

VLIV SVAŘOVÁNÍ NA DEFORMACI SVARKŮ

Rostislav Slováček

Bakalářská práce
2014



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Rostislav Slováček**
Osobní číslo: **T11323**
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Vliv svařování na deformaci svarů**

Zásady pro vypracování:

1. Obecný popis svařování
2. Metody svařování
3. Základní materiál
4. Přídavný materiál
5. Deformace ZM vlivem svařování
6. Vady svarů
7. Nedestruktivní zkoušky svarů

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího práce

Vedoucí bakalářské práce:

prof. Ing. Ivan Letko, CSc.
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

10. února 2014

Termín odevzdání bakalářské práce:

23. května 2014

Ve Zlíně dne 10. února 2014


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




prof. Ing. Běrenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60³⁾ odst. 2 a 3 mohu užit své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považuji se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhajení práce.

Ve Zlíně 20.5.2014



¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacího zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá základní problematikou svařování a popisuje jeho vliv na výslednou deformaci svarového spoje. Jasně popisuje základní pravidla pro úspěšné provedení svaru a specifikuje problémy, kterým je třeba přikládat význam. Z pohledu finálního výrobku se zaměřuje především na deformace svařence a jejich výpočtu. Cílem práce je položit základ pro další výzkum deformací vlivem svařování a to tak, aby na něj bylo možno plynule navázat a téma patřičně rozvinout v diplomové práci.

Klíčová slova: Svařování, svár, svarek, svařitelnost, základní materiál, přídatný materiál, deformace.

ABSTRACT

This thesis deals with the fundamentals of welding and describes its impact on the resulting deformation of the welded joint. Clearly describes the basic rules for successful pro-seam and specifies the problems that need to attach any significance. From the perspective of the final product focuses mainly on welding and deformation of the calculation. The aim is to lay the foundation for further research and deformations due to welding so that it was possible to establish a smoothly no topic adequately developed in the thesis.

Keywords: welding, weld, weldment, weldability, basic material, filler material, deformation.

Poděkování

Tímto chci poděkovat prof. Ing. Ivanu Letkovi, C.Sc. za cenné rady a konzultace spojené s touto prací.

Prohlašuji, že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval.
V případě publikace výsledků, je-li to uvedeno na základě licenční smlouvy, budu uveden jako spoluautor.

Ve Zlíně



Podpis studenta

OBSAH

ÚVOD.....	10
I TEORETICKÁ ČÁST.....	11
1 OBECNÝ POPIS SVAŘOVÁNÍ.....	12
1.1 DEFINICE A CHARAKTERISTIKA SVAROVÉHO SPOJE	12
1.1.1 Vznik svarového spoje	12
1.1.2 Druhy svarů	13
1.1.3 Příprava svarových ploch	15
2 METODY SVAŘOVÁNÍ.....	17
2.1 TAVNÉ SVAŘOVÁNÍ	17
2.1.1 Metody tavného svařování	17
2.2 TLAKOVÉ SVAŘOVÁNÍ.....	18
2.2.1 Metody tlakového svařování	18
3 ZÁKLADNÍ MATERIÁL	20
3.1 SVAŘITELNOST OCELÍ A LITIN.....	20
3.1.1 Nelegované oceli	22
3.1.2 Legované oceli	23
3.1.3 Litina	24
3.2 SVAŘITELNOST HLINÍKU A JEHO SLITIN	24
3.3 SVAŘITELNOST MĚDI A JEJICH SLITIN	24
4 PŘÍDAVNÝ MATERIÁL.....	25
4.1 OBALENÉ ELEKTRODY	25
4.2 DRÁTY A TYČINKY	25
4.2.1 Pro svařování v ochranných atmosférách	25
4.2.2 Pro svařování plamenem	26
4.2.3 Pro svařování pod tavidlem.....	26
5 VOLBA METODY SVAŘOVÁNÍ.....	27
5.1 EKONOMICKÉ ASPEKTY	27
5.2 TECHNICKÉ ASPEKTY	27
6 DOPROVODNÉ PROCESY SVAŘOVÁNÍ.....	29
6.1 VLIV TLOUŠTKY ZM	29
6.2 UHLÍKOVÝ EKVIVALENT.....	29
6.3 PŘEDEHŘEV A TEPELNÝ DOPROVOD	30
6.4 INTERPASS TEPLOTA	30
6.5 ŽÍHÁNÍ SVAROVÉHO SPOJE [PWHT].....	31
7 DEFORMACE VLIVEM SVAŘOVÁNÍ.....	32
7.1 DRUHY DEFORMACÍ.....	34
7.2 ELIMINACE VZNIKU DEFORMACÍ.....	36
7.2.1 Přípravky	37
7.2.2 Stehování.....	38

8	VADY SVARŮ	39
8.1	VNITŘNÍ VADY	39
8.2	POVRCHOVÉ VADY	39
9	NEDESTRUKTIVNÍ ZKOUŠKY SVARŮ	40
II PRAKTICKÁ ČÁST		41
10	DEFORMACE SVARKU	42
10.1	OPTIMALIZACE ROZMĚRŮ.....	43
10.2	VÝPOČET DEFORMACÍ	44
10.2.1	Příčné smrštění	44
10.2.2	Podélné smrštění	45
10.2.3	Úhlová deformace	45
11	KOMPLEXNÍ VYHODNOCENÍ DEFORMACÍ SVARKU	47
	ZÁVĚR	48
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	49
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	50
	SEZNAM OBRÁZKŮ	51
	SEZNAM TABULEK	52
	SEZNAM PŘÍLOH	53

ÚVOD

Pro svoji bakalářskou práci jsem si zvolil téma: Vliv svařování na deformace svarového spoje. Již samotný název napovídá, že se jedná o propojení a využití velkého množství vědních oborů. Zejména pak strojních, elektrotechnických, fyzikálních, chemických a v neposlední řadě také ekonomických disciplín. Z výše popsanych důvodů je zřejmé, že každá společnost, která má ve svém výrobním programu svařování zařazeno, by měla této problematice přikládat zvláštní význam.

Problematikou svařování se jako svařovací technolog úzce zabývám i v praxi, proto mě možnost vypracování práce na toto téma velmi potěšila a rád si shromáždím nové informace, které s tématem souvisí a budou pro mě mít i praktické využití.

Zpracování tohoto tématu považuji za velmi důležité a aktuální pro dnešní uspěchanou dobu, jež je plná změn a nerovného boje. Etické kodexy obchodování se vytrácejí a jediné, co mnoha společnostem k udržení jejich pozice na trhu zbývá, je výborně zvládnutá technologie výroby za neustálého sledování nových trendů ve výzkumu a vývoji. Má práce může být inspirací nejen pro další studenty naší fakulty, ale také pro technology, podnikatele, nebo vedoucí pracovníky obchodních společností.

Cílem mé práce je přehledně zpracovat základní problematiku svařování a jeho vliv na výslednou deformaci svarového spoje. Postupně se budu věnovat popisu svařování, jako jedné z klíčových oblastí strojírenského průmyslu. Z pohledu finálního výrobku se zaměřím na vady svarů, tepelně ovlivněné oblasti a deformace svařence.

Práci jsem rozdělil do několika kapitol, které dle logického a systematického sledu, považuji za nutné a poslouží k lepšímu přehledu mé práce. Některé části práce nebudou přímo souviset s tématem, ale považuji za důležité se o nich zmínit – např. ekonomické aspekty svařování.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 OBECNÝ POPIS SVAŘOVÁNÍ

Svařováním rozumíme vytvoření nerozebíratelného spoje dvou či více kovových součástí za přispění tepla vytvořeného pomocí tepelné, mechanické, či radiační energie, nebo jejich kombinací. K vytvoření svarových spojů bývá obvykle, nikoliv bezpodmínečně, využíváno přídavných svařovacích materiálů.

1.1 Definice a charakteristika svarového spoje

Pevné látky mohou mít různé typy vazeb, které odpovídají daným typům rozložení elektronů a iontů. Ionty jsou v atomu uspořádány tak, aby potenciální energie krystalu byla co nejmenší. Základem vazeb jsou pak mraky valenčních elektronů, jež mohou volně přecházet od atomu k atomu. Kovová vazba následně vzniká za předpokladu, že přitažlivé síly mezi kovovými ionty a elektronovým mrakem převyšují odpudivé síly elektronů v tomto mraku. Ionty jsou uspořádány podle přesně definovaných rozložení, podle kterých v pevných látkách existují mezi ionty přitažlivé a odpudivé síly.

Pokud bychom byli schopni realizovat přesnost obrábění respektive přípravy povrchu s přesností 5×10^{-8} cm, to by díky působení meziatomových vazeb velmi pravděpodobně umožnilo spojení kovových součástí pouhým přiložením k sobě a svařování by pak postupně pozbylo svého klíčového významu. V současné době lze docílit opracování povrchu o maximální přesnosti 10^{-6} cm, které umožní pouze vytváření vazeb v jednotlivých bodech, nikoliv však vytvoření dokonalého spoje. Svařování proto bude ještě velmi dlouhou dobu patřit ke klíčovým způsobům vytváření důležitých a pevných nerozebíratelných spojů. [1]

1.1.1 Vznik svarového spoje

Všechny konvenční metody svařování lze rozdělit na tavné a tlakové svařování.

U tavného svařování je vytvoření spoje dosaženo přívodem tepelné energie do oblasti svaru, přičemž dochází k natavení základního, případně i přídavného materiálu.

Tlakové metody svařování jsou založeny na působení mechanické energie.

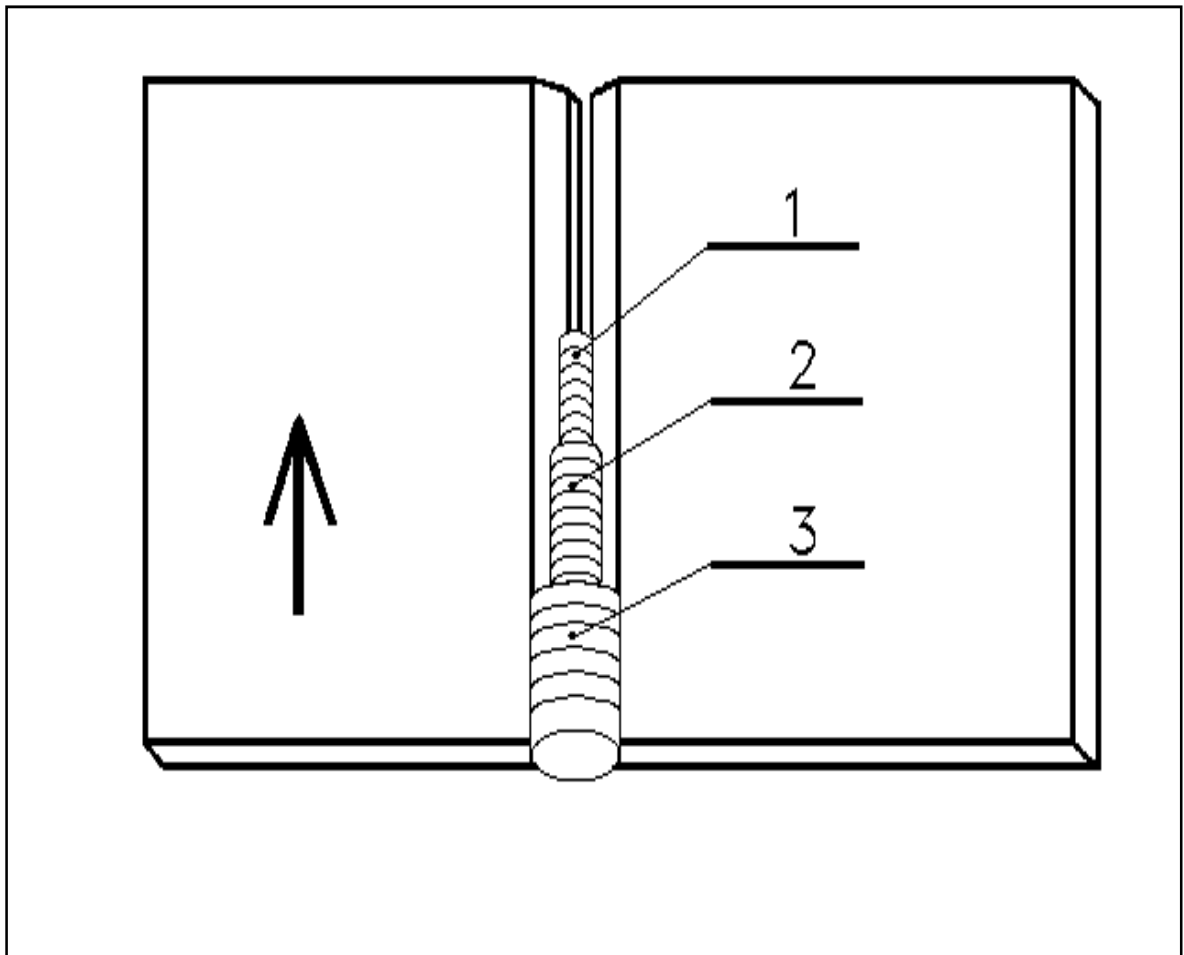
U obou způsobů svařování je třeba překonat energetickou hladinu potenciální energie na rozhraní spojovaných ploch.

1.1.2 Druhy svarů

S ohledem na konstrukci výrobku, či svařované konstrukce je nutné vhodně volit druh svařového spoje, který bude nejlépe odpovídat jeho následnému zatížení a využití.

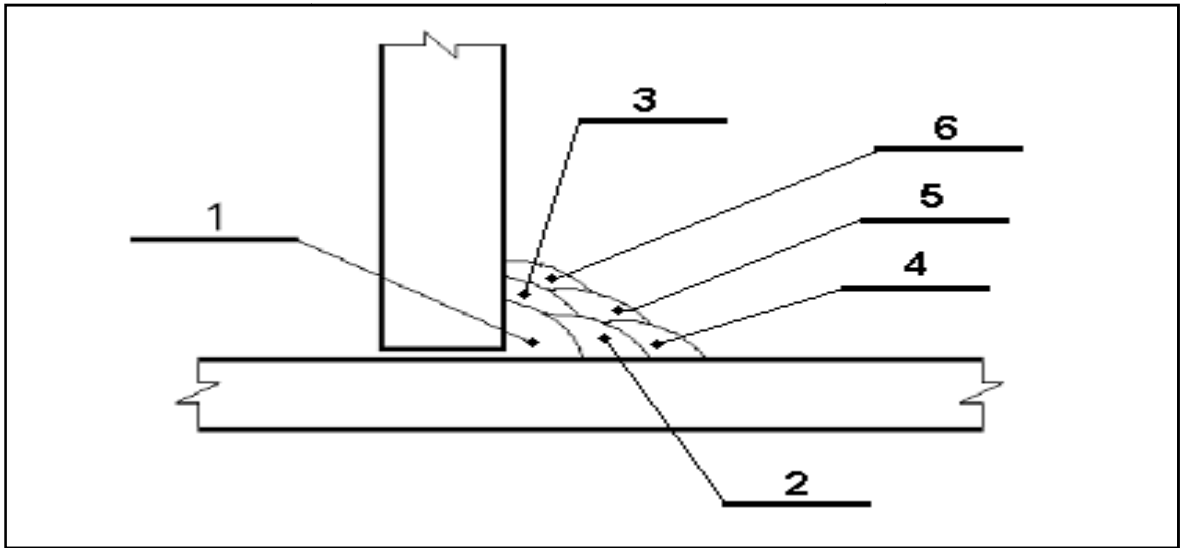
K nejrozšířenějšímu a nejpraktičtějšímu rozdělení druhů svarů patří rozdělení podle tvaru svařového spoje. Takto se svary dělí na **tupé** a **koutové**. Dále se pak mohou dělit na bodové, děrové, nebo žlábkové svary, případně na přelátované spoje.

Tupé svary jsou z pevnostního hlediska obvykle nejvhodnějšími druhy svařových spojů a to především pro dynamicky namáhané konstrukce.



Obrázek 1: Příklad tupého svaru v poloze PF. 1- kořenová vrstva, 2- mezivrstva, 3- horní (krycí) vrstva

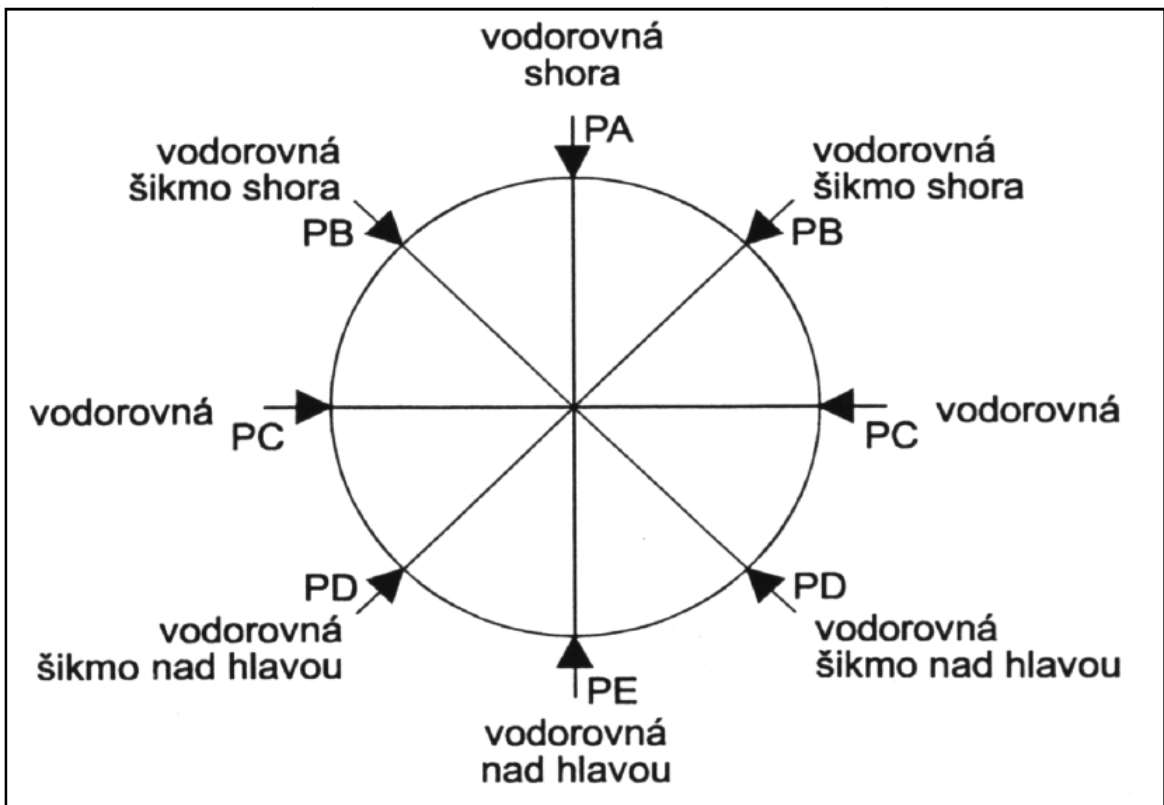
Koutové svary nejsou z pevnostního hlediska tak únosné, jako svary tupé. Z hlediska ekonomického jsou díky menší náročnosti na přípravu výhodnější.



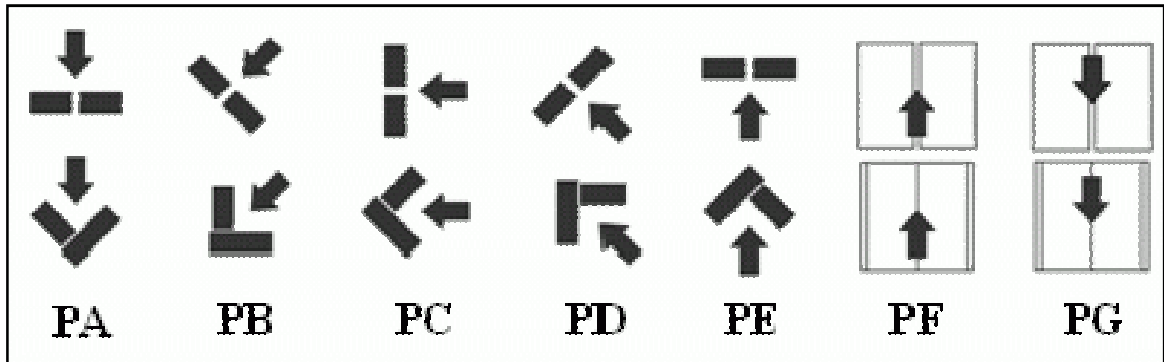
Obrázek 2: Koutový svar, poloha PB- postup kladení jednotlivých vrstev

Samozřejmě, že svary lze dále rozdělovat podle celé řady jejich vlastností, tvarů, využití, umístění atd. Například podle účelu na svary těsnící, spínací, či nosné.

Z hlediska praktického využití považuji za důležité zmínit se podrobněji pouze o rozdělení svarů **podle polohy svařování**.



Obrázek 3: Polohy svařování dle ČSN EN ISO 6947

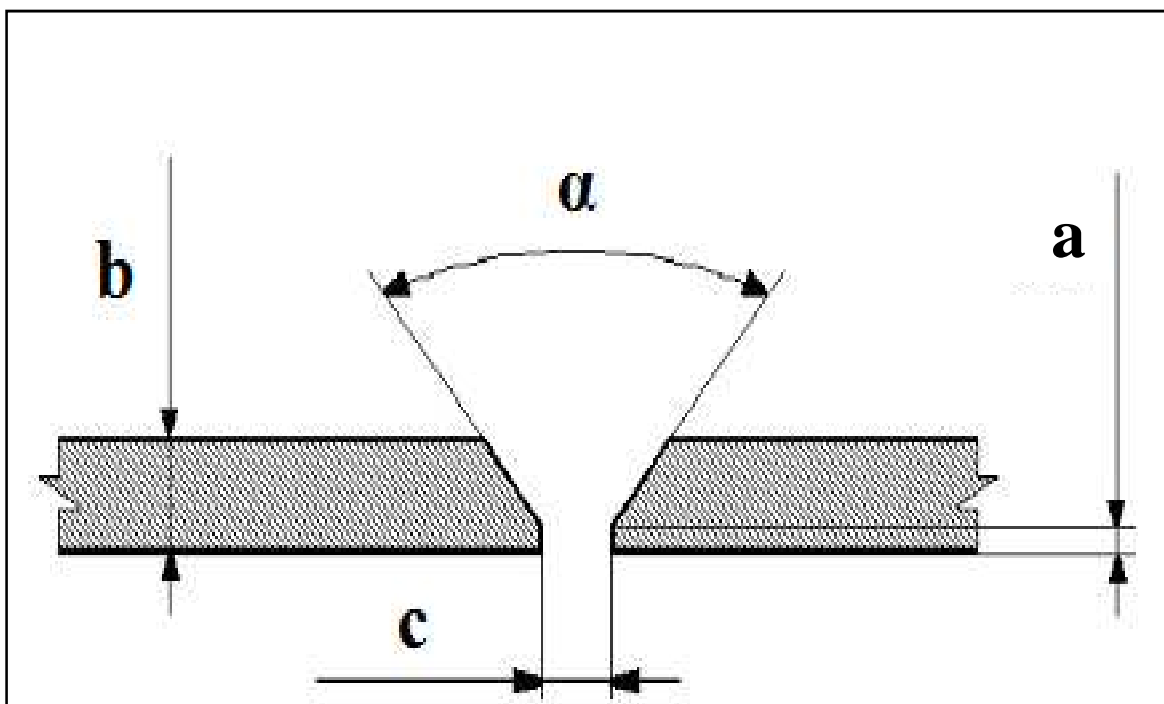


Obrázek 4: Polohy svařování- schematické znázornění

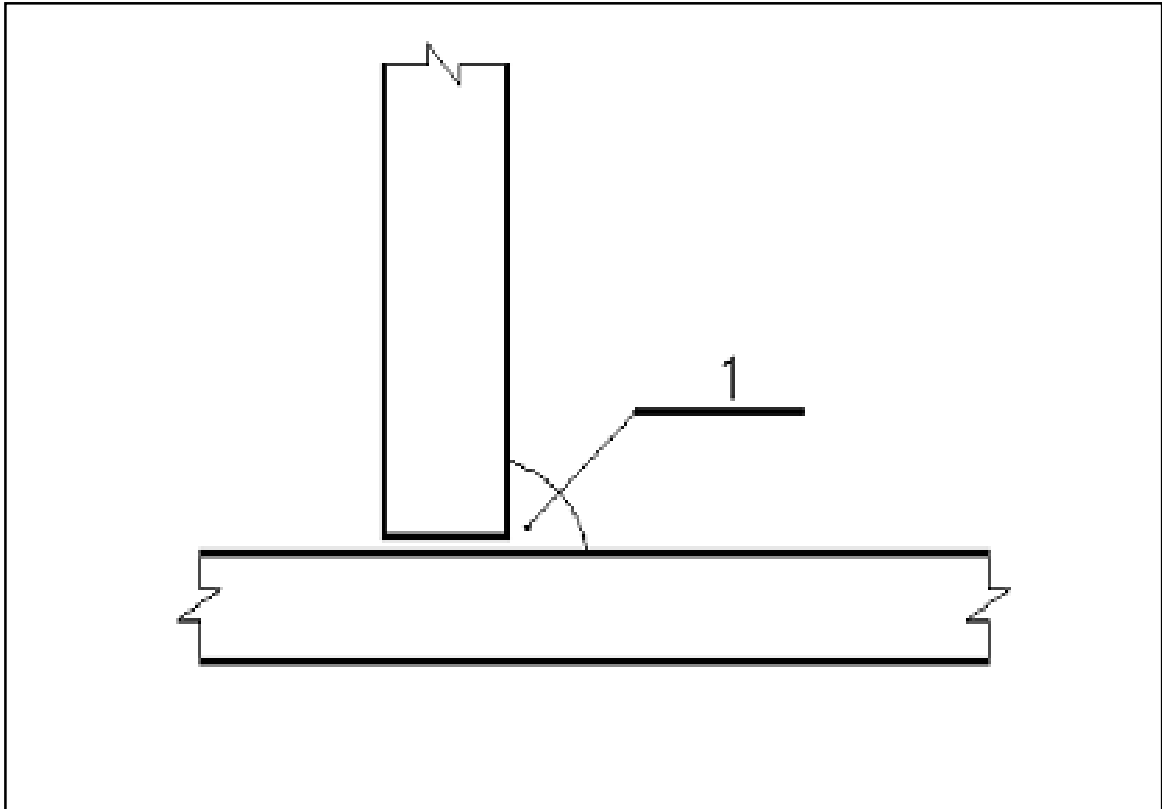
1.1.3 Příprava svarových ploch

Optimální přípravu svarových ploch volíme v souladu s ČSN EN ISO 9692 v platném znění, zejména s přihlédnutím k druhu a rozměrům základního materiálu, poloze a způsobu svařování.

Je důležité, aby před a během přípravy základní materiál nebyl vystavován tepelným šokům a náhlým změnám teplot. Dále je pak třeba věnovat zvláštní význam dodržení mezery mezi dvěma základními materiály (c), otupení (a), a úhlu svarové plochy ($^{\circ}\alpha$).

Obrázek 5: Příprava ploch tupého svaru: b- tloušťka základního materiálu, a- otupení, c- mezera, $^{\circ}\alpha$ - úhel svarové plochy

Svarové plochy koutových svarových spojů se přikládají kolmo k sobě a mimo čištění a odmaštění se až na výjimky nijak zvláště neupravují.



Obrázek 6: Jednovrstvý koutový svar- poloha PB

2 METODY SVAŘOVÁNÍ

Jak již bylo v kapitole 1.1.1 uvedeno, všechny konvenční metody svařování lze rozdělit na tavné a tlakové svařování. Z tohoto hlediska je pro svou přehlednost a srozumitelnost takové rozdělení nejpraktičtější a nejčastěji užívané.

2.1 Tavné svařování

Při tavném svařování vzniká svarový spoj pomocí přívodu tepelné energie do oblasti svaru, kde dochází k natavení základního, případně i přídavného materiálu. Tekutá fáze je vázána na povrch fáze tuhé adhezními silami a při tuhnutí taveniny se malé adhezní síly mění na chemickou vazbu ve formě krystalové mřížky. Dochází k růstu nových zrn a původní rozhraní zaniká.

2.1.1 Metody tavného svařování

Tabulka 1: Metody tavného svařování

P.Č.	Popis metody	Číselné označení
1.	Svařování elektrickým obloukem	1
1.1	Obloukové svařování tavící se elektrodou	101
1.2	Ruční obloukové svařování obalenou elektrodou	111
1.3	Gravitační obloukové svařování obalenou elektrodou	112
1.4	Obloukové svařování plněnou elektrodou bez ochranného plynu	114
1.5	Pod tavidlem	12
1.6	Obloukové svařování v ochranné atmosféře	13
1.7	Obloukové svařování tavící se elektrodou v inertním plynu- MIG	131
1.8	Obloukové svařování tavící se elektrodou v aktivním plynu- MAG	135
1.9	Obloukové svařování plněnou elektrodou v aktivním plynu	136
1.10	Obloukové svařování plněnou elektrodou v inertním plynu	137
1.11	Obloukové svařování tavící se elektrodou v inertním plynu- TIG	141
2.	Elektrostruskové svařování	72
3.	Svařování plazmové	15

4.	Svařování plazmové MIG svařování	151
5.	Svařování magneticky ovládaným obloukem	185
6.	Svařování proudem elektronů	---
7.	Plamenové svařování	3
7.1	Kyslíko-acetylenové svařování	311
7.2	Kyslíko-vodíkové svařování	313
8.	Svařování slévárenské	---
9.	Svařování tepelným zářením	75
10.	Laserové svařování	751
11.	Aluminotermické svařování	71
12.	Elektroplynové svařování	73
13	Indukční svařování	74

2.2 Tlakové svařování

Metody tlakového svařování jsou založeny na působení mechanické práce, která vytváří energii. Aktivací povrchových atomů a makro nebo mikrodeformací se přiblíží spojované povrchy na vzdálenost působení meziatomových sil, přičemž vznikne vlastní spoj. U obou způsobů svařování je třeba překonat energetickou hladinu potenciální energie na rozhraní spojovaných ploch.

2.2.1 Metody tlakového svařování

Tabulka 2: Metody tlakového svařování

P.Č.	Popis metody	Číselné označení
1.	Tlakové svařování za studena	48
2.	Odporové svařování	2
2.1.1	Stykové- stlačovací stykové svařování	25
2.1.2	Stykové- odtavovací stykové svařování	24
2.2.1	Přeplátování- bodové odporové svařování	21

2.2.2	Přeplátováním- švové odporové svařování	22
2.2.3	Přeplátováním- rozválcovací švové svařování	222
2.2.4	Přeplátováním- výstupkové	23
2.2.4	Přeplátováním- vysokofrekvenční odporové svařování	291
3.	Svařování indukční	74
4.1	Svařování v ohni- kovářské svařování	43
4.2	Svařování v ohni- tlakové svařování s plamenovým ohřevem	47
5.	Třecí svařování	42
6.	Ultrazvukové svařování	41
7.	Výbuchové svařování	44

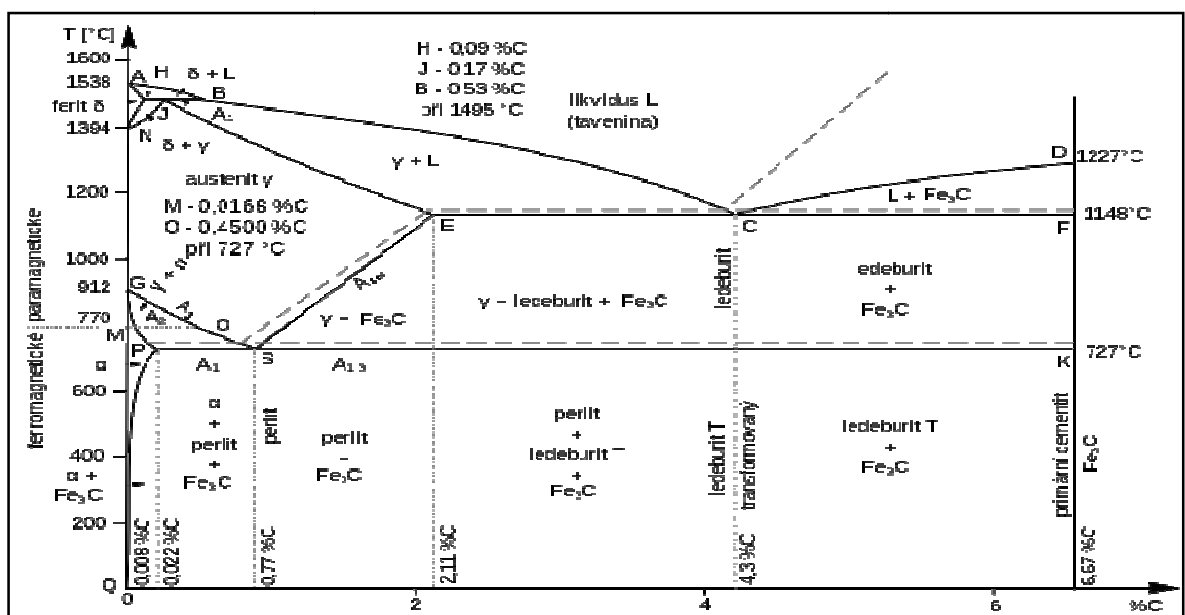
3 ZÁKLADNÍ MATERIÁL

Základní materiál pro výrobek (svařenec) obvykle volí konstruktér, dle požadavků na jeho užité vlastnosti, s ohledem na cenu, ekonomickou návratnost, životnost atd. V praxi pak velmi často nastávají situace, kdy konstruktér nemůže předem vědět, kdo bude výrobcem, a tudíž nemá možnost případné konzultace s nákupčími, technology, kontrolory a dalšími profesemi, které budou výrobního procesu účastny. Z výše popsaných příčin pak nemůže znát ani dostupnost jím zvoleného materiálu, výrobní možnosti a přesné parametry strojního vybavení výrobce apod.

Tímto vznikají situace, kdy je nutné problematice základního materiálu přikládat zvláštní význam, protože jedině za předpokladu znalosti chemického složení, vnitřního uspořádání, způsobu předchozího zpracování, jeho mechanických vlastností, tloušťce a dalším případným vlastnostem lze zodpovědně zvolit další postup a správně určit optimální metodu svařování, parametry svařování, druh a průměr přídatného materiálu, nebo další procesy nezbytné k úspěšnému dokončení díla.

3.1 Svařitelnost ocelí a litin

Obecně lze konstatovat, že na svařitelnost ocelí a litin má zásadní vliv především **obsah uhlíku** v jejich slitinách. Bez zvláštních technologických opatření lze svařovat oceli, u kterých je obsah $C \leq 0,22$ hm. %, tloušťka základního materiálu ≤ 25 mm a uhlíkový ekvivalent $C_e \leq 0,45$ %.



Obrázek 7: Diagram Fe- Fe₃C

Pokud nastane situace, kdy není splněna byť i jediná z výše uvedených podmínek, je nutné zavést zvláštní opatření, která dokážou zpomalit rychlost ochlazování v tepelně ovlivněné oblasti svaru. Těmto opatřením a uhlíkovému ekvivalentu, se budu v dalších kapitolách věnovat podrobněji.

Na svařitelnost ocelí mají samozřejmě vliv i další prvky, které se ve slitině vyskytují:

Křemík: V nelegovaných uhlíkových ocelích zvyšuje pevnost feritu. Působí desoxidačně. Pokud jeho množství klesne pod 0,1 hm.%, ocel je neuklidněná.

Síra: Způsobuje náchylnost materiálu ke vzniku teplých trhlin. Při vyšším obsahu síry příznivě působí přítomnost manganu, protože síra k němu má vyšší afinitu, než k železu. Obsah síry v nelegovaných ocelích by neměl přesahovat 0,03 hm.%.

Fosfor: Zvyšuje mez kluzu a také mez pevnosti. Ve spojení s mědí zvyšuje odolnost proti atmosférické korozi. Způsobuje zkřehnutí za studena.

Dusík: Ve slitinách železa se vyskytuje vždy a jeho množství se odvíjí od technologie výroby. Jedná se o austenitotvorný prvek, proto způsobuje rozšíření pole γ . Vliv nitridů zvyšuje mez pevnosti, mez kluzu a tvrdost, výměnou za snížení plastických vlastností, jako je tažnost a vrubová houževnatost.

Vodík: Je nežádoucí příměsí, která do slitin železa vniká rozkladem vzdušné vlhkosti a při svařování má za následek vznik pórů, oduhličení svarového kovu a často způsobuje trhliny. Proto je třeba zajistit opatření, která vedou k jeho eliminaci. Zejména odstranění vlhkosti na povrchu materiálu, sušení přídavného materiálu apod.

Hliník: Působí desoxidačně a denitridačně. Jeho oxidy a nitridy působí jako krystalizační zárodky během tuhnutí. Silně uklidněné oceli mají obsah Al $\geq 0,02$ hm.%.

Mangan: Je velmi žádoucí legující prvek, který zvyšuje mez kluzu a mez pevnosti, přičemž nesnižuje tažnost ani vrubovou houževnatost. Působí také jako desoxidační činidlo. Společně s křemíkem se používá k výrobě uklidněných ocelí.

Měď: Dostává se do slitin používáním šrotu s její příměsí. Obsah Cu $\leq 0,26$ hm.% se považuje za neškodný. Při obsahu $0,15 < \text{Cu} < 0,50$ hm.% vytváří nepropustnou oxidickou vrstvičku, čímž snižuje rychlost koroze.

3.1.1 Nelegované oceli

Jedná se o oceli, které nepřesahují určitý obsah daných legujících prvků, který je uveden následující v tabulce. [2]

Tabulka 3: Mezní obsahy legovacích prvků pro rozdělení ocelí na nelegované a legované. [2]

Chemická značka	Název prvku	Obsah v hm. %	Chemická značka	Název prvku	Obsah v hm. %
Al	Hliník	0,10	Ni	Nikl	0,30
B	Bór	0,0008	Pb	Olovo	0,40
Bi	Bizmut	0,10	Se	Selen	0,10
Co	Kobalt	0,10	Si	Křemík	0,50
Cr	Chrom ¹⁾	0,30	Te	Telur	0,10
Cu	Měď ¹⁾	0,40	Ti	Titan ²⁾	0,05
La	Lanthanidy (hodnoceno jednotlivě)	0,05	V	Vanad ²⁾	0,10
Mn	Mangan	1,65	W	Wolfram	0,10
Mo	Molybden	0,08	Zr	Zirkon ²⁾	0,05
Nb	Niob	0,06	--	Ostatní (mimo C,P,S,N) vždy	0,05
¹⁾ Pokud jsou pro oceli předepsány 2, 3, nebo 4 prvky označené touto poznámkou a jejich určující obsahy jsou menší než uvedené v tabulce, pak je pro rozdělení nutno vzít v úvahu dodatečně mezní obsah, který činí 70% součtu mezních obsahů těchto prvků.					
²⁾ Pravidlo uvedené v poznámce 1 platí odpovídajícím způsobem také pro prvky označené poznámkou 2					
Pokud je pro obsah Mn udána pouze nejvyšší hodnota, platí jako mezní obsah 1,80 hm. %					

Norma ČSN EN 10020 rozděluje nelegované oceli do tří hlavních skupin:

Nelegované oceli obvyklých jakostí:

- Tyto oceli musí splňovat pouze základní požadavky a dodací podmínky dle EN 10002.
- Další zvláštní kvalitativní charakteristiky (jako např. způsobilost k hlubokému tažení, profilování za studena, apod.) u nich nejsou předepsány.
- Nejsou určeny pro tepelné zpracování (vyjma žíhání k odstranění napětí, žíhání na měkko, nebo normalizační žíhání).
- Vyjma křemíku a manganu u nich nejsou předepsány žádné další obsahy legovacích prvků. [2]

Nelegované jakostní oceli:

Do této skupiny spadají veškeré nelegované oceli, které nejsou zahrnuty mezi nelegované oceli obvyklých jakostí, ani mezi nelegované ušlechtilé oceli. Oproti ocelím obvyklých jakostí jsou na ně kladeny vyšší nároky při namáhání, kterému jsou vystaveny. [2]

Nelegované ušlechtilé oceli:

Na rozdíl od ocelí jakostních vykazují vyšší stupeň čistoty, obzvláště co se nekovových vměstků týče. Většinou jsou určeny pro zušlechťování, nebo povrchové kalení a vyznačují se rovnoměrnější reakcí na toto zpracování. Mají přesně stanovené chemické složení a často také zvláštní výrobní podmínky. [2]

3.1.2 Legované oceli

Legované oceli se dělí do dvou hlavních skupin:

Legované jakostní oceli:

Jsou určeny k obdobnému využití jako nelegované jakostní oceli a do této skupiny patří:

- Svařitelné jemnozrnné oceli pro ocelové konstrukce, tlakové nádoby a potrubí. U těchto ocelí je předepsaná hodnota $R_e \leq 380$ MPa při tloušťkách ≤ 16 mm.
- Oceli legované křemíkem, případně křemíkem a hliníkem se zvláštními požadavky na magnetické a elektrické vlastnosti.
- Oceli určené pro výrobu kolejnic, štetovnic a důlních výztuží.
- Oceli pro ploché válcované výrobky, určené pro náročnější tváření.
- Oceli legované pouze mědí.

Legované ušlechtilé oceli:

Jsou oceli, u nichž je dosahováno požadovaných zpracovacích a užitných vlastností přesným stanovením chemického složení a zvláštními podmínkami výroby a zkoušení. Podle určujících prvků se dělí na:

- Nerezavějící oceli s obsahem $C \leq 1,2$ % a obsahem $Cr \geq 10,5$ %.
- Rychlořezné oceli s obsahem $C \geq 0,6$ % a obsahem Cr 3 až 6 %, které dále obsahují ještě minimálně dva z prvků Mo, W, nebo V s celkovým obsahem ≥ 7 %.
- Ostatní legované ušlechtilé oceli. [2]

3.1.3 Litina

Díky vysokému obsahu $C \geq 2$ hm.%, což je hodnota, která silně převyšuje mezní hodnotu jeho rozpustnosti v austenitu, lze svařovat jen obtížně. Za dodržení ověřených postupů, zásad a použití přídatných materiálů, které se svým složením (silně legované Ni, nebo Cu) velmi liší od základního materiálu, můžeme sice vytvořit dobré svarové spoje, ale o svařování litin je lépe hovořit pouze v souvislosti s opravami apod.

3.2 Svařitelnost hliníku a jeho slitin

Teplota tání hliníku je $658\text{ }^{\circ}\text{C}$. Díky své hustotě $2\,700\text{ Kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a vysoké odolnosti proti korozi patří mezi žádané konstrukční materiály. Jeho pevnost v tahu je 70 MPa a lze ji zvýšit pomocí legujících prvků, nebo deformací za studena. Pevnost legovaného hliníku lze dále zvyšovat tepelným zpracováním.

Hliník a jeho slitiny lze svařovat plamenem, obloukovým svařováním, elektrickým odporem, laserem, plazmou, ultrazvukem, difúzně, paprskem elektronů, výbuchem, nebo tlakem za studena. Za předpokladu, že se hliník svařuje metodou 141 s použitím pulzního proudu, který narušuje oxidický film tvořený Al_2O_3 na povrchu hliníku, je jeho svařitelnost velmi dobrá. V ostatních případech je většinou nutné použití vhodných tavidel.

3.3 Svařitelnost mědi a jejích slitin

Měď má teplotu tání $1083\text{ }^{\circ}\text{C}$. Její hustota je $9\,800\text{ Kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Mechanické vlastnosti jsou závislé na způsobu jejího zpracování. Litá má pevnost okolo 160 MPa , válcovaná za tepla pak kolem 210 MPa . Deformací za studena u ní lze dosáhnout pevností blízcích se pevnostem měkkých ocelí. Je odolná vůči korozi, ale reaguje se sírou.

Při svařování Cu je obvykle nutné používat přehřev, volit tupé nebo lemové svary a zajistit velmi pomalé chladnutí svarku. Měď lze svařovat téměř všemi metodami tavného svařování. V praxi se nejčastěji využívá metod 311, 141, nebo 131.

4 PŘÍDAVNÝ MATERIÁL

Úkolem přídatného materiálu je doplnit objem svarového kovu a vytvořit svar požadovaného objemu, tvaru a vlastností. Významnou funkcí přídatného materiálu je legování svarového kovu vhodnými přísadami, které příznivě ovlivňují metalurgické děje, operativnost svařování a zlepšují výsledné vlastnosti svaru.

Hlavním kritériem pro volbu vhodného přídatného materiálu je kvalita svarového kovu, která musí být ekvivalentní, nebo vyšší než kvalita základního materiálu. Další faktory ovlivňující volbu přídatného materiálu jsou tloušťka svařovaného materiálu, typ svarového spoje a poloha svařování.

4.1 Obalené elektrody

Obalené elektrody jsou využívány pro Ruční obloukové svařování obalenou elektrodou (metoda 111). Jsou tvořeny jádrem a obalem. Jádro tvoří drát, vyráběný v průměrech od 1,6 mm do 6 mm. Obal při hoření elektrody vytváří ochrannou atmosféru z kouře a plynů, která brání přístupu kyslíku a dusíku ke svarové lázni. Metalurgická funkce obalu (rafinace, desoxidace, legování) příznivě ovlivňuje svařování snížením obsahu P, S, O₂ a dodává žádoucí legující prvky. Mezi hlavní druhy obalů elektrod podle složení patří rutilový, kyselý, bazický a rutil-bazický.

4.2 Dráty a tyčinky

4.2.1 Pro svařování v ochranných atmosférách

Dráty pro svařování metodou TIG (141) se obvykle vyrábí v délkách 1 metr a jsou baleny a dodávány v krabicích nebo tubusech, které je částečně chrání proti vlhkosti a dalším nežádoucím vlivům.

Dráty pro svařování metodami MIG, MAG (131, 135) jsou běžným, nebo přesným způsobem vinuty na cívky typů S 200, B 300, nebo BS 300. Pro mechanizovaná a robotizovaná pracoviště jsou využívána velkokapacitní balení o hmotnostech až do 500 Kg.

4.2.2 Pro svařování plamenem

Svařování plamenem již pomalu ustupuje do pozadí a je využíváno především pro opravy, renovace a údržbářské práce. Dráty pro plamenné svařování se vyrábí v délkách 1 metr a obvykle bývají poměděny. Vzhledem k ústupu této metody není rozsah nabídky tak široký, jako u jiných metod.

4.2.3 Pro svařování pod tavidlem

Tavidla mají podobnou funkci jako obaly elektrod pro ruční obloukové svařování obalenou elektrodou (metoda 111). Technologie svařování pod tavidlem umožňuje použití vysokých proudových zatížení a vysokých rychlostí svařování při zachování vysoké kvality svarového spoje. Tavidla se dělí na Tavená tavidla a Aglomerovaná tavidla. Operativní vlastnosti tavidel ovlivňuje zejména jejich zrnitost. Vhodnou kombinací drátu a tavidla lze dosáhnout optimálních vlastností svarového kovu, které je třeba odvodit z požadavků na mechanické vlastnosti spoje.

5 VOLBA METODY SVAŘOVÁNÍ

Zvolit optimální metodu svařování pro daný výrobek (svařenec) je soubor úvah, výpočtů, testování a zkoušek, které vedou k určení nejvhodnější metody.

Pokud by se, při stejných zadávacích podmínkách, na určení optimální volby metody svařování podílelo více technologů, měli by všichni dojít ke stejnému, respektive velice podobnému závěru.

5.1 Ekonomické aspekty

Z ekonomického hlediska je třeba brát zřetel na parametry základního materiálu. Dále pak zejména na plánovaný počet vyrobených kusů a časový horizont, po který má být výrobek produkován. Do úvahy je třeba vzít také počáteční investice, náklady na provoz atd.

Jeli to v možnostech výrobce, je důležité už v návrhu uvažovat s takovými výrobními technologiemi a postupy, které jsou i při dosažení požadované kvality výrobku nejefektivnější a nejlevnější na výrobu.

Snížení svářečské pracnosti, které se významnou měrou podílí na celkové ceně lze docílit pomocí vhodného konstrukčního řešení, které vede k optimalizaci tvaru výrobku, minimalizaci počtu dílů sestavy a jejich unifikací. Dále pak zmenšením celkového počtu svarů a zmenšením celkové délky svarů s maximálním prodloužením délky jednoho svarového spoje. Celkovým snížením objemu svarového kovu na výrobek. Orientací svarů v jednom směru, rozložením v jedné rovině a jejich dobré přístupnosti.

5.2 Technické aspekty

Z technického a technologického hlediska je třeba zamýšlet se nad vlastnostmi základního materiálu, jakými jsou chemické složení, fyzikální a mechanické vlastnosti apod. Protože tyto nám v konečném důsledku rozhodují o výsledné podobě výrobku, jeho vlastnostech, rozměrech, hmotnosti a tím v podstatě předurčují, jakou metodou a za jakých parametrů bude svařován.

Vlastnosti výrobku (svarku) významně určující volbu metody svařování jsou:

- Druh, složení a vlastnosti základního materiálu
- Tloušťka základního materiálu

- Rozměr svaru
- Průřez svaru
- Poloha svařování
- Délka svaru
- Pracnost

Na základě shromážděných informací, jejich rozboru, důkladné analýze, provedení potřebných úvah a výpočtů se vše zpracuje a následně slouží jako základní data pro sestavení technologického postupu a specifikace postupu svařování, která je všeobecně známa pod zkratkou WPS (z anglického Welding Procedure Specification).

6 DOPROVODNÉ PROCESY SVAŘOVÁNÍ

Doprovodné procesy svařování je souhrnný název pro podpůrné operace nutné k úspěšnému dokončení svaru a dosažení jeho požadovaných vlastností a výsledné jakosti.

Mezi nejčastější podpůrné operace při svařování patří předehřev, tepelný doprovod v průběhu svařování, řízené ochlazování, žíhání pro odstranění vnitřního napětí.

6.1 Vliv tloušťky ZM

Jedním z důležitých aspektů při svařování uhlíkových ocelí je rychlost ochlazování tepelně ovlivněné oblasti, která mimo jiné závisí na množství dodaného tepla. Proto v případech když tloušťka svařovaného materiálu je větší než 25 mm se aplikuje předehřev, jehož účinkem dochází ke zpomalení ochlazování.

6.2 Uhlíkový ekvivalent

Důležitým krokem při posuzování svařitelnosti uhlíkových ocelí je určení hodnoty ekvivalentního obsahu uhlíku (C_e) výpočtem. Pro výpočet uhlíkového ekvivalentu existuje mnoho postupů a vztahů, určených pro různé skupiny ocelí respektive jejich chemická složení. Za všechny zde uvedu vzorec navržený Mezinárodním svářečským institutem (IIW), který je určen pro oceli s obsahem $C > 0,18$ hm. %:

$$C_e = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$$

Pokud je vypočtená hodnota $C_e \leq 0,45$ hm. %, tloušťka základního materiálu ≤ 25 mm a obsah $C < 0,20$ hm. % nejsou nutná žádná zvláštní opatření. V opačném případě je daný materiál náchylný ke vzniku trhlin, čemuž je třeba zamezit přijetím některého ze zvláštních opatření. Mezi nejčastější opatření v tomto případě patří předehřev.

6.3 Předehřev a tepelný doprovod

Jak již bylo výše uvedeno, účinkem předehřevu dochází ke zpomalení rychlosti ochlazování tepelně ovlivněné oblasti. K určení správné hodnoty Teploty předehřevu (T_p) je nejčastěji používán výpočet podle Séferiánova vzorce:

$$T_p = 350 \cdot \sqrt{C_p - 0,25}$$

$$C_p = C_c + C_s$$

$$C_c = \frac{360 C + 40(Mn + Cr) + 20 Ni + 28 Mo}{360}$$

$$C_s = 0,005 \cdot s \cdot C_c \quad s\text{- je tloušťka materiálu}$$

Tento výpočet lze použít pro uhlíkové a nízkoalokované oceli (nejčastěji žárovečné konstrukční oceli) s obsahem C > 0,10 hm. %.

6.4 Interpass teplota

Interpass teplota, zvaná též mezihouseňková se monitoruje u vícevrstvých svarů. Jedná se o teplotu, naměřenou na již zhotovené vrstvě (house) svaru bezprostředně před započatím svařování další vrstvy svaru. Překračování interpass teploty může nepříznivě ovlivnit mechanické vlastnosti. U austenitických ocelí se interpass teplota předepisuje z důvodu zachování antikoročních vlastností.

6.5 Žihání svarového spoje [PWHT]

Jedná se o tepelnou úpravu celého svarku, nebo jeho části v místě svarového spoje a přilehlých oblastech. Slouží k odstranění svarových napětí ve svaru.

Při žihání ocelových svarků na snížení vnitřního napětí se provádí pomalý ohřev pod teplotu A_1 . Podle druhu materiálu se tato teplota obvykle pohybuje v rozmezí 500 až 730 °C. Při této teplotě jsou hodnoty meze kluzu i meze tečení natolik nízké, že při správné výdržce se vnitřní napětí mohou odbourat místní plastickou deformací. Žihací teplota a doba výdržce závisí na druhu materiálu, velikosti a tvaru svarku. Doba výdržce činí cca 4 minuty na 1 mm tloušťky materiálu v místě svaru, nejméně však 20 minut. Po výdržce na žihací teplotě se provádí pomalé ochlazování. Obvyklá ochlazovací rychlost je 150 °C za hodinu.



Obrázek 8- Žihací pec



Obrázek 9- Žihání elektrickým odporem

7 DEFORMACE VLIVEM SVAŘOVÁNÍ

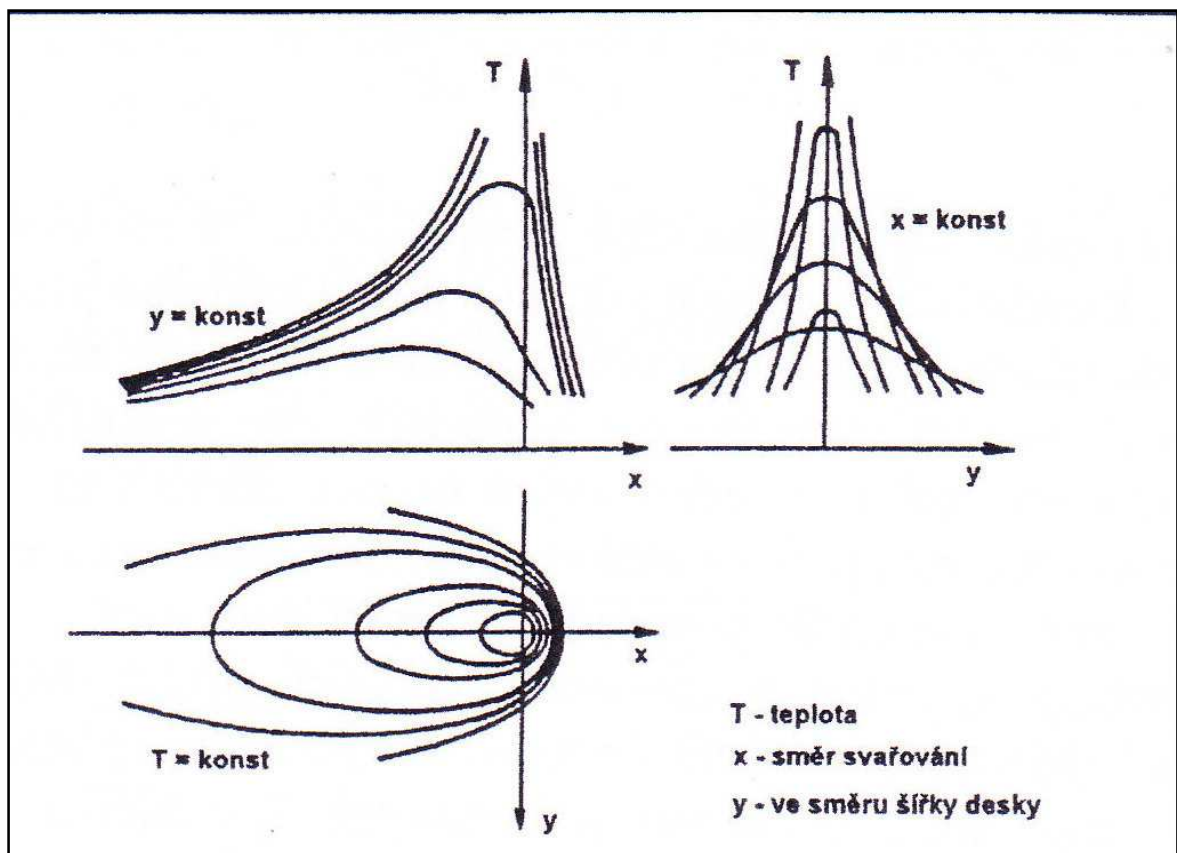
Během svařování vznikají vlivem teplotního účinku svařovacího procesu svařová napětí a tím i deformační účinek svařovacího procesu. Proto lze svařovací proces charakterizovat jako teplotní a deformační účinek na základní materiál. [3]

Napětí a deformace vznikají ve fázi ohřevu i ochlazování svařovaného materiálu v důsledku nestacionárního sdílení tepla a teplotních závislostí, fyzikálních vlastností materiálu a metalurgických procesů. Vznik svařových napětí a deformací lze technologickými zásahy omezit, ale nelze jim zcela zabránit. [4]

Rozdělení teplot v okolí svarů je závislé:

- tepelně fyzikálních vlastnostech základního materiálu
- efektivním výkonu zdroje tepla
- rychlosti svařování

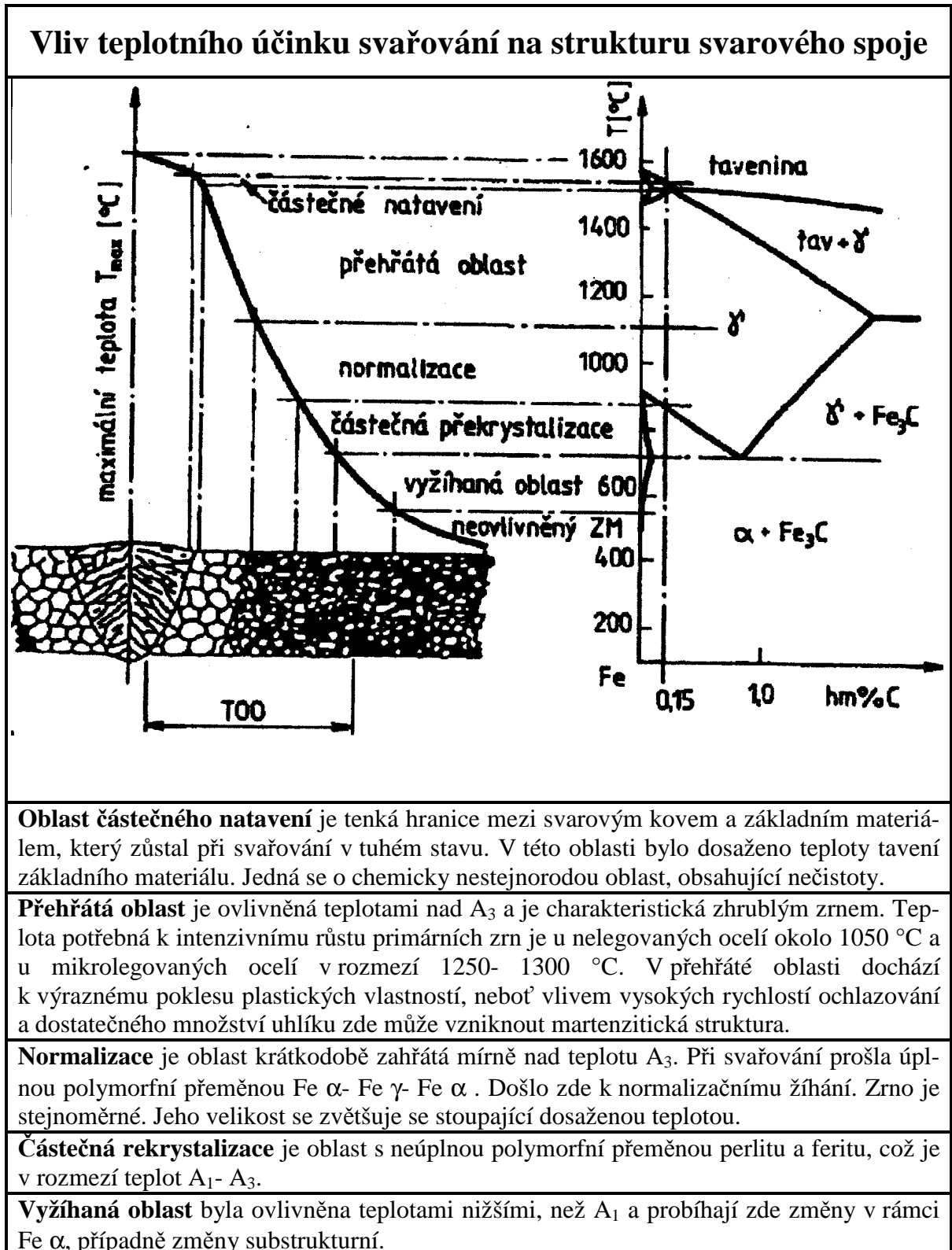
Časově proměnná napětí, která způsobují lokální i celkové deformace svarků, jsou důsledkem teplotních dilatací a nerovnoměrného rozložení teploty ve fázi ohřevu i ochlazování.



Obrázek 10- Charakter teplotního pole při ustáleném stavu v průběhu svařování tenké desky [3]

Oblast svarového spoje, ve které dochází ke změnám mikrostruktury v důsledku působení tepelných účinků svařování, se nazývá **Teplem ovlivněná oblast (TOO)**.

Tabulka 4: Vliv teplotního účinku svařování na strukturu svarového spoje [4]



7.1 Druhy deformací

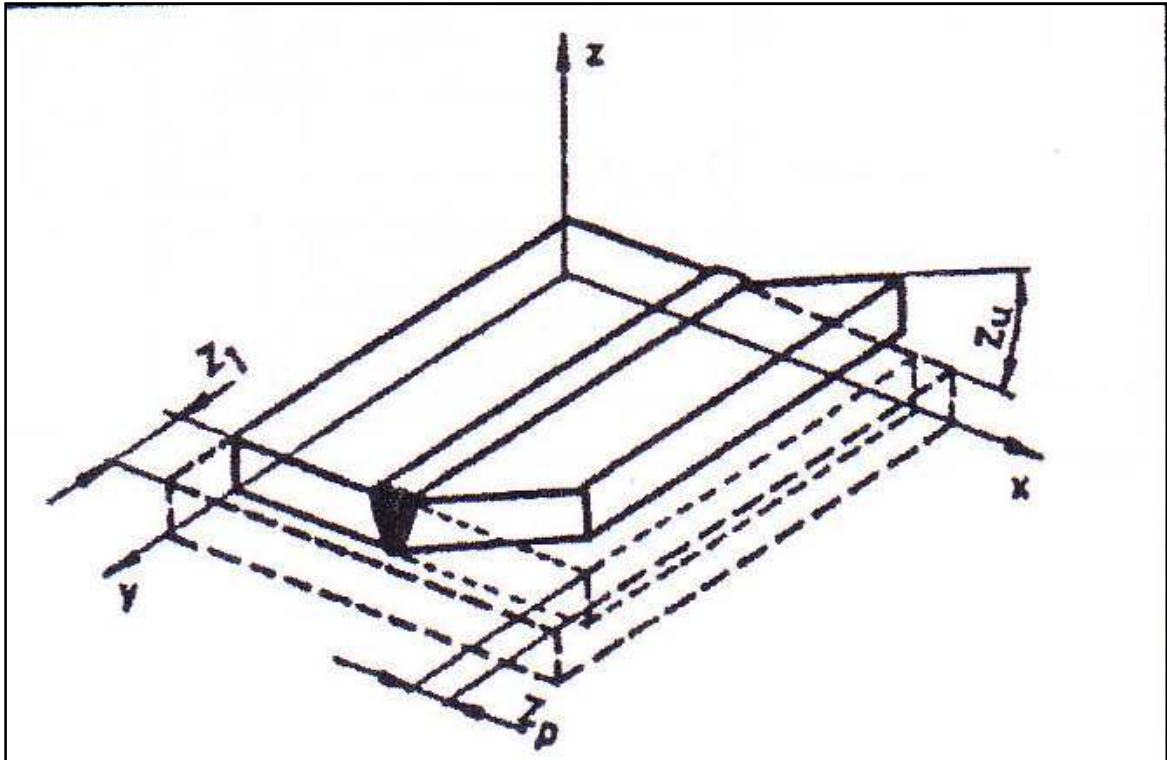
V průběhu ohřevu svaru během svařování dochází vlivem tepelné roztažnosti materiálu k objemovým změnám a tím ke vzniku tlakových napětí. Tato tlaková napětí se po dosažení maximální teploty postupně snižují a nastává přechod do fáze ochlazovací. Pokud ve fázi ohřevu došlo k plastickým deformacím, začínají se generovat tahová napětí.

Vlivem anizotropie oceli nedochází k šíření deformací v základním materiálu rovnoměrně. Na mikroskopické úrovni můžeme vedle sebe najít místa s výrazným přetvořením i místa s prakticky nulovou deformací. Deformační cyklus může zasáhnout podstatně větší oblast svaru, než cyklus teplotní.

Při svařování dvou desek tupým svarem, je svar a jeho okolí namáháno v podélném směru silou od smršťování svaru. V příčném směru vznikají napětí vyvolaná nerovnoměrným jednostranným ohřevem. U tlustých plechů je pak nutné uvažovat i s napětím ve směru tloušťky. [4]

Vlivem působení napětí dochází k deformacím svaru, které se dělí:

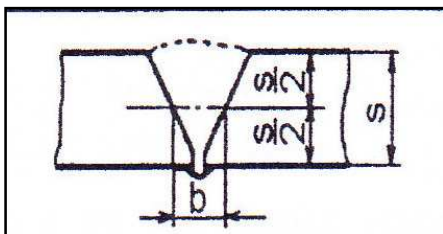
- Příčná smrštění (Z_p) jsou závislá na:
 - množství vneseného tepla do místa svaru
 - způsobu svařování a stehování
 - tvaru a délce svarového spoje
 - tloušťce materiálu
 - tuhosti svaru a jeho případném upnutí v přípravku
- Podélná smrštění (Z_l) jsou závislá na:
 - metodě svařování
 - způsobu vyplňování úkosu
 - tuhosti svaru ve směru svařování a jeho případném upnutí v přípravku
- Úhlové deformace (Z_u) jsou závislé na:
 - úhlu rozevření svaru
 - počtu svarových vrstev
 - způsobu kladení svarových vrstev



Obrázek 11- Deformace svarku: Z_p - příčné smrštění, Z_l -podélné smrštění, Z_u - úhlová deformace [5]

Příčné smrštění je dáno výsledkem vzájemného působení dílčích faktorů a jeho velikost lze vyjádřit vztahem: [5]

$$Z_p = 0,1716 \cdot \frac{S_{sv}}{s} + 0,0121 \cdot b$$



Z_p - příčné smrštění (mm)

S_{sv} - plocha příčného řezu svarem (mm²)

s- tloušťka základního materiálu (mm)

b- střední šířka svaru (mm)

Podélné smrštění je deformace svaru ve směru osy svaru. Během svařování má ohřátý základní materiál tendenci dilatovat v oblasti svarové lázně. Deformacím v podélném směru je však do značné zamezováno málo ohřátou masou okolního základního materiálu. Velikost podélného smrštění se dá orientačně určit ze vztahu: [5]

$$Z_l = 0,012 \cdot \frac{I \cdot L}{100 \cdot s}$$

Z_l - podélné smrštění ($\text{mm} \cdot \text{m}^{-1}$)

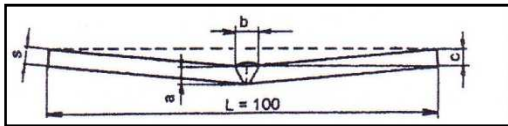
I- svařovací proud (A)

L- délka svaru (mm)

s- tloušťka základního materiálu (mm)

Úhlové deformace jsou vychýlení roviny jedné desky od původní roviny druhé desky v příčném směru. Při stejné tloušťce desek rostou úhlové deformace s rostoucím počtem svarových vrstev. Velikost úhlové deformace se dá orientačně stanovit ze vztahu: [5]

$$C = \frac{a \cdot b}{30 \cdot s}$$



C- úhlová deformace (mm)

a- výška svaru (mm)

b- šířka svaru (mm)

s- tloušťka základního materiálu (mm)

7.2 Eliminace vzniku deformací

Deformace, napětí a defekty jsou sice nežádoucí, ale bohužel také neodmyslitelné průvodní jevy svařování, které v konečném důsledku negativně ovlivňují nejen výslednou jakost výrobku, ale do značné míry také náklady na výrobu a konečnou cenu, protože je třeba vynakládat další prostředky na eliminaci těchto průvodních jevů, nebo odstraňování jejich důsledků.

V souvislosti s deformacemi již bylo řečeno, že jejich vzniku lze technologickými zásahy předcházet, ale nelze jim zcela zabránit. Mezi hlavní způsoby předcházení deformacím patří:

- Snížení množství vneseného tepla.
- Způsob kladení jednotlivých svarových vrstev (housesek).
- Způsob vychlazení svaru.
- Volba metody svařování.
- Optimální poloha svařování
- Postup svařování
- Využití svařovacích přípravků

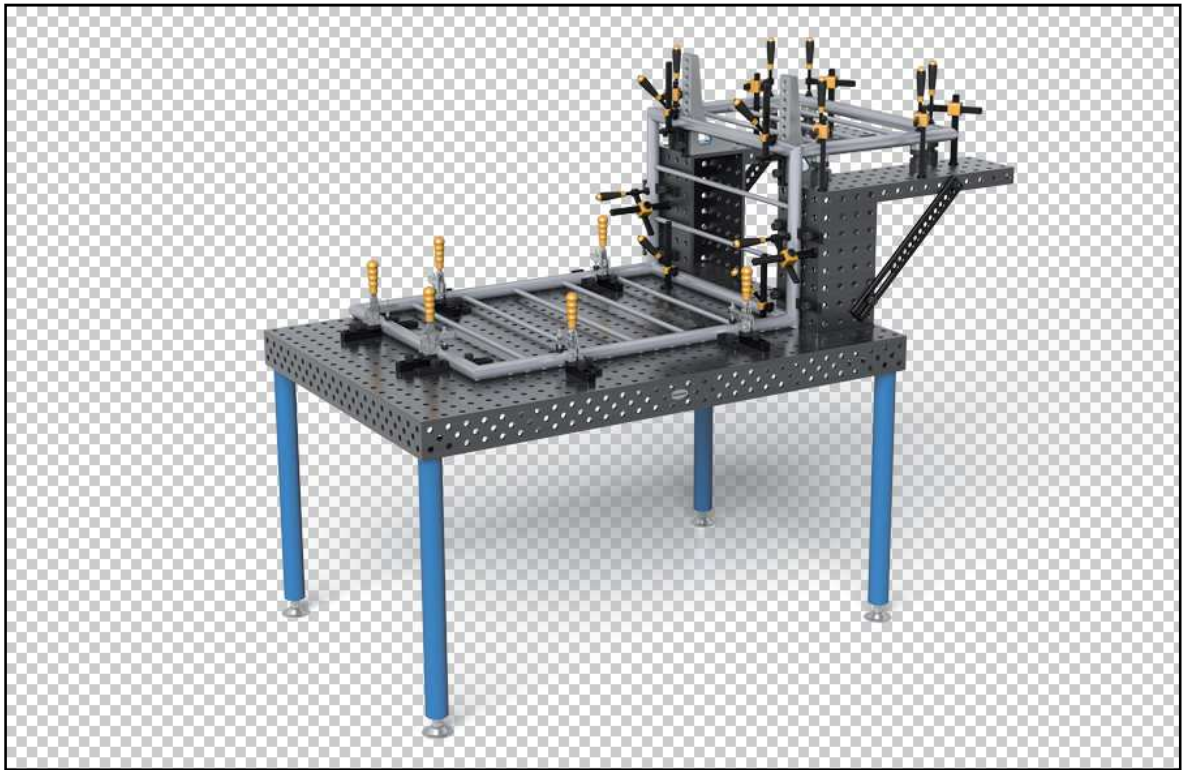
7.2.1 Přípravky

Přípravky umožňují upnutí dílů do požadované pozice, jejich následné nastehování a svaření. Tím usnadňují práci a zvyšují produktivitu. Jsou tvořeny z pracovních stolů, ustavovacích prvků, upínacích prvků a polohovadel. Pro sériovou výrobu jsou využívány jednoúčelové přípravky, navržené a vyrobené přímo pro daný druh výrobku.



Obrázek 12: Jednoúčelový přípravek

Pro kusovou a malosériovou výrobu jsou obvykle použity stavebnicové systémy.



Obrázek 13: Stavebnicový systém, sloužící jako víceúčelový přípravek

7.2.2 Stehování

Správným a promyšleným nastehováním lze položit základ pro vytvoření kvalitního svarového spoje s minimem nežádoucích rozměrových odchylek. V případě svařování v přípravku, nám tento zajistí zachování požadovaných rozměrů a tvarů, ovšem za cenu vyšších vnitřních napětí ve svarku. V opačném případě, kdy minimalizace napětí ve svarku má prioritu před přesným rozměrem, lze díly nastehovat s jistými vypočtenými, nebo experimentálně zjištěnými odchylkami od finálního tvaru, které po vytvoření svaru a jeho ochlazení vlivem deformací zmizí a výrobek má požadovaný tvar i rozměr při menším vnitřním napětí. Minimální délka stehu by až na výjimky neměla být kratší, než dvojnásobek tloušťky základního materiálu.

8 VADY SVARŮ

Spolehlivého a bezpečného užívání jsou schopné pouze takové výrobky (svarky), které jsou bez vad, nebo pouze s takovými vadami, které při požadovaném provozním zatížení spolehlivě obstojí. Vady svarů jsou nebezpečné koncentrátoři napětí a mohou se stát iniciátory křehkého lomu.

8.1 Vnitřní vady

Jsou defekty, které se vyskytují pod povrchem a detekovat je, aniž by došlo k poškození svaru, lze pouze pomocí prozařovacích nebo ultrazvukových nedestruktivních metod zkoušení. Typické vnitřní vady jsou:

- Bubliny
- Póry
- Staženiny
- Vměstky
- Studené spoje

8.2 Povrchové vady

Za povrchové vady se považují takové vady, které lze detekovat na povrchu svaru metodami pro odhalování povrchových vad, mezi které patří Vizuální kontrola, Penetrační (kapilární) kontrola, Magnetická prášková metoda. Nejčastější povrchové vady jsou:

- Trhliny
- Zápaly
- Krápníky
- Vady rozměru, nebo tvaru
- Studené spoje

9 NEDESTRUKTIVNÍ ZKOUŠKY SVARŮ

Za nedestruktivní metody kontroly svarů jsou považovány takové, jejichž vlivem nedochází k žádným změnám původních vlastností, nebo jakosti svarového spoje ani svarku. Naprostá většina nedestruktivních metod dokáže indikovat pouze vady povrchové. Pokud vlivem požadavků na jakost daného svarového spoje vznikne nutnost provedení detekce vnitřních vad, lze jejich zjišťování provádět pomocí radiolokační metody RT, nebo ultrazvukem UT.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

10 DEFORMACE SVARKU

Na první pohled by se mohlo zdát, že zdánlivě přehnané nároky na postupy, kontroly a zkoušky jsou zbytečné a drahé, nicméně jsou nezbytné. Jejich úkolem je předcházet případným selháním výrobku, protože následky by pak mohly být nedozírné nejen v ekonomické rovině, ale v některých případech by dokonce mohli i ohrožovat na životech.

Teoretické znalosti z předchozích kapitol budou v této části využity k vypracování uceleného přehledu optimálních hodnot základního materiálu a výpočtu výsledných deformací, při svařování elektrickým obloukem bez použití přípravků.

Tato práce mi poslouží jako základ pro další výzkum deformací při svařování, kterému bych se rád věnoval v diplomové práci.

Pro úplnost tématu bude na závěr vypracována základní dokumentace v minimálním legislativně požadovaném rozsahu, která bude přílohou této práce a bude sestávat z technologického postupu, specifikace postupu svařování WPS a příkladu protokolu o vizuální zkoušce.

10.1 Optimalizace rozměrů

Praktické zkušenosti jednoznačně potvrdily, že příliš velký úhel rozevření svarové mezery se negativně projevuje na deformacích. Mezi další negativní jevy velké mezery pak patří i vyšší spotřeba přídatného svařovacího materiálu a také celkový čas svařování je přímo úměrný velikosti mezery. Na druhou stranu se větší úhel rozevření příznivě projevuje na technologických možnostech. Zlepšuje možnosti manévrování ústí svařovacího zdroje a tak se nepřímou podílí na snižování rizika vzniku studených spojů a jiných negativit, čímž dává možnost vzniku kvalitního svarového spoje.

Tabulka 5: Stanovení rozměrů ZM pro svařování

Stanovení rozměrů základního materiálu pro svařování (v souladu s ČSN EN ISO 9692)			
	Položka	Rozměr	
	W_1	100,00 mm	
	L_1	100,00 mm	
	T	10,00 mm	
	W_m	3,00 mm	
	T_o	2,00 mm	
	W_{pw}	12,24 mm	
	$^\circ\alpha$	60,00 °	
	$\frac{1}{2}W_1 - \frac{1}{2}W_m$	48,50 mm	
	$\frac{1}{2}W_1 - \frac{1}{2}W_{pw}$	43,88 mm	
	W_1 :	Šířka svarku při nastehování	
	L_1 :	Délka svarku při nastehování	
	T :	Tloušťka svarku při nastehování	
	W_m :	Šířka mezery v kořeni budoucího svaru	
	T_o :	Tloušťka otupení v kořeni svaru	
W_{pw} :	Šířka rozevření úkosu horní části		
$^\circ\alpha$:	Úhel rozevření svarové mezery		

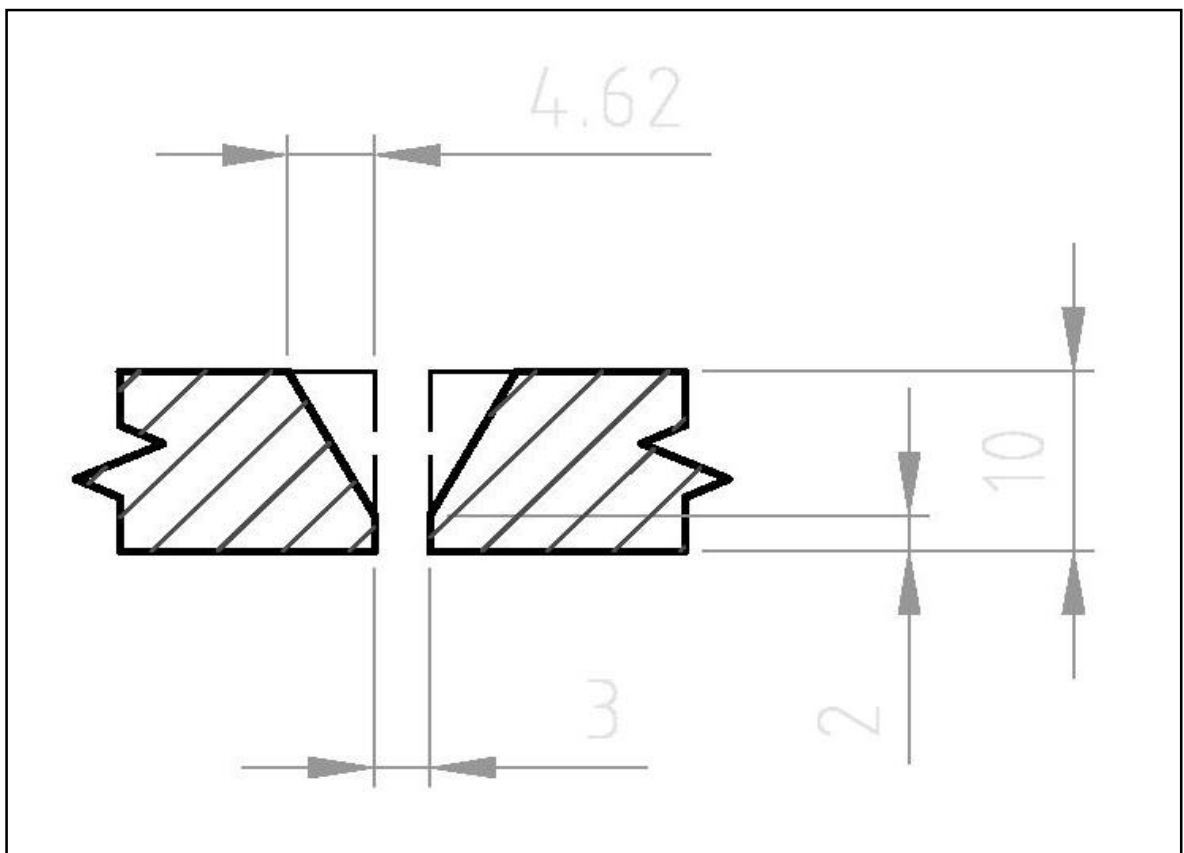
10.2 Výpočet deformací

Základem pro výpočet deformací budou vzorce z teoretické části práce, přičemž s některými hodnotami se bude ještě dále pracovat.

10.2.1 Příčné smrštění

Příčné smrštění vypočteme pomocí vzorce $Z_p = 0,1716 \cdot \frac{S_{sv}}{s} + 0,0121 \cdot b$

Nejprve vypočteme S_{sv} a b . K tomuto nám pomůže detail nákresu tvaru svarové plochy.



Obrázek 14: Detail úkosu pro svar

Plocha příčného řezu svarem $S_{sv} = 4,62 \cdot 8 + 3 \cdot 10 = 66,96 \text{ mm}^2$

Střední šířka svaru $b = \left(\frac{4,62}{8} \cdot 3\right) \cdot 2 + 3 = 6,46 \text{ mm}$

Tloušťka základního materiálu $s = 10 \text{ mm}$

Dosazením do vzorce a výpočtem byla zjištěna hodnota příčného smrštění $Z_p = 1,26 \text{ mm}$.

10.2.2 Podélné smrštění

Pro zjištění podélného smrštění použijeme vzorec $Z_l = 0,012 \cdot \frac{I \cdot L}{100 \cdot s}$

Svařovací proud $I = 85$ Ampér (experimentálně zjištěný reálný údaj)

Délka svaru $L = 100$ mm

Tloušťka základního materiálu $s = 10$ mm

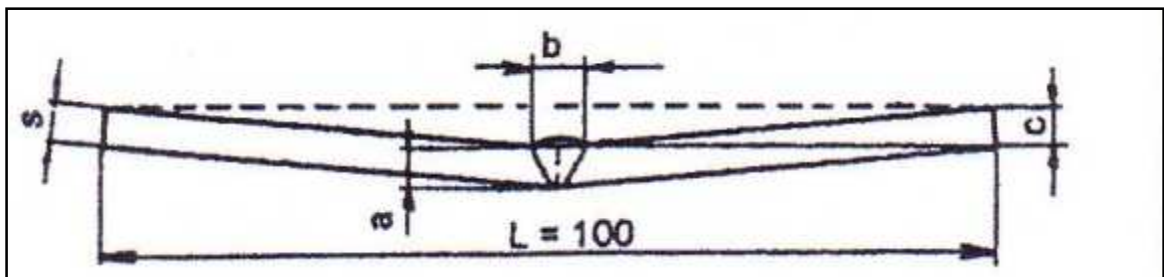
Vypočtená hodnota podélného smrštění $Z_l = 0,102$ mm·m⁻¹.

Protože výsledná hodnota výpočtu udává velikost podélného smrštění v mm·m⁻¹, výsledek bude třeba ještě vynásobit délkou svaru v metrech, což je v našem případě 0,1.

Výsledná hodnota podélného smrštění svaru je $Z_l = 0,0102$ mm.

10.2.3 Úhlová deformace

Úhlová deformace se vypočte podle vzorce $C = \frac{a \cdot b}{30 \cdot s}$



Obrázek 15: náčrtek s popisem hodnot úhlové deformace

Výška svaru $a = 10$ mm

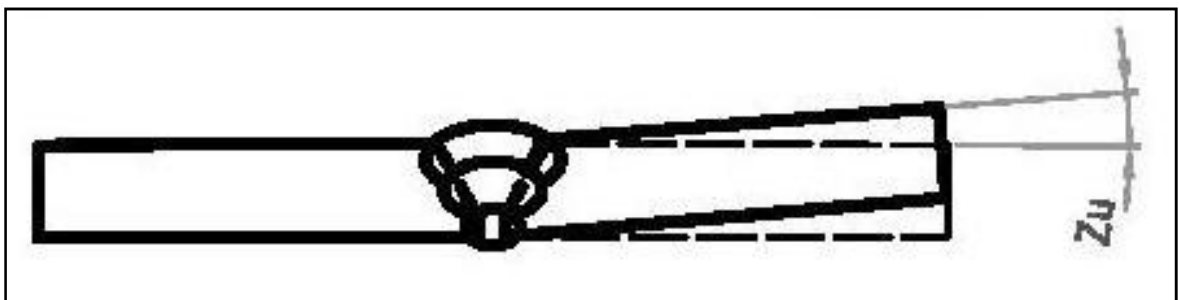
Šířka svaru $b = 15$ mm

Tloušťka základního materiálu $s = 10$ mm

Výpočet nám poskytl hodnotu úhlové deformace $C = 0,5$ mm.

Sice se jedná o údaj, který má určitou vypovídající hodnotu, nicméně s touto hodnotou budeme ještě dále pracovat a za pomoci goniometrické funkce arkustangens hodnotu C (tedy 0,5 mm) a hodnotu L (obrázek č. 15) převedeme na úhel s výsledkem ve stupních.

$$\arctg Z_u = \frac{C}{\frac{1}{2} \cdot L} = \frac{0,5}{50} = 0,01 = 0,57^\circ$$



Obrázek 16: Úhlová deformace

Výsledná hodnota úhlové deformace svarku je $Z_u = 0,57^\circ$.

11 KOMPLEXNÍ VYHODNOCENÍ DEFORMACÍ SVARKU

Tabulka s přehledem hodnot, nebo případný obrázek má obvykle větší vypovídající hodnotu, než mnohastránkový popis. Proto byla data o zjištěných deformacích zapracována do následující tabulky.

Tabulka 6: Výsledné deformace po vychladnutí svarku

Výsledné deformace po vychladnutí svarku o tloušťce 10 mm															
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Položka</th> <th>Rozměr</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>W_2</td> <td>98,74 mm</td> </tr> <tr> <td>L_2</td> <td>99,99 mm</td> </tr> <tr> <td>Z_p</td> <td>1,26 mm</td> </tr> <tr> <td>Z_l</td> <td>0,01 mm</td> </tr> <tr> <td>Z_u</td> <td>0,57 °</td> </tr> <tr> <td>W_w</td> <td>max. 15,00 mm</td> </tr> </tbody> </table>	Položka	Rozměr	W_2	98,74 mm	L_2	99,99 mm	Z_p	1,26 mm	Z_l	0,01 mm	Z_u	0,57 °	W_w	max. 15,00 mm
	Položka	Rozměr													
	W_2	98,74 mm													
	L_2	99,99 mm													
	Z_p	1,26 mm													
	Z_l	0,01 mm													
	Z_u	0,57 °													
W_w	max. 15,00 mm														
W_2 : Výsledná šířka svarku															
L_2 : Výsledná délka svarku															
Z_p : Příčné smrštění															
Z_l : Podélné smrštění															
Z_u : Úhlová deformace															
W_w : Maximální šířka svarové housenky															

ZÁVĚR

V této bakalářské práci je v jedenácti kapitolách nastíněna základní problematika svařování. Podstatná část je věnována popisu příčin vzniku deformací, jejich výpočtu a možnostem jejich částečných eliminací.

Jasně jsou zde uvedena a popsána základní pravidla pro úspěšné provedení svaru a srozumitelnou formou řečeno, čemu je třeba přikládat význam a čeho je lepší se, pokud možno, vyvarovat.

V praktické části je, mimo výpočtu deformací svarového spoje, položen také základ pro vypracování nezbytné dokumentace, která je vyžadována dnešní legislativou. Tyto reálné, funkční a prakticky použitelné dokumenty jsou přílohou této práce.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Ptáček L. a kolektiv, *NAUKA O MATERIÁLU I.*, Brno CERM, 2003
- [2] Ptáček L. a kolektiv, *NAUKA O MATERIÁLU II.*, Brno CERM, 2002
- [3] Hrivňák I., *Teoria zvariteľnosti kovov a zliatin*, Bratislava Veda, 1989
- [4] Müncner L. Iždinský O., *Deformácie a napätia pri zvaraní*, Bratislava Alfa, 1972
- [5] Pilous V., *Konstruktér a tavné svařování*, Praha SNTL, 1964

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

- WPS Specifikace postupu svařování (zkratka z anglického Welding Procedure Specification).
- PWHT Žhání, respektive tepelné zpracování po svařování (zkratka z anglického Post weld heat treatment).

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1:	Příklad tupého svaru v poloze PF	13
Obrázek 2:	Koutový svar, poloha PB- postup kladení jednotlivých vrstev	14
Obrázek 3:	Polohy svařování dle ČSN EN ISO 6947	14
Obrázek 4:	Polohy svařování- schematické znázornění	15
Obrázek 5:	Příprava ploch tupého svaru	15
Obrázek 6:	Jednovrstvý koutový svar- poloha PB	16
Obrázek 7:	Diagram Fe- Fe ₃ C	20
Obrázek 8:	Žíhací pec	31
Obrázek 9:	Žíhání elektrickým odporem	31
Obrázek 10:	Charakter teplotního pole při ustáleném stavu	32
Obrázek 11:	Deformace svarku	35
Obrázek 12:	Jednouúčelový přípravek	37
Obrázek 13:	Stavebnicový systém sloužící jako víceúčelový přípravek	38
Obrázek 14:	Detail úkosu pro svar	44
Obrázek 15:	Nákres s popisem hodnot úhlové deformace	45
Obrázek 16:	Úhlová deformace	46

SEZNAM TABULEK

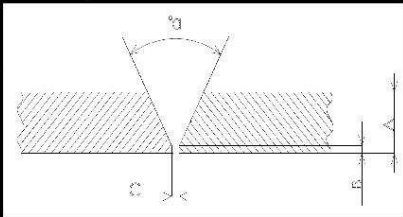
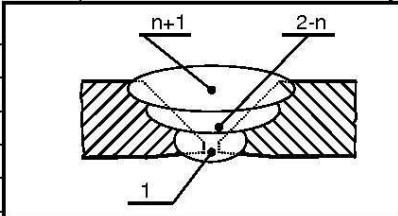
Tabulka 1:	Metody tavného svařování	17
Tabulka 2:	Metody tlakového svařování	18
Tabulka 3:	Mezní obsahy legovacích prvků pro rozdělení ocelí na neleg. a leg. ...	22
Tabulka 4:	Vliv teplotního účinku svařování na strukturu svarového spoje	33
Tabulka 5:	Stanovení rozměrů základního materiálu pro svařování	43
Tabulka 6:	Výsledné deformace po vychladnutí svarku	47

SEZNAM PŘÍLOH


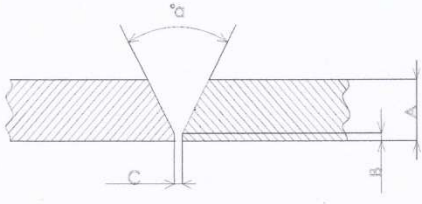
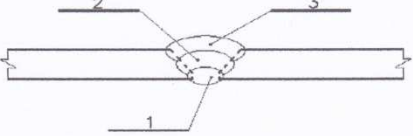



- Příloha PI: Technologický postup- vzor
Příloha PII: Specifikace postupu svařování- vzor
Příloha PIII: Protokol o vizuální zkoušce- vzor

PŘÍLOHA P I: TECHNOLOGICKÝ POSTUP - VZOR

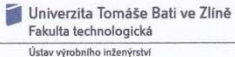
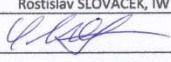

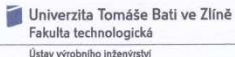
	Technologický postup Vytvoření tupého svarového spoje	Číslo: TP 001
		Datum: 21. 03. 2014

Číslo operace	Popis operace	Instrukce
1.1	Polotovar 1: Ocelový plech tl. 10mm, mat. S 235 Rozměr (mm): 194 x 95	
1.1.1	Řezat na požadovaný rozměr	Okružní pila, pásová pila, úhlová bruska
1.1.2	Úkosovat dle WPS-111-001	Třískové obrábění, broušení
1.1.3	Penetrační zkouška svarových ploch budoucího svaru	Penetrační souprava
1.1.4	Očištění a odmaštění svarových ploch	Kartáč, odmašťovač
1.2	Polotovar 2: Ocelový plech tl. 10 mm, mat. S 235 Rozměr (mm): 194 x 95	
1.2.1	Řezat na požadovaný rozměr	Okružní pila, pásová pila, úhlová bruska
1.2.2	Úkosovat dle WPS-111-001	Třískové obrábění, broušení
1.2.3	Penetrační zkouška svarových ploch budoucího svaru	Penetrační souprava
1.2.4	Očištění a odmaštění svarových ploch	Kartáč, odmašťovač
2	Sesazení a nastehování metodou 111	Měřidlo, příložník, svářečka
2.1	A= 10 mm	
2.2	B= dle WPS-111-001	
2.3	C= dle WPS-111-001	
2.4	α = dle WPS-111-001	
2.5	Kontrola rozměrů svarových ploch	
2.6	Kontrola souososti sestavy	
2.7	Kontrola rozměrů sestavy	
3	Svařovat metodou 141 dle WPS	převzít WPS od svářečského dozoru
3.1	Zavařit kořen svaru (vrstva 1)	Postup a parametry dle WPS-111-001
3.2	Zavařit mezivrstvy (vrstvy 2- n)	Postup a parametry dle WPS-111-001
3.3	Zavařit krycí vrstvu (vrstva n+ 1)	Postup a parametry dle WPS-111-001
3.4	Chlazení svaru	Dle pokynů ve WPS-111-001
4	Kontroly a zkoušky	
4.1	Kontrola souososti sestavy	
4.2	Kontrola rozměrů sestavy	
4.3	Vizuální kontrola (100 %)	
4.4	Penetrační zkouška	
4.5	Ostatní kontroly a zkoušky dle předpisu	
Vypracoval: Rostislav SLOVÁČEK		Převzal:
Schválil: Prof. Ing. Ivan LETKO, CSc.		Podpis:

PŘÍLOHA P II: SPECIFIKACE POSTUPU SVAŘOVÁNÍ - VZOR

Specifikace postupu svařování „WPS“ dle ČSN EN ISO 15609 - 1 (Obloukové svařování)						
1. Výrobce:  Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně Fakulta technologická Ústav výrobního inženýrství			10. Projekt: Bakalářská práce			
2. Místo: UTB ve Zlíně, Fakulta technologická			11. Způsob přípravy úkosu: obrábění, broušení			
3. Číslo dokladu (WPS): WPS-111-001			12. Způsob čištění: kartáčování, odmaštění			
4. Číslo WPQR: —			13. Specifikace základních materiálů			
5. Číslo zkušebního kusu: —			- materiál 1: S 235			
6. Kvalifikace svářeče: EN 287-1			- materiál 2: S 235			
7. Metoda svařování: 111			14. Svařovaná tloušťka [mm]: t = 10			
8. Druh svaru: BW			15. Vnější průměr [mm]: —			
9. Údaje o přípravě svarových ploch: ČSN EN ISO 9692			16. Poloha svařování: PA			
17. Tvar spoje		18. Rozměry		19. Postup svařování		
		A [mm]				
		10				
		B [mm]				
		2				
		C [mm]				
		3				
		α [°]				
		60				
20. Parametry pro svařování						
21. Svarová housenka	1	2	3	4	5	6
22. Metoda svařování	111	111	111	-	-	-
23. Ø přídavného materiálu [mm]	2,0	2,5	2,5	-	-	-
24. Svařovací proud [A]	60-80	80-100	80-100	-	-	-
25. Svařovací napětí [V]	24	23	23	-	-	-
26. Druh proudu a polarita	DC(+)	DC(+)	DC(+)	-	-	-
27. Přenos kovu přídavného materiálu	-	-	-	-	-	-
28. Rychlost podáv.drátu [m.min ⁻¹]	-	-	-	-	-	-
29. Rychl. posuvu pojezdu [m.min ⁻¹]	-	-	-	-	-	-
30. Tepelný příkon [J.cm ⁻¹]	-	-	-	-	-	-
31. Přídavný materiál - zařazení a značka: EN 499: E 42 3 B 42 (ESAB E-B 123)						
32. Předpis pro sušení: 100 °C/60 min. + 300-350 °C/120 min.			42. Údaje o podložném kroužku: —			
33. Ochranný plyn / tavidlo: - ochranný plyn [l.min. ⁻¹]: — - ochrana kořene [l.min. ⁻¹]: —			43. Další informace: Rozkvyv - amplituda : — - frekvence a doba prodlevy: — Rozkvyv (max. šířka housenky) : —			
34. Wolfram.elektroda, druh/průměr : —			44. Údaje pro pulzní svařování: —			
35. Údaje o drážkování/podlož. kořene: —			45. Údaje pro plazmové svařování: —			
36. Teplota předehřevu [°C] : —			46. Úhel nastavení hořáku: —			
37. Interpass teplota [°C] : ≤ 150			47. Druh automatu a svař. hlavy: —			
38. Tepelné zpracování/ stárnutí: —			48. Prokováni svaru: —			
39. Doba, teplota, postup: —			49. Poznámky: —			
40. Rychlost ohřevu[°C /hod.] / chladnutí: —						
41. Vzdálenost elektrody (kontaktní špičky) od základního materiálu [mm] : —						
50. Výrobce:  Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně Fakulta technologická Ústav výrobního inženýrství			52. Vypracoval:  21. 03. 2014, Rostislav SLOVÁČEK			
51. 21. 03. 2014, Prof. Ing. Ivan LETKO, CSc. datum, jméno, razítko			53. 21. 03. 2014, Rostislav SLOVÁČEK datum, jméno, podpis a razítko 			

PŘÍLOHA P III: PROTOKOL O VIZUÁLNÍ ZKOUŠCE- VZOR

		PROTOKOL O VIZUÁLNÍ ZKOUŠCE SVAROVÝCH SPOJŮ DLE NORMY ČSN EN ISO 17637, ČSN EN ISO 5817, ČSN EN ISO 6520-1			
Výrobce:	UTB ve Zlíně, Fakulta technologická	Zakázka číslo:	2014-01-UTB	Protokol č.:	VT_2014-UTB_001
ÚDAJE O PROJEKTU					
Projekt	Bakalářská práce	Místo zkoušky	UTB ve Zlíně, Fakulta technologická		
Objekt	Ústav výrobního inženýrství	Název výrobku	Ocelová deska		
Výkres č.	---	Číslo výrobku	BC_001		
Materiál	S 235	Svařovací plán	---		
ÚDAJE O ZKOUŠCE					
Metoda	EN ISO 17637 Přímá vizuální kontrola	Vyhodnocení / Kritérium	EN ISO 5817 / B		
Čištění	Mechanicky	Osvětlení	> 500 lx		
Kontrola (mm)	Svarový spoj + 25 mm	Rozsah kontroly	100 %		
Vybavení pro VT	Dle normy EN ISO 17637				
DOKUMENTACE KONTROLY					
Svar č.	Hodnocená část ¹⁾	Číslo indikace (ČSN EN ISO 6520-1, ČSN EN ISO 5817)/ Přípustná pro stupeň ²⁾ / Svar vyroben dne			Výsledek ³⁾
1	Su	513, 514, 502 / B / 21. 03. 2014			S/O.K.
1	Ro	504 / B / 21. 03. 2014			S/O.K.
Poznámky					
VT kontrola před svařováním dle EN ISO 17637, čl. 4:					S/O.K.
Dokumentace					
Technologický postup číslo: TP 001 a Specifikace postupu svařování číslo: WPS-111-001					
VYHODNOCENÍ					
Celkový výsledek vizuální kontroly				VYHOVUJE	
ÚDAJE O ZKOUŠEJÍCÍM					
Podpis:	Zkoušel Rostislav SLOVÁČEK, IWT 	Vyhodnotil Rostislav SLOVÁČEK, IWT 	 Za organizaci		
Certifikát č.:	IWT/CZ/09048	IWT/CZ/09048			
Datum:	21. 03. 2014	21. 03. 2014			

¹⁾ Su – Povrch (Surface); Ro – Kořen (Root)

²⁾ Kritérium: B, C, D - EN ISO 5817; NS – Nevhovuje; S/O.K. – Vyhovuje