou uvedeny v tabulce 17.

6.2.1 Vnesené teplo

Pomocí svařovacího proudu I [A] a napětí U [V] je možné vypočítat hodnotu vneseného tepla Q podle následujícího vzorce

$$Q = \frac{U \cdot I}{v_s} \cdot \eta \quad [\text{J} \cdot \text{mm}^{-1}], \quad (6.1)$$

kde v_s je rychlost svařování v $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$,

η je účinnost přenosu tepla (pro zvolenou technologii $\eta = 0,8$ dle [38]).

Hodnoty vneseného tepla pro jednotlivé svarové housenky jsou uvedeny v tab. 17.

Tabulka 17: Svařovací parametry pro jednotlivé vzorky

Vzorky	Vrstva	I [A]	U [V]	v [$\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$]	Q [$\text{J} \cdot \text{mm}^{-1}$]
30/1 - 3	kořenová	250	27,9	42	797,1
	1. krycí	265	28,8	40	916,8
	2. krycí	260	28,4	50	709,1
20/1 - 2	kořenová	260	28,4	45	787,6
	1. krycí	260	28,4	40	887

Teplota předehřevu byla rovna pokojové teplotě tedy 25 °C.

6.2.2 Doba ochlazování $t_{8/5}$

Základem výpočtu doby ochlazování $t_{8/5}$ je odlišení dvou a trojrozměrného tepelného toku. Při svařování základního materiálu, plechu, s tloušťkou do 20 mm lze uvažovat dvourozměrný tepelný tok. Ochlazovací dobu lze spočítat ze vzorce 4.4 v kapitole 4.3.1.

Dobu ochlazování pro kořenovou vrstvu vzorků 30/1 – 3 spočítáme následovně.

$$t_{8/5} = (4300 - 4,3 \cdot 20) \cdot 10^5 \frac{0,847^2}{10^2} \cdot \left[\left(\frac{1}{500 - 20} \right)^2 - \left(\frac{1}{800 - 20} \right)^2 \right] \cdot 0,9 = 7,3 \text{ s}$$

Doba ochlazování pro všechny vrstvy vzorků 30/1 – 3 a 20/1 – 2 jsou uvedeny v tabulce 18.

Tabulka 18: Doba ochlazování $t_{8/5}$ pro jednotlivé vrstvy

Vzorky	Vrstva	Q [$\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$]	$t_{8/5}$ [s]
30/1 – 3	kořenová	0,847	7,3
	1. krycí	0,9741	9,7
	2. krycí	0,7535	5,8
20/1 – 2	kořenová	0,8369	7,2
	1. krycí	0,9424	9,1

6.2.3 Teplota Interpass

Teplota interpass, tedy teplota vícevrstvého svaru a přiléhajícího základního materiálu bezprostředně před aplikací další svarové housenky, byla stanovena tak, aby nikdy

nepřekročila hodnotu 100 °C. Po navaření kořenové vrstvy vzorků 30/1 – 3 následovala prodleva 4 minuty a 50 sekund, během kterých se svarový spoj ochladil na teplotu 100 °C. Poté byla navařena 1. krycí vrstva, po které následovala prodleva 10 minut a 30 sekund, během kterých se svarový spoj ochladil na teplotu 100 °C. Doby ochlazení na teplotu Interpass jsou uvedeny v tabulce 19.

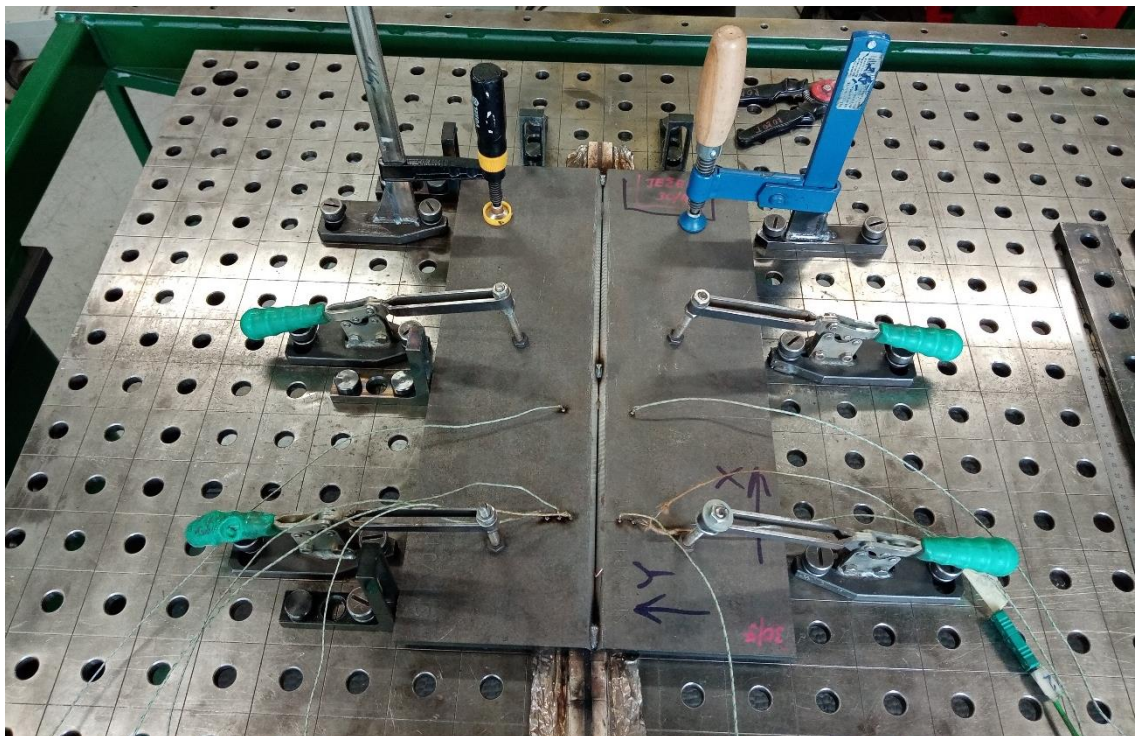
Tabulka 19: Teploty Interpass a doba chlazení na teplotu Interpass

Vzorky	Mezi vrstvami	Teplota Interpass [°C]	Doba chlazení [s]
30/1 – 3	kořenová – 1. krycí	100	290
	1. krycí – 2. krycí	100	630
20/1 – 2	kořenová – 1. krycí	100	300

6.2.4 Upnutí základního materiálu

V rámci opatření vedoucích k minimalizaci deformací byla u vzorků 30/3 a 20/2 zvýšena tuhost upnutí. Vzorky byly upnuty pomocí rychloupínek a svěrek. Upínky jsou využívány v sériové výrobě a jsou součástí svařovacího přípravku. Díky rychlému a lehkému upnutí zvyšují produktivitu práce.

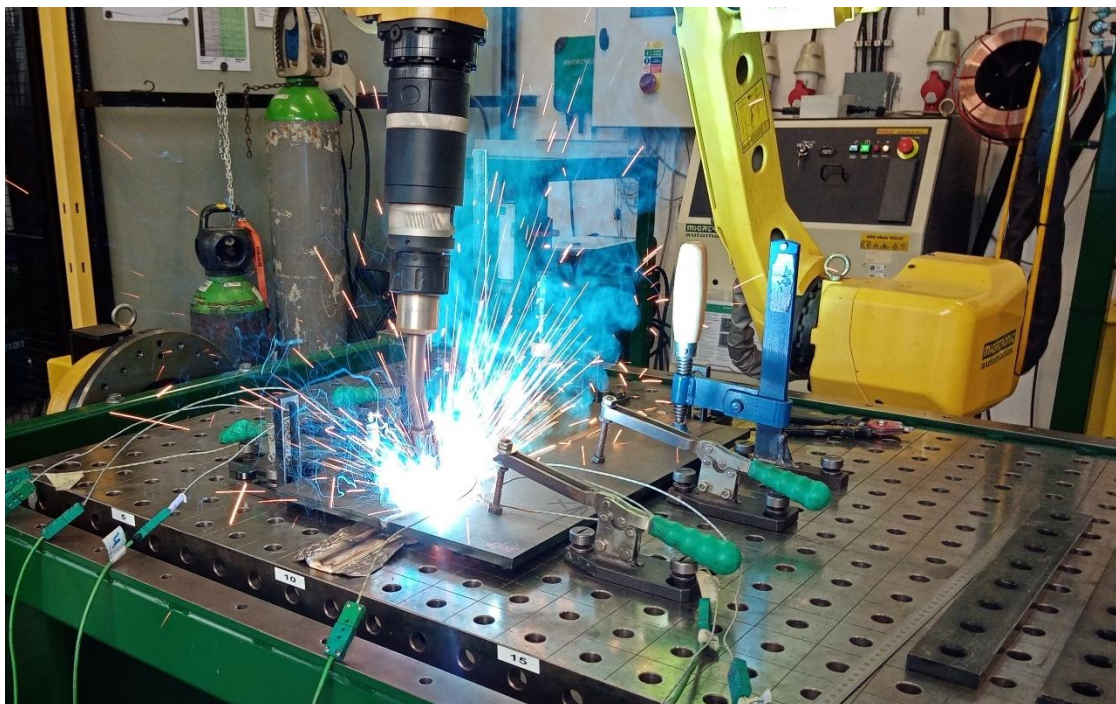
Při upnutí vzorků byly odebrány stupně volnosti pomocí šroubovacích či pákových upínek. Základní materiál byl upnut pomocí šesti svislých upínek, které byly umístěny v vodorovném směru asi 70 mm od svarového spoje. Na obrázku 40 je znázorněno upnutí základního materiálu (vzorky 30/3 a 20/2).



Obr. 39: Upnutí vzorku pomocí upínek a svěrek

6.2.5 Zařízení

Vzorky byly svařeny na robotickém svařovacím pracovišti LVST na Ústavu strojírenských technologií robotickým MAG procesem, který je na obrázku 41. Během všech prováděných experimentů byl používán robot pro svařování elektrickým obloukem FANUC ARC Mate 100iC společně se svařovacím zdrojem Sigma Galaxy 400 MIGA-TRONIC



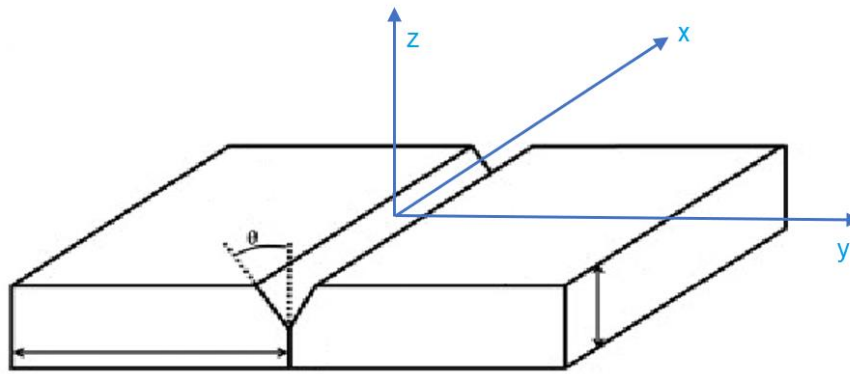
Obr. 40: Svařování robotickým MAG

6.2.6 Ochranná atmosféra

Jako ochranná atmosféra byla použita směs plynů na bázi argonu s příměsí CO_2 . Složení aktivní ochranné atmosféry je 82 % Ar a 18 % CO_2 . Podle normy ISO 14175 odpovídá směsný plyn označení M 21 – ArC – 18. Distributorem tlakové lahve s ochrannou atmosférou je firma Linde Gas a.s. Průtok ochranného plynu byl nastaven na hodnotu $15 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$.

6.4. Návrh procesu hodnocení vlivu deformací

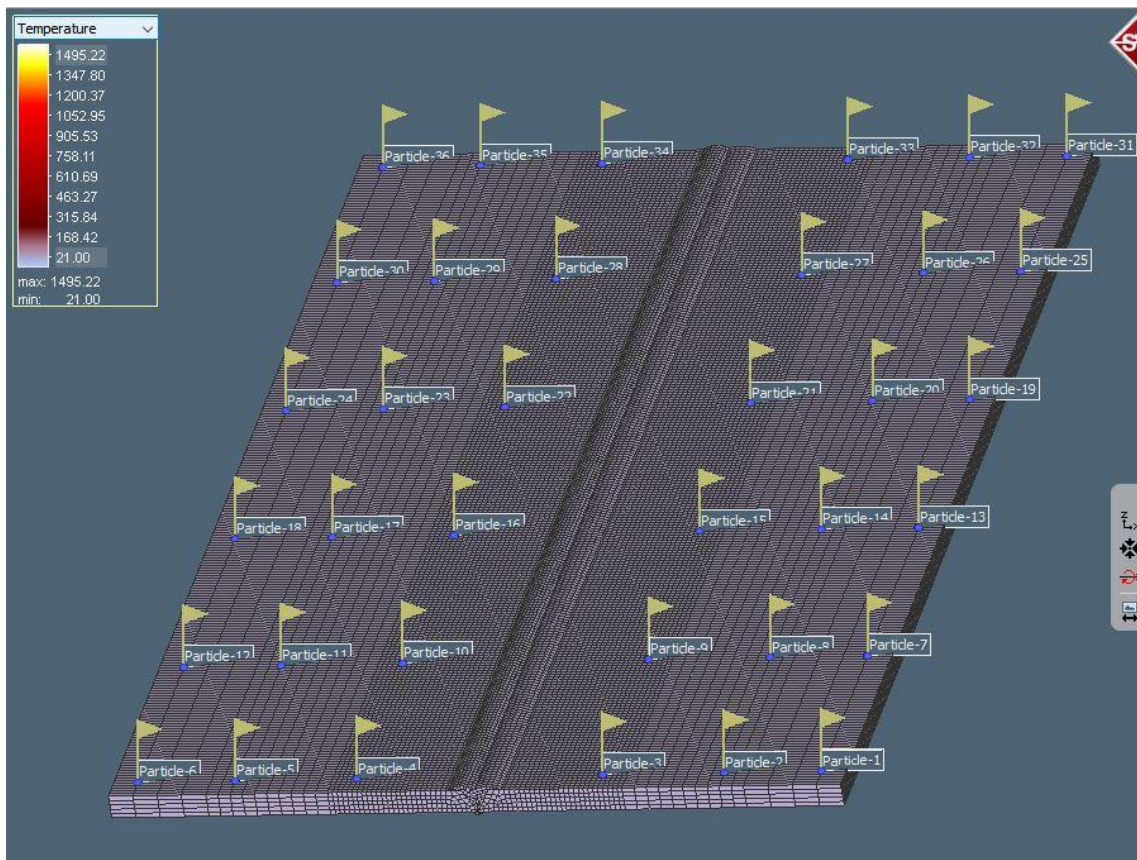
Po procesu svařování byly vyhodnoceny velikosti deformací v závislosti na použité metodě redukce makroskopických deformací (vliv změny velikosti úhlu rozevření tupého svaru, vliv způsobu upnutí, vliv změny postupu svařování). Hodnoty deformací byly stanoveny pro všechny vzorky, a to ve směru osy z. Deformace byly měřeny na souřadnicovém měřicím stroji ZEISS PRISMO. Jedná se o mostový typ souřadnicového měřicího stroje, který měří s maximální dovolenou chybou $0,5 + L/500$ mikrometru. Na obrázku 42 je patrný souřadnicový systém vzorků. Osa z odpovídá vertikálnímu směru souřadnicového systému.



Obr. 41: Souřadnicový systém vzorků

Veškeré deformace byly měřeny v ose z. Vzhledem ke skutečnosti, že k tepelnému ovlivnění základního materiálu došlo už během stehování, tedy před vlastním procesem svařování, bylo nutné změřit i nastehované vzorky. Vzorky tedy byly změřeny dvakrát, jednou před svařováním a po druhé po svařování, aby nedošlo ke zkreslení výsledků výsledných hodnot deformací a aby byl tím zanedbán vliv stehování.

Hodnoty úchylek v ose z byly měřeny na všech vzorcích v rastru bodů, na 36 místech, které jsou znázorněny na obrázku 43. Hodnoty deformací byly měřeny až po úplném zchlazení vzorků, kdy měly stejnou teplotu, jako byla teplota okolí.



Obr. 42: Body měření na vzorku a teplota vzorku

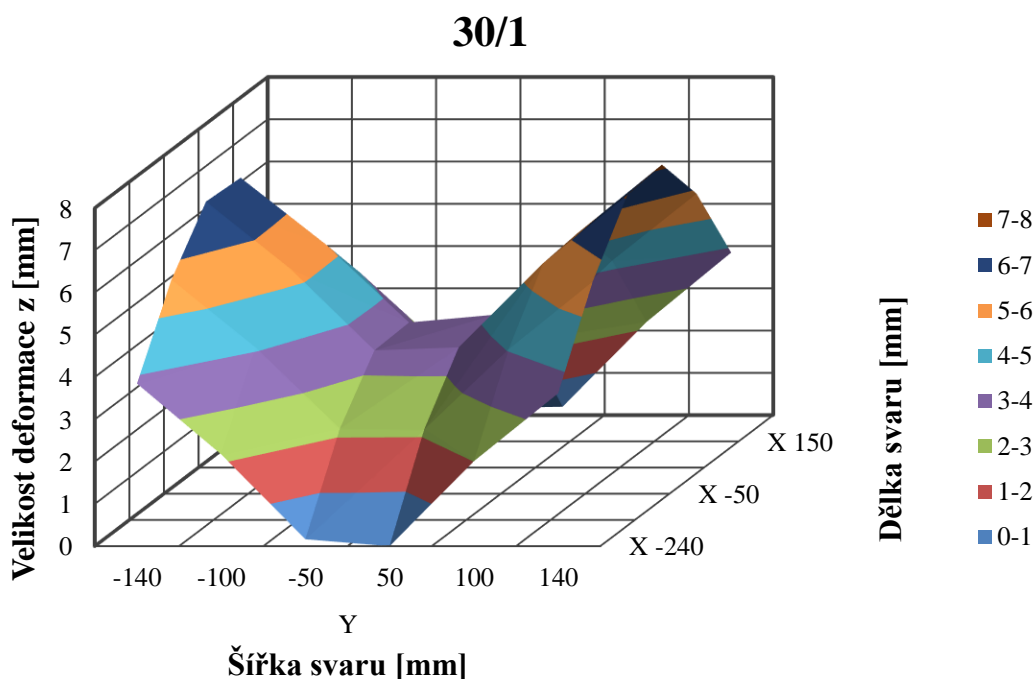
6.5. Vyhodnocení naměřených dat

Po naměření hodnot deformací ve směru osy z byla data zpracována pomocí tabulkového procesoru. Výsledky byly zpracovány jak ve formě tabulek, tak graficky pomocí 3D vizualizace.

6.5.1 Vzorek bez aplikování opatření – vyhodnocení vzorku 30/1

Aby bylo zřejmé, jak velké deformace vznikají při svařování volného vzorku, bylo nutné změřit hodnoty v ose z vzorku 30/1. Na vzorek nebyla aplikována žádná z opatření vedoucí k minimalizaci deformací. Výsledky hodnot deformací vzorku 30/1 byly stěžejní pro porovnání s výsledky deformací ostatních vzorků.

V následujícím grafu č. 1 jsou znázorněny deformace v ose z v závislosti na šířce (osa y) a délce (osa x) svarového spoje pro vzorek 30/1.



Graf 1: Deformace v ose z vzorku 30/1

Z grafu jsou patrné průběhy deformací v ose z v mm. Nejvyšší deformace byly naměřeny na bočních stranách plechu (rovnoběžně se směrem x v grafu) a hodnoty těchto deformací dosahují hodnot 6 až 7 mm. V rozích dosahují deformace hodnot 3 až 4 mm.

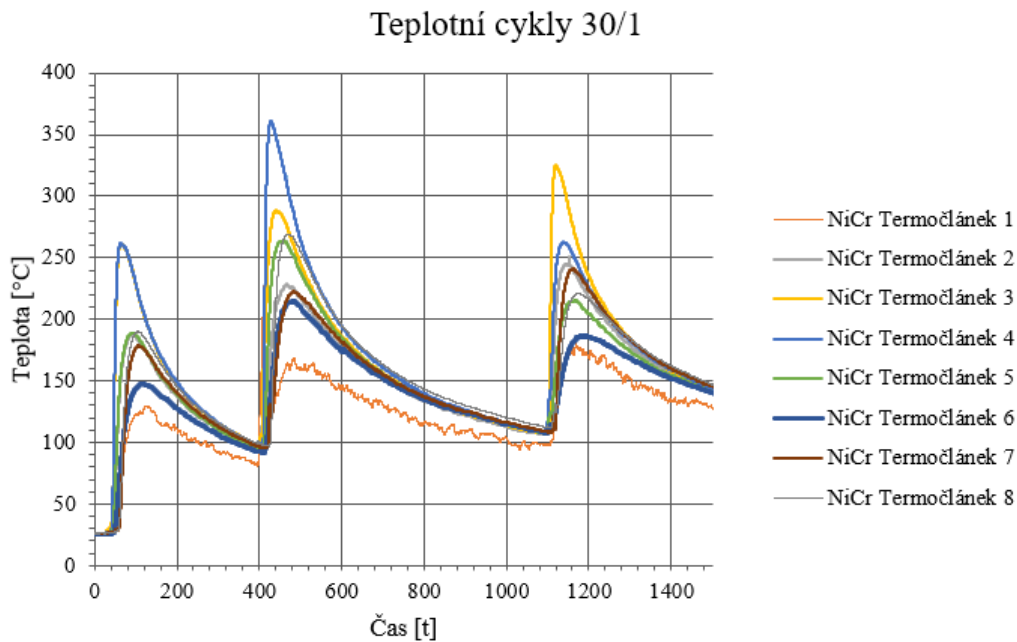
Naměřené hodnoty deformací ve všech bodech jsou taktéž patrné z následující tabulky 20. Uspořádání tabulky odpovídá uspořádání měřených bodů na vzorku.

Tabulka 20: Deformace vzorku 30/1 v mm

Deformace ve směru Z [mm]		Poloha Y [mm]					
		-140	-100	-50	50	100	140
Poloha X [mm]	-240	3,848	2,173	0,164	0,000	2,009	3,615
	-150	5,688	4,084	2,163	2,140	4,039	5,643
	-50	6,915	5,326	3,394	3,466	5,454	7,066
	50	6,856	5,297	3,431	3,612	5,548	7,166
	150	5,523	4,005	2,196	2,402	4,279	5,861
	240	3,616	2,052	0,165	0,198	2,210	3,845

Graf č.1 společně s tabulkou 20 sloužily k posouzení vlivů jednotlivých opatření na výsledné deformace svařence.

Průběh teploty v závislosti na čase v různých místech na vzorku znázorňují teplotní cykly v následujícím grafu č. 2. Termočlánky byly umístěny na 8 místech vzorku. Z grafu jsou patrná 3 maxima, která odpovídají počtu kladených housenek.



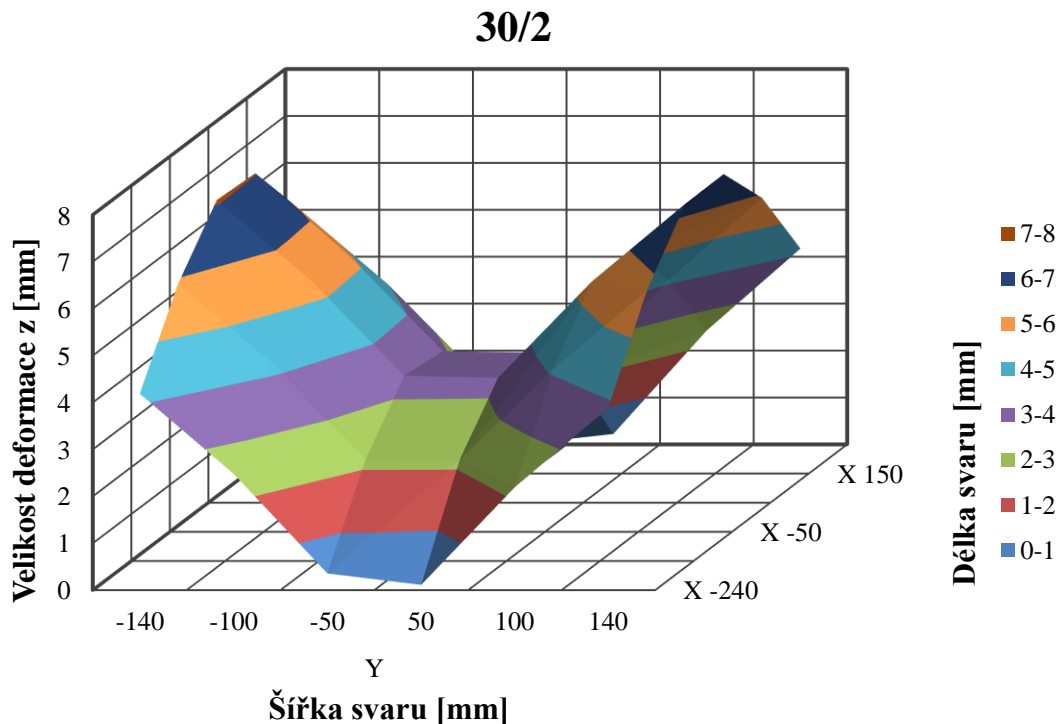
Graf 2: Teplotní cykly vzorku 30/1

6.5.2 Změna postupu svařování – vyhodnocení vzorku 30/2

Vzorek 30/2 byl svařován obousměrně, kdy 25 cm délky svaru bylo svařováno v opačném směru. Tímto způsobem kladení housenek došlo z části k příznivému ovlivnění teplotních polí materiálu, což vedlo ke snížení deformací především v okolí svařového kovu.

Graf závislosti deformací ve směru osy z na délce a šířce svaru je patrný níže. Porovnáme-li graf vzorku 30/2 (graf č. 3) s grafem vzorku 30/1 (graf č. 1), zjistíme, že k výraznější redukci deformací došlo v blízkosti svařového kovu a dále v pravé střední části vzorku. V ostatních částech došlo k mírnému nárůstu hodnot deformace. Zvolená

opatření, tj. změna postupu svařování, se tedy projevila pouze v blízkosti svarového kovu. Ve zbylé části materiálu se opatření neprojevilo, naopak byl zaznamenán nárůst makroskopické deformace.



Graf 3: Deformace v ose z vzorku 30/2

Tabulka hodnot deformací pro vzorek 30/2 je patrná níže.

Tabulka 21: Deformace vzorku 30/2 v mm

Deformace ve směru Z [mm]		Poloha Y [mm]					
		-140	-100	-50	50	100	140
Poloha X [mm]	-240	4,187	2,482	0,356	0,113	2,195	3,884
	-150	5,915	4,222	2,174	2,158	4,099	5,765
	-50	7,071	5,371	3,327	3,283	5,332	6,991
	50	7,022	5,267	3,230	3,201	5,294	7,003
	150	5,739	4,042	2,029	2,042	4,133	5,875
	240	3,884	2,145	0,000	0,223	2,431	4,173

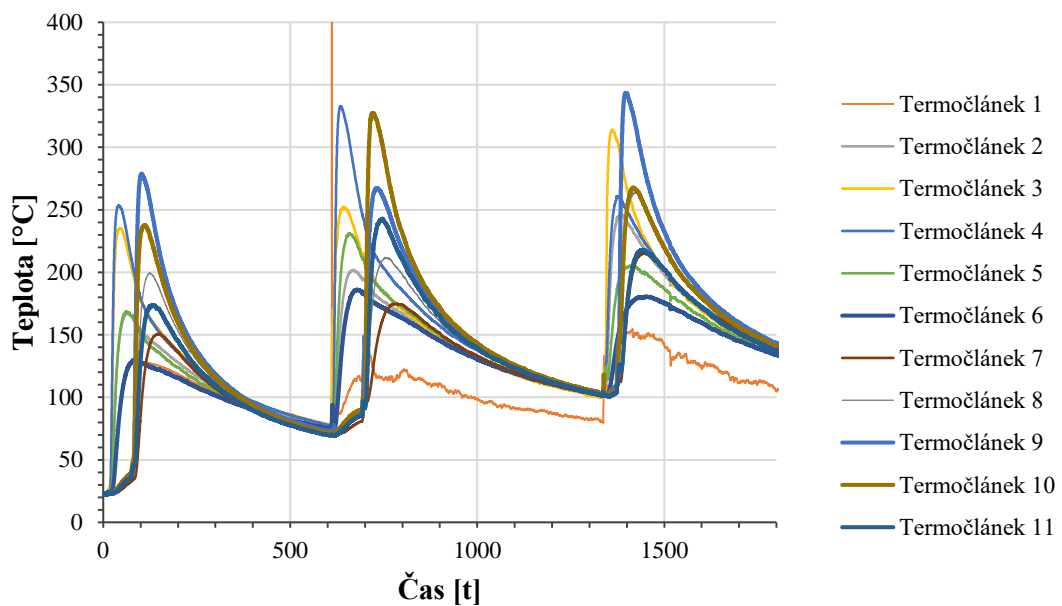
Červeně vyznačené buňky v tabulce 22 představují hodnoty deformací, u kterých došlo k nárůstu vzhledem k referenčnímu vzorku. Zelené hodnoty naopak představují zmenšení deformací vůči vzorku 30/1. Pro lepší interpretaci výsledků jsou hodnoty deformací vzhledem k referenčnímu vzorku uvedeny i procentuálně.

Tabulka 22: Pokles/nárůst deformací vzorku 30/2 vzhledem k 30/1 v %

Rozdíl [%]		Poloha Y [mm]					
		-140	-100	-50	50	100	140
Poloha X [mm]	-240	-8,83%	-14,22%	-117,01%		-9,24%	-7,45%
	-150	-3,99%	-3,38%	-0,52%	-0,85%	-1,48%	-2,16%
	-50	-2,25%	-0,84%	1,98%	5,27%	2,23%	1,05%
	50	-2,43%	0,56%	5,87%	11,39%	4,58%	2,26%
	150	-3,91%	-0,91%	7,62%	15,00%	3,42%	-0,24%
	240	-7,39%	-4,55%	100,00%	-12,52%	-10,00%	-8,53%

Teplotní cykly jsou znázorněny v grafu č. 4.

Teplotní cykly 30/2

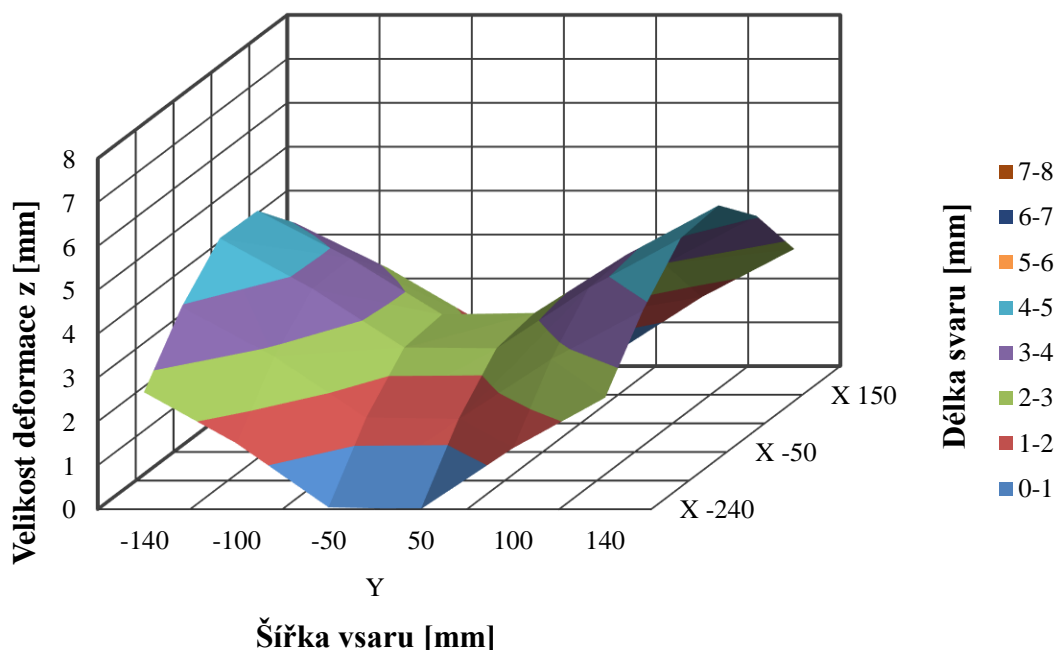


Graf 4: Teplotní cykly vzorku 30/2

6.5.3 Upnutí základního materiálu – vyhodnocení vzorku 30/3

Za pomoci šroubovacích a pákových upínek byl základní materiál zajištěn a vlivem pevného upnutí došlo k výrazné redukci deformací základního materiálu. Z následujícího grafu č. 5 je opět patrná deformace ve směru z v závislosti na délce a šířce svaru.

30/3



Graf 5: Deformace v ose z vzorku 30/3

Z grafu je na první pohled patrné, že díky zvoleným opatřením došlo k velmi výrazné minimalizaci deformací. V rozích dosahují deformace hodnot 2 až 3 mm, což představuje pokles deformací vzhledem k referenčnímu vzorku o 29 až 30 %. Na bočních stranách vzorku ve střední části dosahují deformace hodnot asi 4 až 5 mm. To odpovídá přibližně 30% úbytku deformací v porovnání se vzorkem 30/1.

Metoda upnutí základního materiálu vedla velmi efektivně k redukcí deformací svařence.

Tabulka 23 hodnot deformací ve směru osy z pro vzorek 30/3 je patrná níže. Tabulka 24 znázorňuje procentuální pokles, nebo nárůst deformací vzhledem k referenčnímu vzorku.

Tabulka 23: Deformace vzorku 30/3 v mm

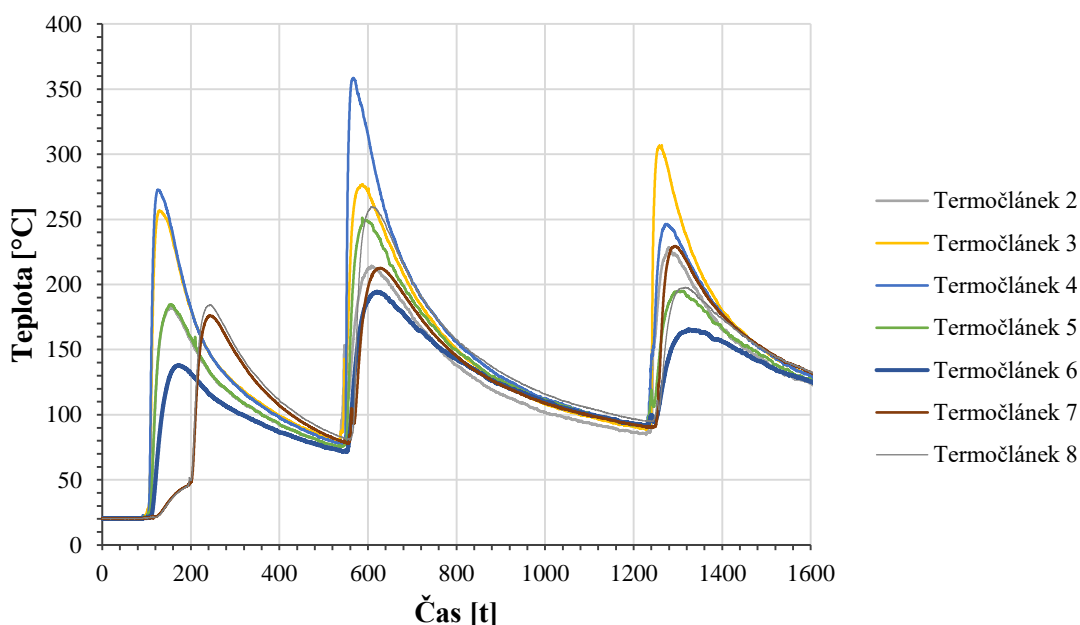
Deformace ve směru Z [mm]		Poloha Y [mm]					
		-140	-100	-50	50	100	140
Poloha X [mm]	-240	2,670	1,507	0,043	0,000	1,394	2,546
	-150	3,970	2,842	1,443	1,411	2,770	3,890
	-50	4,877	3,736	2,385	2,368	3,750	4,878
	50	4,850	3,771	2,487	2,519	3,849	4,972
	150	3,915	2,896	1,677	1,755	2,996	4,079
	240	2,539	1,512	0,266	0,236	1,580	2,673

Tabulka 24: Pokles/nárůst deformací vzorku 30/3 vzhledem k 30/1 v %

Rozdíl [%]		Poloha Y [mm]					
		-140	-100	-50	50	100	140
Poloha X [mm]	-240	30,61%	30,63%	73,92%	0,00%	30,62%	29,57%
	-150	30,20%	30,40%	33,31%	34,09%	31,42%	31,07%
	-50	29,47%	29,85%	29,72%	31,68%	31,24%	30,96%
	50	29,25%	28,80%	27,53%	30,27%	30,63%	30,62%
	150	29,13%	27,70%	23,63%	26,95%	30,00%	30,40%
	240	29,78%	26,32%	-60,79%	-19,02%	28,50%	30,49%

Teplotní cykly vzorku 30/3 jsou znázorněny v grafu č. 6.

Teplotní cykly 30/3

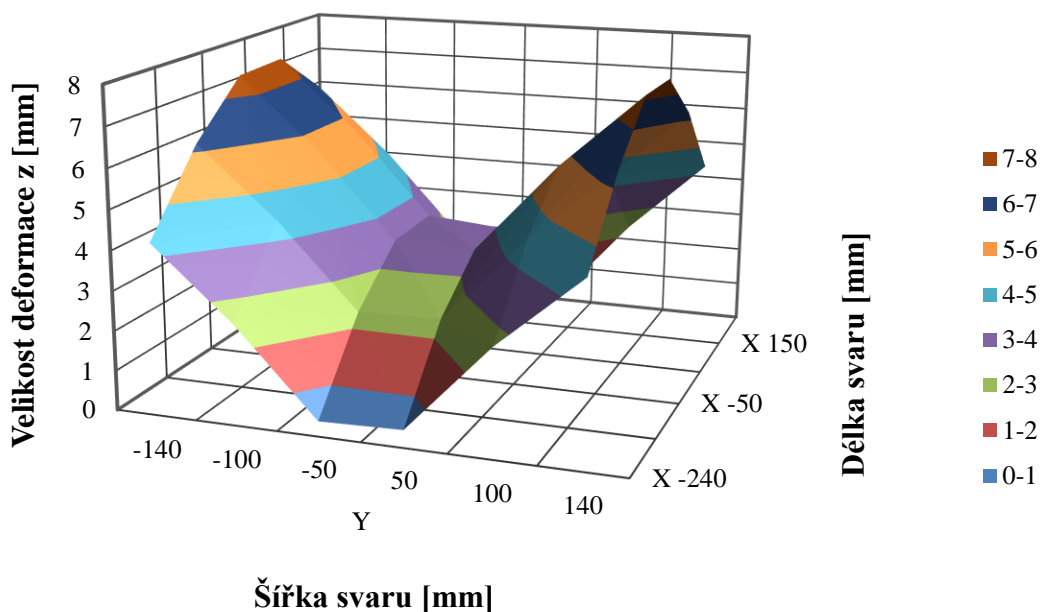


Graf 6: Teplotní cykly vzorku 30/3

6.5.4 Změna velikosti úhlu rozevření tupého V svaru – vyhodnocení vzorku 20/1

Snížení úhlu zkosení ze 30° na 20° vedlo ke snížení počtu kladených housenek (viz kapitola 6.2). Snížilo se tak množství svarového kovu ve svarovém spoji a zároveň i hodnota celkového vneseného tepla. Toto opatření mělo vést podle předpokladů k redukci deformací. Z následujícího grafu č. 7 je patrná deformace ve směru z v závislosti na délce a šířce svaru.

20/1



Graf 7: Deformace v ose z vzorku 20/1

Při porovnání hodnot deformací vzorku grafu 30/1 a 20/1 (grafy č. 1 a 7) zjistíme, že aplikovaná metoda redukce deformací pomocí zmenšení úhlu rozevření nebyla efektivní. Na bočních stranách vzorku došlo podle grafu 20/1 k mírnému nárůstu deformací. Dle tabulky 26 se tyto deformace zvýšily v průměru o 10 %. V rozích vzorku deformace taktéž vzrostly v porovnání se vzorkem 30/1. Nárůst deformací zde dosahoval hodnot až 24 %.

K bližšímu porovnání hodnot deformací vzorků 30/1 a 20/1 slouží i následující tabulky 25 a 26.

Tabulka 25: Deformace vzorku 20/1 v mm

Deformace ve směru Z [mm]		Poloha Y [mm]					
		-140	-100	-50	50	100	140
Poloha X [mm]	-240	4,290	2,515	0,380	0,440	2,678	4,492
	-150	6,171	4,425	2,310	2,348	4,518	6,335
	-50	7,461	5,664	3,482	3,431	5,722	7,611
	50	7,509	5,710	3,534	3,356	5,694	7,579
	150	6,342	4,536	2,370	2,106	4,387	6,275
	240	4,489	2,668	0,388	0,000	2,361	4,290

Tabulka 26: Pokles/nárůst deformací vzorku 20/1 vzhledem k 30/1 v %

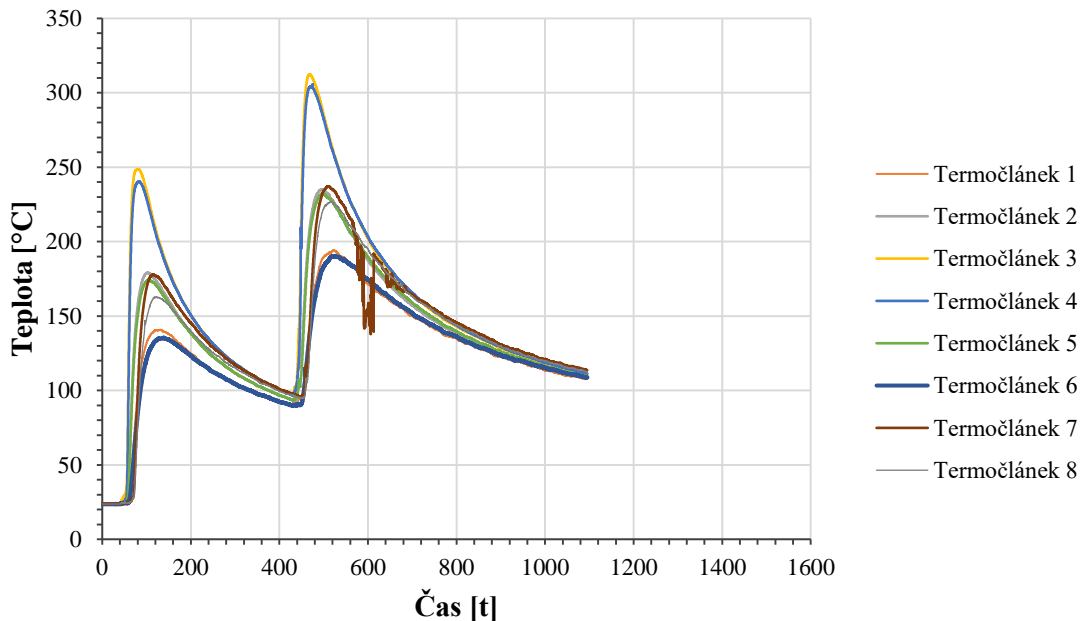
Rozdíl [%]		Poloha Y [mm]					
		-140	-100	-50	50	100	140
Poloha X [mm]	-240	-11,50%	-15,76%	-132,02%	0,00%	-33,26%	-24,28%
	-150	-8,49%	-8,35%	-6,81%	-9,70%	-11,85%	-12,26%
	-50	-7,89%	-6,34%	-2,59%	1,02%	-4,92%	-7,72%
	50	-9,53%	-7,80%	-3,00%	7,08%	-2,63%	-5,77%
	150	-14,82%	-13,25%	-7,91%	12,35%	-2,51%	-7,07%
	240	-24,12%	-30,01%	-135,05%	100,00%	-6,83%	-11,55%

Červená pole tvořící velkou část tabulky naznačují nárůst deformací. Ten se nejvíce projevuje na okrajích a v rozích vzorku. Zelená pole naznačující pokles deformací se nachází pouze ve 4 bodech měřených v blízkosti svarového spoje.

Minimalizace deformací pomocí změny úhly rozevření se při tomto experimentu nejeví jako výhodná. Je proto třeba věnovat vyšší pozornost jiným metodám, jako je např. upnutí materiálu u vzorku 30/3.

Teplotní cykly vzorku 20/1 jsou patrné z grafu č. 8. V grafu jsou znázorněna 2 maxima, která odpovídají počtu svarových housenek.

Teplotní cykly 20/1

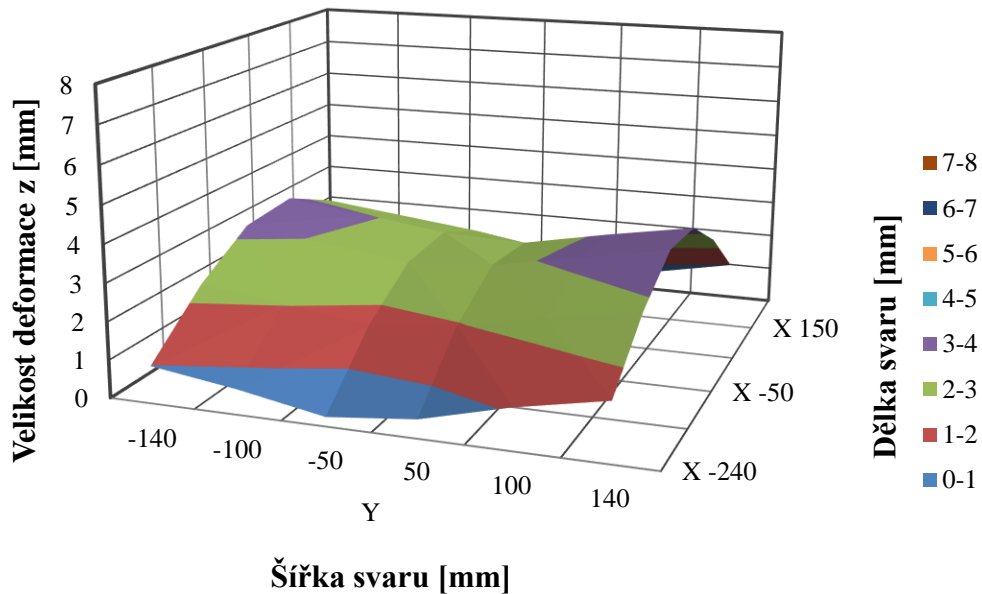


Graf 8: Teplotní cykly vzorku 20/1

6.5.5 Kombinace všech opatření – vyhodnocení vzorku 20/2

Poslední vzorek 20/2 kombinuje všechna opatření vedoucí k minimalizaci deformací. Vzorek byl upnut pomocí pákových a šroubovacích upínek, byl svařován vratným krokem a úhel rozevření byl zmenšen na 20°. Následující graf ukazuje deformace ve směru z vzorku 20/2 v závislosti na délce a šířce svaru.

20/2



Graf 9: Deformace v ose z vzorku 20/2

Jak je patrné na první pohled, kombinací všech opatření došlo k nejvýraznějšímu úbytku deformací. V rozích vzorku dosahují deformace pouze hodnot 1 až 2 mm, což odpovídá úbytku deformací až o 74 %. Deformace v pravém i levém kraji vzorku dosahují hodnot pouze 3 až 4 mm. To odpovídá úbytku deformací až o 53 %.

Tabulka č. 27 hodnot deformací pro vzorek 20/1 je patrná níže. Procentuální vyjádření poklesu a nárůstu deformací je patrné z tabulky 28.

Tabulka 27: Deformace vzorku 20/2 v mm

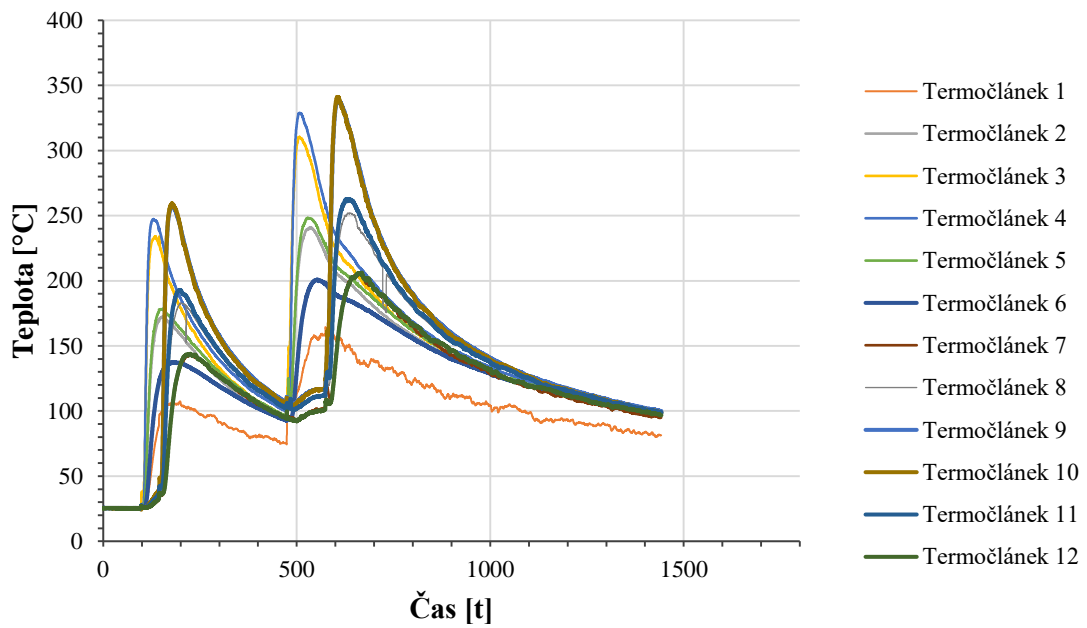
Deformace ve směru Z [mm]		Poloha Y [mm]					
		-140	-100	-50	50	100	140
Poloha X [mm]	-240	0,985	0,664	0,246	0,488	1,084	1,540
	-150	2,310	2,025	1,715	1,953	2,397	2,818
	-50	3,222	2,919	2,630	2,780	3,213	3,633
	50	3,341	3,053	2,749	2,667	3,110	3,506
	150	2,636	2,368	2,103	1,595	2,044	2,464
	240	1,541	1,254	0,946	0,000	0,540	0,984

Tabulka 28: Pokles/nárůst deformací vzorku 20/1 vzhledem k 30/1 v %

Rozdíl [%]		Poloha Y [mm]					
		-140	-100	-50	50	100	140
Poloha X [mm]	-240	74,40%	69,45%	-50,06%	0,00%	46,04%	57,38%
	-150	59,40%	50,42%	20,72%	8,74%	40,66%	50,07%
	-50	53,41%	45,19%	22,52%	19,79%	41,08%	48,58%
	50	51,27%	42,37%	19,88%	26,17%	43,95%	51,08%
	150	52,28%	40,89%	4,23%	33,61%	52,24%	57,96%
	240	57,40%	38,89%	-472,63%	100,00%	75,58%	74,42%

Teplotní cykly pro vzorek 20/2 jsou znázorněny v grafu č. 10.

Teplotní cykly 20/2



Graf 10: Teplotní cykly pro vzorek 20/2

Z hlediska účinnosti redukce deformací vedla kombinace všech opatření k nejpříznivějším výsledkům.

7. Závěr

Byl navržen a realizován experiment použitelný pro verifikaci numerických simulací, který zároveň ověřuje vliv jednotlivých opatření na velikost deformací po svařování. Numerické simulace v rámci DP realizovány nebyly, zejména z důvodu zdržení výběrového řízení na nákup simulačního SW, který byl pozdržen i vlivem situace v souvislosti s koronavirovou pandemií, zapříčiňující nemoc COVID-19.

Nicméně je možné na výsledky dosažené v rámci DP navázat dalším výzkumem, včetně realizace numerických simulací svařovacího procesu. Tato změna byla odsouhlasena s vedoucími DP. V rámci praktické části byl navržen experiment, pomocí kterého lze hodnotit vliv metod pro redukci makroskopických deformací na výslednou deformaci u vysokopevnostní oceli S960QL. Tento experiment zahrnuje robotické MAG svařování a vyhodnocení deformací na souřadnicovém měřicím stroji.

Cíle DP byly splněny:

- Byly navrženy optimalizace procesu pro omezení makroskopických deformací, které byly experimentálně vyhodnoceny
- Hodnoty makroskopických deformací byly měřeny na souřadnicovém stroji, získané hodnoty byly použity pro vyhodnocení účinnosti optimalizace procesu

Na základě získaných dat lze tvrdit, že

- Dle provedených experimentů bylo nejúčinnější redukovat deformace pomocí kombinace tří opatření, jednak upnutím vzorku upínkami, jednak zmenšením úhlu rozevření a změnou postupu svařování (svařování obousměrně). Deformace v bočních stranách vzorku tak byly sníženy až o 74 % a v rozích vzorku došlo k redukci deformací až o 53 % v porovnání s volně svařovaným vzorkem.
- Velmi účinným opatřením pro snížení deformací bylo také samotné upnutí vzorku pomocí 6 upínek a svěrek. Deformace byly v tomto případě sníženy asi o 30 %. V bočních stranách se deformace ve střední části vzorku snížily až o 3 mm a v rozích se deformace snížily vzorku až o 2 mm.
- Změna postupu svařování, tedy svařování obousměrné, nevedla k výraznému snížení deformací. Pouze v blízkosti svarového spoje došlo v několika málo bodech k redukci deformací, nicméně ve větší části materiálu se deformace mírně zvýšily.
- Dle experimentu bylo nejméně efektivním opatřením zmenšení úhlu rozevření. Deformace se zde nejvíce objevily v rozích vzorku, kdy došlo ke vzrůstu deformací až o 24 %. Mírněji se pak deformace zvýšily v bočních stranách vzorku. Tento výsledek je velmi překvapivý, vlivem přípravy svarových ploch bylo omezeno množství svarového kovu, avšak deformace vzrostly. Tento nárůst mohl být způsoben způsobem kladení housenek.

Seznam použité literatury

- [1] “Příručka svářeče.” [Online]. Available: <http://www.airproducts.cz>. [Accessed: 25-Sep-2019].
- [2] J. Kubíček, *Technologie svařování Studijní opory pro výuku v kurzech 5TE, ETV, ETV-K ÚST, odbor svařování a PÚ*. Ústav strojírenské technologie, 2005.
- [3] M. Hluchý, *Strojírenská technologie 2: Polotovary a jejich technologičnost*. Praha: Praha SNTL, 1979.
- [4] S. Novák and J. Mráček, “Svařování ocelí s vyšší pevností,” *První železářská společnost Kladno s.r.o.*, p. 4, 2009.
- [5] V. Minařík, *Obloukové svařování*. Praha: Scientia, spol s.r.o., pedagogické nakladatelství, 1998.
- [6] “Ženy jako pracovní síly v muničních továrnách za 2. světové války,” 2017. [Online]. Available: <http://blog.nyhistory.org/women-in-the-workforce-world-war-ii/>.
- [7] P. Országh and V. Országh, *Zváranie MIG/MAG ocelí a neželezných kovů*. Bratislava: Polygrafia SAV, 2000.
- [8] J. Tměj, H. Neumann, and S. Jenší, *Terie svařování*. Liberec: Vysoká škola strojní a textilní v Liberci, 1990.
- [9] P. Ondřejček, *Zváranie ocelí v ochrane plynov taviacou elektródou*. Bratislava: Eterna Press s.r.o., 2003.
- [10] J. Koukal, D. Schwarz, and J. Hajdík, *Materiály a jejich svařitelnost*. Ostrava: Technická univerzita, Vysoká škola báňská, 2009.
- [11] K. Němec, *Vliv vneseného tepla na vlastnosti a strukturu svarového spoje duplexní oceli*. Brno: VUT v Brně, 2010.
- [12] D. NARSTRÖM Torbjörn and B. HRNJEZ, *Welding handbook: a guide to better welding of Hardox and Weldox*. Oxelösund, 2010.
- [13] David Hrstka, *Vliv směsi plynu na efektivitu provedení svaru a stabilitu procesu MAG*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007.
- [14] Z. Guzman, “Druhy přenosu.” [Online]. Available: <https://www.aedmotorsport.com/welding-transfer-methods>. [Accessed: 01-Feb-2020].
- [15] “MIG/MAG.” [Online]. Available: <http://automig.cz/o-svarovani/metody/>. [Accessed: 06-Feb-2020].
- [16] R. Kovařík and F. Černý, *Technologie svařování*. Plzeň: ZČU v Plzni, 2000.
- [17] P. Herman, *Vlastnosti plněných elektrod pro svařování*. Wirpo s.r.o., 2005.
- [18] E. Samek and R. Strinka, *Zváranie v ochrannej atmosfére taviacou sa elektródou*. Bratislava: ALFA, SNTL, 1982.
- [19] Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation, “High Performance Steels For Bridge Construction,” 2015, p. 38.

- [20] “High Performance Steel And Its Application.” [Online]. Available: <https://www.ukessays.com/essays/engineering/high-performance-steel>. [Accessed: 15-Nov-2019].
- [21] “S690QL High Strength Quenched and Tempered Structural Steel,” 2019. [Online]. Available: <http://www.beverlysteel.com>. [Accessed: 09-Oct-2019].
- [22] “High strength steel plates.” [Online]. Available: <https://www.fascinationforsteel.com>.
- [23] J. Veverka, “Svařování vysokopevných jemnozrnných ocelí,” *OMNITECH spol. s r.o.*
- [24] J. Pavlíček, *Svařování speciálních ocelí HARDOX a WELDOX*. TIME, 2014.
- [25] P. Zuna, K. Macek, and J. Janovec, *Fyzikální metalurgie*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004.
- [26] J. Cejp, K. Macek, and G. Pluphrach, “Mechanické vlastnosti a velikost zrna mikrolegovaných litých ocelí,” *ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav Mater. inženýrství*, p. 9, 2005.
- [27] T. Rotter, “Ocel pro stavební ocelové konstrukce,” *TZBinfo*, 2016. [Online]. Available: <https://stavba.tzb-info.cz>. [Accessed: 09-Feb-2020].
- [28] “Abraservice dodavatel odolných dílů a kompletních řešení z otěruvzdorných a vysokopevnostních ocelí.” [Online]. Available: <https://www.abraservice.com>. [Accessed: 09-Feb-2020].
- [29] J. Zrník, L. Kraus, T. Prnka, and K. Šperlink, *Příprava ultrajemných a nanokrystalických kovových materiálů extrémní plastickou deformací a jejich vlastnosti*. Česká společnost pro nové materiály a technologie, 2007.
- [30] T. Ślęzak and Lucjan Śnieżek, “A Comparative LCF Study of S960QL High Strength Steel and S355J2 Mild Steel,” *Elsevier Ltd.*, 2015.
- [31] K. J. Kowalkowski and Amit H. Varma, *Effects of heat straightening on the microstructure and structural properties of bridge steel*. Ruby and Associates, P.C., 2006.
- [32] “feriticko perlitická struktura oceli ASTM A36,” 2019. [Online]. Available: <https://cz.pinterest.com/>. [Accessed: 18-Nov-2019].
- [33] K. Bláhová, “Orowanův mechanismus,” 2016. [Online]. Available: <https://docplayer.cz/Vlastnosti-a-zkouseni-materialu>. [Accessed: 15-Apr-2020].
- [34] J. L. Barrilao, “Cutting of a particle (Friedel effect).” [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/Orowan>.
- [35] S. Blacha, M. Weglowski, S. Dymek, and M. Kopuscianski, “Microstructural characterization and mechanical properties of electron beam welded joint of high strenght steel grade S690QL,” *PAN*, p. 61, 2016.
- [36] F. Schröter and R. Willms, “Welding and fatigue in high performance steel,” *AG der Dillinger Hüttenwerke*, p. 17.
- [37] V. Pilous, *Vysokopevné mikrolegované jemnozrnné oceli a jejich svařitelnost*.

Plzeň: Vodní stavby, a.s., 1999.

- [38] Z. Hudec, *Deformace a napětí při svařování*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 1998.
- [39] M. Musil, J. Moravec, and kolektiv autorů, *Výroba a aplikované inženýrství ve svařování*. Praha: Česká svářečská společnost ANB - CWS ANB, 2018.
- [40] H. Hänsch and J. Krebs, *Deformace a pnutí ve svařovaných konstrukcích*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1964.
- [41] P. Michaleris, *Minimization of welding distortion and buckling Modelling and implementation*. Philadelphia: Woodhead Publishing.
- [42] J. Jedlička and M. Hauner, *Svařování v otázkách a odpovědích*. Praha: SNTL, 1960.
- [43] J. Kučera, *Terie svařování*. Ostrava: VŠB Ostrava Technická univerzita, 1994.
- [44] F. Stroj, S. Stroj, F. S. I. Doc, and A. Hum, "MATERIÁLY PRO ŘEZNÉ NÁSTROJE," 2006.