



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VLIV PARAMETRŮ SVAŘOVÁNÍ NA ÚHLOVÉ DEFORMACE SVARU

INFLUENCE OF WELDING PARAMETERS ON ANGULAR DISTORTION OF WELD

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

TOBIÁŠ CRLA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. LADISLAV DANĚK, CSc.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Tobiáš Crla

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303R002)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Vliv parametrů svařování na úhlové deformace svaru

v anglickém jazyce:

Influence of welding parameters on angular distortion of weld

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Sledování velikosti úhlové deformace koutového a tupého svaru v závislosti na parametrech svařování, velikosti plochy příčného průřezu svaru. Jedno a vícevrstvé svařování.

Cíle bakalářské práce:

Napětí a deformace jako průvodní jev svařování, teoretická východiska. Výpočet úhlových deformací v závislosti na velikosti a skladbě svaru i na parametrech svařování. Experimentální ověření vypočítaných hodnot.

Seznam odborné literatury:

1. AMBROŽ, Oldřich, B. KANDUS a J. KUBÍČEK. Technologie svařování a zařízení. Ostrava: ZEROSS 2001. 395 s. ISBN 80-85771-81-0.
2. FOLDYNA, Václav a kol. Materiály a jejich svařitelnost. Ostrava: ZEROSS 2001. 292 s. ISBN 80-85771-85-3.
3. HUDEC, Zdeněk. Deformace a napětí při svařování. Technická univerzita v Liberci. Listopad 1998, 76 s. ISBN 80-7083-313-0.
4. KRÍŽ, R. a P. VÁVRA. Strojírenská příručka. Praha: SCIENTIA. 1998. Svazek 8. 251 s. ISBN 80-7183-054-2.
5. MESSLER, R. W. Jr..Principless of Welding. New York, USA. 1999. 662 s. ISBN 0-471-25376-6.

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 19. 11. 2014

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

CRLA Tobiáš: Vliv parametrů svařování na úhlové deformace svaru

Práce, jejímž úkolem bylo posoudit vliv parametrů svařování na úhlové deformace svaru, je rozdělena do dvou pomyslných částí - na část teoretickou a část experimentální. Teoretická část je věnována řešení příčin vzniku napětí a deformace při svařování, rozboru těchto příčin. Dále jsou zde popsána možná řešení, jak případnému vzniku napětí a deformací předcházet, případně jak postupovat, pokud k deformaci nakonec dojde. Je zde okrajově zmíněn termín metoda svařování MIG/MAG vzhledem k tomu, že i metoda svařování má vliv na případný vznik deformací. Jelikož je práce zaměřena na úhlové deformace, jsou zde teoreticky popsány vývoje této deformace a některé způsoby jejího určení, které jsou poté implementovány i do experimentální části. V té je prakticky zkoumán vliv parametrů svařování na úhlové deformace svaru na jednoduchých svarcích. Naměřené hodnoty z těchto experimentů jsou poté porovnávány s vypočítanými hodnotami z důvodu přesnosti měření a ověření těchto hodnot.

Klíčová slova: úhlová deformace, svařování, napětí při svařování, deformace svaru, minimalizování napětí a deformací

ABSTRACT

CRLA Tobiáš: Influence of welding parameters on angular distortion of weld

The aim of this thesis is to qualify influence of welding parameters on angular distortion of weld. This thesis is divided into two parts - theoretical part and experimental part. The theoretical part is focused on solving causes of origin of tension and distortion during welding and on analysis of these causes. After the mentioned analysis there are also described solutions, how to prevent the potential origin of distortion and tension or how to proceed when these two phenomenas happen after all. In another section of this thesis there is term mentioned - method of welding MIG/MAG, because welding method is also affecting the origin of distortion and tension. Since this thesis is focused on angular distortion, there are theoretically described processes of this distortion and some methods of its assessment. These assessments are implemented also into the experimental part. In this part is practically examined influence of welding parameters on the angular distortion of weld on simple weldments. The measured values were compared to calculated values because of accuracy of measurement and verification of these values.

Key words: angular distortion, welding, welding tension, distortion of weld, minimize of tension and distortion

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

CRLA, Tobiáš. *Vliv parametrů svařování na úhlové deformace svaru*. Brno, 2015. 37 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, Odbor svařování a povrchových úprav. Vedoucí práce doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Vliv parametrů svařování na úhlové deformace svaru** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Tobiáš Črla

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto vedoucímu mé bakalářské práce, panu doc. Ing. Ladislavu Daňkovi, CSc., za cenné připomínky a rady při vypracování této práce. Dále bych rád poděkoval svým rodičům, kteří mi umožnili jít studovat a během celého studia mě podporovali. Mé poděkování patří také mým kamarádkám a kamarádům taktéž za jejich podporu během mého studia.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

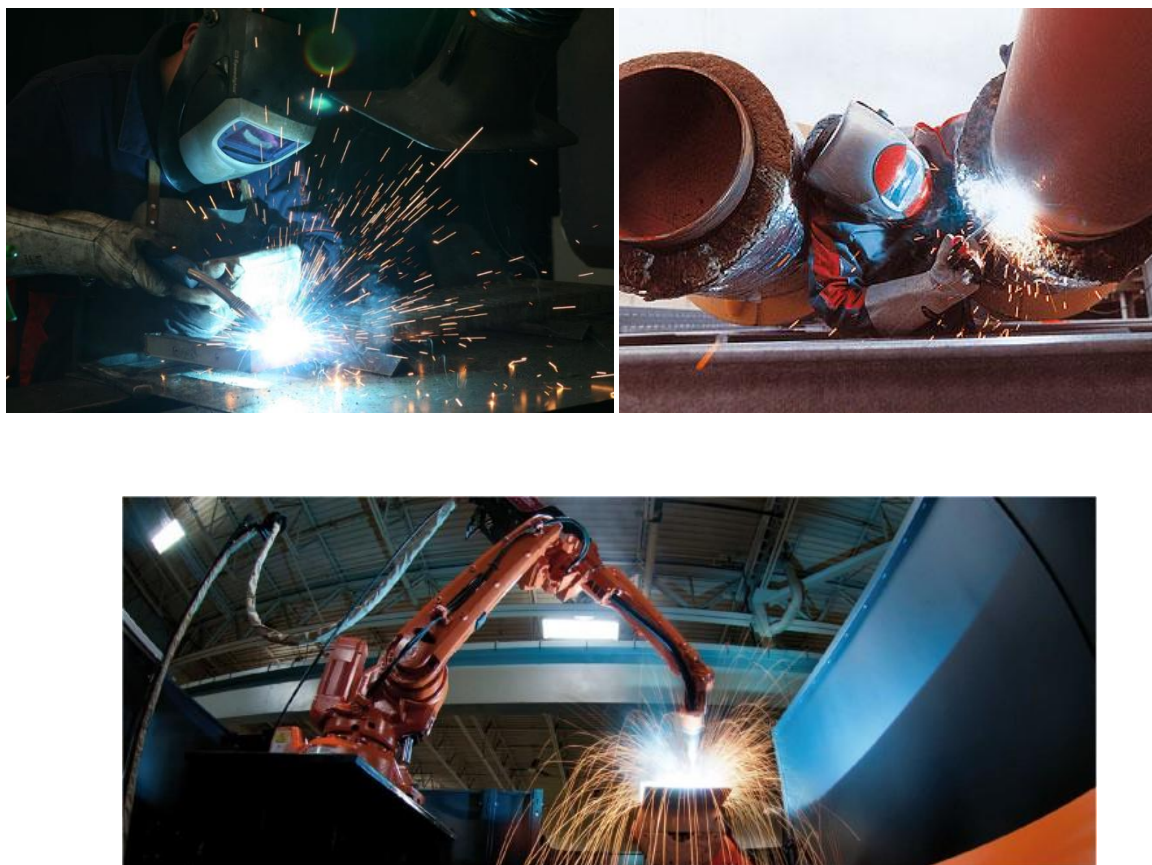
Úvod	9
1 Napětí a deformace při svařování	10
1.1 Napětíovo-deformační účinky	11
1.1.1 Napětí při svařování.....	11
1.1.2 Vlivy podporující vznik napětí	12
1.2 Deformace.....	15
1.2.1 Způsoby minimalizování napětí a deformací	18
1.3 Technologické parametry svařování	21
2 Svařování metodou MIG/MAG.....	23
2.1 Ochranné plyny.....	24
2.2 Přídavné materiály	25
3 Experiment	27
3.1 Teoretický výpočet úhlových deformací	29
4 Diskuze	33
Závěry	35

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratek

ÚVOD [13], [14], [15]

Při výběru tématu mé práce sehrála významnou roli osobní zkušenost s touto problematikou, kdy jsem jako brigádník ve firmě Slovácké strojírný a.s. měl možnost pracovat se svařovanými konstrukcemi a poznal jsem, jaké problémy představují deformace a napětí při svařování, zejména jejich potlačení, případně odstranění deformací při jejich vzniku. Na základě těchto zkušeností jsem se rozhodl prozkoumat blíže příčiny těchto jevů, jelikož se při svařování vyskytují ve větší, či menší míře pokaždé a nelze je oba současně potlačit. Z toho důvodu se domnívám, že hrají ve svařování významnou roli a je důležité se jimi zabývat. Dalším důvodem pro volbu tohoto tématu bylo i to, že mě svařování jako takové zajímá a rád bych se mu věnoval i nadále. Velký vliv na vznik napětí a deformací může mít například to, zda je zvolen ruční způsob svařování, nebo zda je svařováno mechanizovaně (robotem), viz obr. 1.



Obr. 1 - Ukázka ručního svařování a svařování robotem [13], [14], [15]

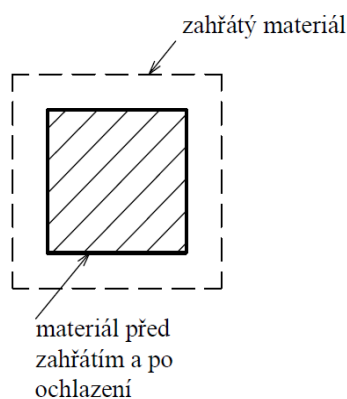
1 NAPĚTÍ A DEFORMACE PŘI SVAŘOVÁNÍ [1],[2],[3],[4],[9],[11],[12]

Napětí a deformace jsou jevy, které běžně doprovází tavné svařování jak při spojování materiálu, tak i při jeho dělení. V každém z těchto případů je na materiál působeno koncentrovaným tepelným zdrojem (místním ohřevem), což je příčinou vzniku napětí a deformací.

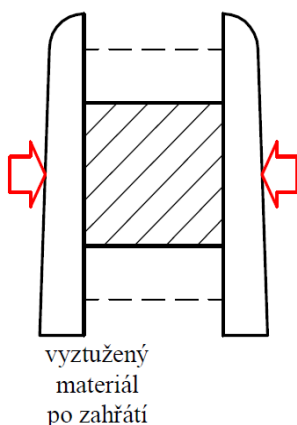
- Podstata:

Pokud je materiál ohříván stejně ve svém celém objemu, tak je jeho roztažení ve všech směrech identické a při následném chladnutí dosáhne tvaru, který měl před zahřátím. Nemá-li omezen žádným jiným tělesem, nevznikají žádná napětí, ani deformace, jak je patrné na obr. 1.1.

Jinak je tomu u materiálu, jehož roztažení je během svařování omezeno. Takový materiál má v místě ohřevu tendenci se roztáhnout jako v prvním případě, ale s rostoucí teplotou klesá jeho pevnost a vzdálenější materiál, který je ohřátý na nižší teplotu, mu zabrání v deformaci, viz obr. 1.2. V závislosti na teplotě vzroste napětí na mez kluzu. V okolí svaru vznikne zplastizovaná zóna, ve které se ohřátý materiál napěchová na materiál s nižší teplotou. Nejvyšších hodnot dosahuje teplota ve svarové lázni, která je tvořena přídavným a základním materiálem protaveným do určité hloubky, což ovšem také znamená nulovou pevnost. Po dokončení svařování začne pozvolna chladnout zplastizovaná oblast. Při dosažení okamžité místní teploty začne napěchovaná oblast základního materiálu stahovat nejdříve oblast v okolí svarového kovu a úbytek materiálu, který vznikl smrštěním svarového kovu a napěchovaného základního materiálu, následně způsobí vznik vnitřního napětí na mezi kluzu v okolí svaru.



Obr. 1.1 [3]



Obr. 1.2 [3]

Ohřátí materiálu bez omezení jiným tělesem a omezení cizím tělesem při svařování

- Důsledek:

Vzniklé napětí se na základě tuhosti spoje přenáší do celého svarku a projeví se vnější deformací, kterou lze omezit nebo ji později odstranit např. vhodným náhřevem autogenem. Zbytkové napětí se uvolní plastickou deformací v průběhu provozu svařované součásti, nebo se může dostat do stádia, kdy jeho hodnota překročí mez pevnosti, což má za následek tvorbu trhlin a lomů (např. při nižší provozní teplotě, při rázovém zatížení, ve struktuře tvářené za studena, atd.).

1.1 Napětovo-deformační účinky

1.1.1 Napětí při svařování

Velikost napětí při svařování je úměrná velikosti tepla, které je vneseno do svaru. Lze jej vypočítat pomocí vztahu:

$$Q = U \cdot I \cdot t = R \cdot I^2 \cdot t \text{ [J]} \quad (1.1)$$

kde:

Q - teplo vnesené do svaru [J]

R - elektrický odpor [Ω]

I - svařovací proud [A]

U - svařovací napětí [V]

t - doba průchodu tepla [s]

respektive:

$$Q_s = \eta \cdot \frac{U \cdot I}{10^3 \cdot v_s} \text{ [kJ} \cdot \text{mm}^{-1}] \quad (1.2)$$

kde:

Q_s - specifické vnesené teplo [$\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$]

η - koeficient účinnosti [-]

v_s - svařovací rychlost [$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$]

Množství tohoto tepla je možné korigovat změnou svařovacího proudu a času.

- Druhy zbytkových napětí

Jelikož má vnitřní napětí při svařování objemový charakter, lze v podélném svaru určit jeho 3 osové složky, viz obr. 1.3:

Podélné napětí:

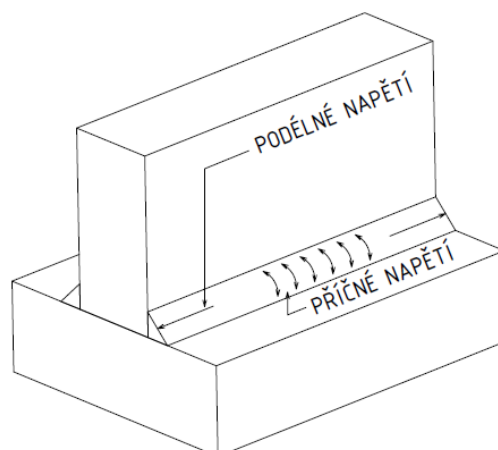
- vyskytuje se ve směru osy svaru,
- dosahuje nejvyšší hodnoty a jeho působení se dá přirovnat ke vzpěru prutu,
- při jeho působení v neutrální ose průřezu dojde pouze k velmi malému zkrácení svarku, ovšem při působení mimo tuto osu může nastat celková deformace na základě působení vzniklých ohybových momentů.

Příčné napětí:

- dosahuje nižších hodnot než podélné napětí,
- vzhledem k menší tuhosti ve směru jeho působení může způsobit místní deformace - např. úhlovou deformaci.

Napětí ve směru tloušťky:

- tuto složku napětí lze ve většině případů zanedbat.



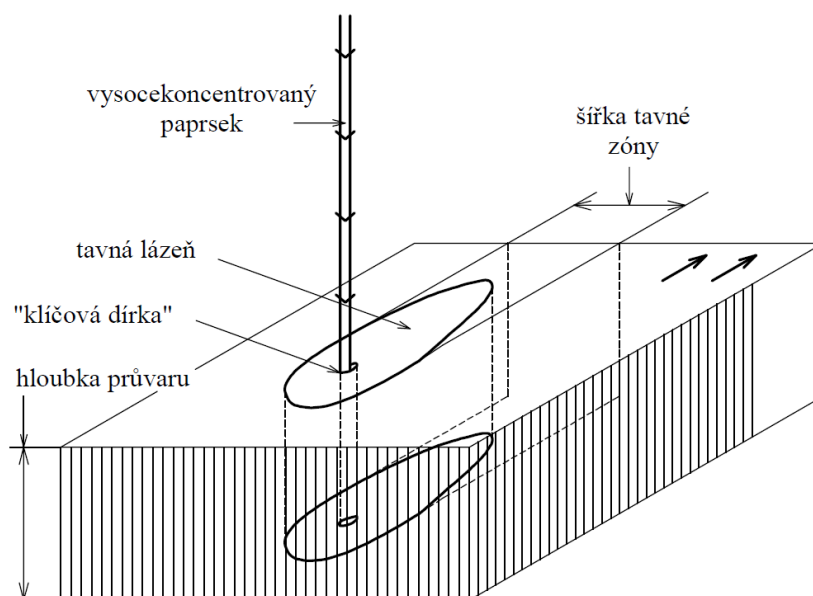
Obr. 1.3 - Osové složky zbytkových napětí [3]

1.1.2 Vlivy podporující vznik napětí

V předchozí podkapitole je uvedeno, že velikost napětí je přímo úměrná vnesenému teplu do svaru. Což je správné tvrzení, nicméně vznik a velikost napětí (a z toho plynoucí deformace) závisí i na dalších faktorech, jimiž jsou - stabilita přívodu tepla, stabilita odvodu tepla a tuhost materiálu. Všechny tyto faktory jsou níže podrobněji popsány.

- Tepelná bilance svaru

Stabilitu přívodu tepla a odvodu tepla do svaru lze souhrnně označit jako tepelnou bilanci svaru s podmínkou existence svarové lázně, která je dostatečně provařena do základního materiálu. Pokud bude například docházet k vysokému odvodu tepla, může to znamenat vznik studeného spoje, zatímco při nedostatečném odvodu tepla může dojít k protavení. Je-li svařováno koncentrovaným a intenzivním zdrojem, dochází ke vzniku menší svarové lázně, což má za následek nižší vliv odvodu tepla na stabilitu procesu a negativní důsledky jsou tím pádem minimalizovány. Příklad takového zdroje (LASER případně elektronový paprsek) je uveden na obrázku 1.4.



Obr. 1.4 - Koncentrovaný zdroj (LASER, elektronový paprsek) [3]

- Stabilita přívodu tepla

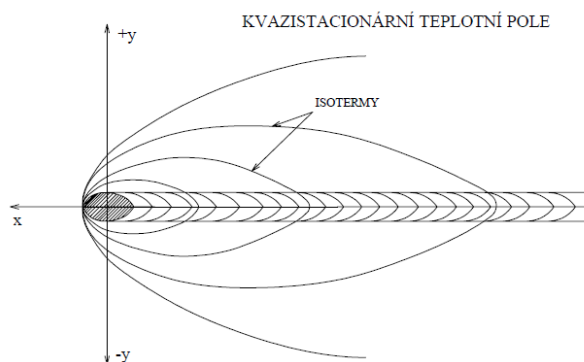
Na stabilitu přívodu tepla u elektrického oblouku má vliv proud, napětí a rychlost svařování, zejména tedy jejich stálost.

Proud zde určuje intenzitu tepla a tudíž i velikost průvaru svarové lázně do základního materiálu. Napětím lze korigovat stabilitu oblouku, jejímž ukazatelem je rozstřík. Ideálním zdrojem napětí je invertor, kterým lze docílit svařování téměř bez rozstříku v celém proudovém rozsahu s minimálním teplem vneseným do svaru. Rychlost svařování souvisí se zdrojem tepla. Pokud bude svařování prováděno vysocekoncentrovaným zdrojem, je možno svařovat vyšší rychlostí a negativní účinky tepla na svarek jsou minimální v závislosti na druhu a tloušťce materiálu.

Velkou roli zde ovšem hraje i rovnoměrnost vedení hořáku. Sebevíc zručný svářeč nedokáže ručním svařováním zhotovit tak kvalitní svar jako je tomu u mechanizovaného svařování. U ručního svařování může totiž docházet k nadměrnému vnášení tepla i přídavného materiálu do svaru.

- Stabilita odvodu tepla

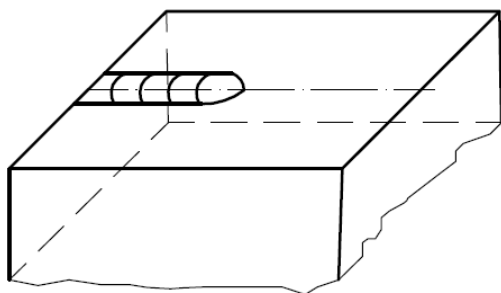
Stabilita odvodu tepla je z hlediska materiálových vlastností dána tepelnou vodivostí materiálu λ . Čím větší bude mít materiál tepelnou vodivost, tím rychleji bude schopen odvádět teplo z místa svaru a napěťovo-deformační účinek bude minimální. Což ovšem znamená použití už několikrát zmíněného vysocekoncentrovaného zdroje tepla nebo součást předebrát, aby bylo možné zhotovit svarovou lázeň s dostatečným průvarem. Je-li při svařování použit konstantní zdroj tepla, tak při jeho průchodu kterýmkoli místem svaru při neměnném odvodu tepla vytvoří jeho teplotní pole teplotní křivky. Takové pole se nazývá kvazistacionární teplotní pole, viz obr. 1.5.



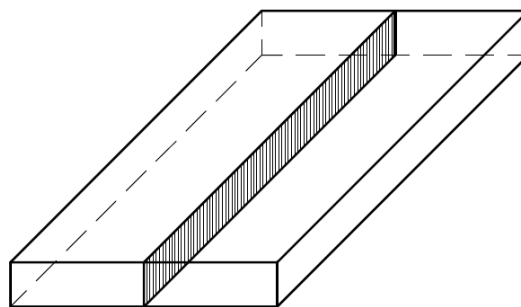
Obr. 1.5 - Kvazistacionární teplotní pole [3]

Pro simulování teplotního oblouku mohou být použity dva základní matematické modely:

1. Prvním z nich je bodový zdroj tepla, který se pohybuje rovnoměrně na ploše polokonečného tělesa, viz obr. 1.6. Takový zdroj odpovídá svařování tlustostěnného tělesa.
2. Dalším je lineární zdroj tepla, který se taktéž rovnoměrně pohybuje, ovšem v neohraničené desce a je konstantní ve směru tloušťky, viz obr. 1.7. Teplo se zde šíří jen dvěma směry s předpokladem sálání do okolí. Tento model je charakteristický nejvíce pro svařování průchozím paprskem.



Obr. 1.6 - Bodový zdroj tepla [3]



Obr. 1.7 - Lineární zdroj tepla [3]

- Tuhost

Stejně jako odvod tepla roste tuhost úměrně s tloušťkou materiálu a složitostí konstrukce. Při vyšší tuhosti představuje svařování s vyšším příkonem vyšší zbytkové napětí. Naopak při menší tuhosti, kdy je tloušťka materiálu malá, je i potřebný příkon nižší, ovšem ten vzhledem k nízké tuhosti vyvolá větší deformace. Tuhost lze rozdělit z hlediska materiálové a konstrukční stránky.

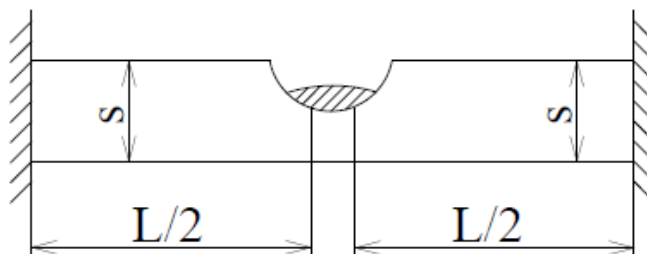
1. Materiálová stránka je závislá na tepelné roztažnosti α a také na hodnotách meze kluzu R_E , modulu pružnosti E a meze pevnosti R_m .
2. Konstrukční stránku je možno vyjádřit tzv. koeficientem intenzity tuhosti K .

$$K = \frac{E \cdot s}{L} \quad (1.3)$$

kde:

- K- koeficient intenzity tuhosti [-]
- E - modul pružnosti v tahu [MPa]
- s - tloušťka materiálu [mm]
- L - délka upnutí [mm]

Vzorec, který je zde uveden, slouží pro výpočet tuhosti jednoduchého svařeného oboustranně upnutého nosníku, viz obr. 1.8.



Obr. 1.8 - Oboustranně upnutý nosník [3]

1.2 Deformace

Deformace při svařování vznikají na základě působení vnitřních napětí ve svaru. Jak již bylo zmíněno výše, deformace se rozdělují podle napětí, která je vyvolají, na celkové deformace a místní deformace. Jelikož je tato práce zaměřena na jednu z místních deformací (úhlovou deformaci), mezi které lze zahrnout i příčnou deformaci a podélnou deformaci, je důležité si ji popsat. Úhlová deformace je nejznámější místní deformací, která je vyvolaná příčným napětím. Při svařování dvou desek koutovým svarem se úhlová deformace projeví smrštěním horní desky ve směru kladení svarové housenky, viz obr. 1.9

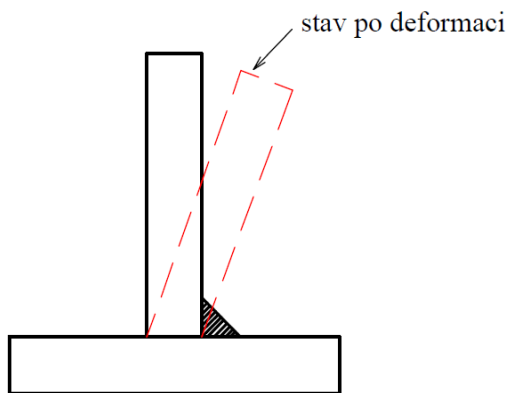
- Úhlová deformace

Tuto deformaci svaru je možno brát jako jistý druh příčné deformace. Vznik této deformace je zapříčiněn nerovnoměrným rozdělením teploty podél tloušťky materiálu a doprovodnými místními plastickými deformacemi, které vznikají v průběhu ohřevu, což má za následek rozdíl v příčném smrštění v jednotlivých vrstvách kovu. Výsledkem je natočení svařovaných dílů kolem osy svaru. Značný vliv na úhlovou deformaci má i způsob a pořadí kladení svarových housenek a také úhel rozevření svarových ploch. Pro tupý svarový spoj lze dosáhnout minimální úhlové deformace za předpokladu, že je svařováno do úzké mezery. Na obrázku 1.10 je uveden vývoj úhlové deformace X svaru. Úhlové deformace u koutových svarů závisí na poměru tloušťky svaru k tloušťce desky a také na jeho tepelném ovlivnění a způsobu svařování. Jsou-li desky svařovány více vrstvami koutového svarového spoje, dojde k větší úhlové deformaci než při svaření spoje s menším počtem vrstev a to za předpokladu stejných průřezů konečného svaru v obou těchto případech. Závislost poměru tloušťky svarového spoje k tloušťce desky je znázorněna na obrázku 1.11.

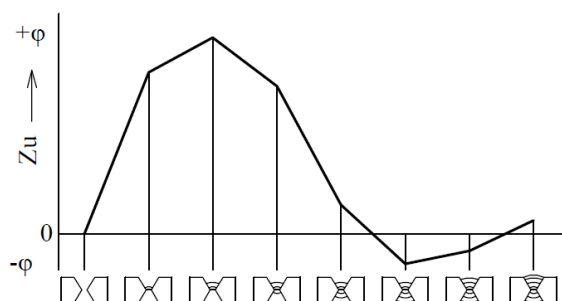
Úhlové deformace mohou být tedy způsobeny zejména:

- na základě jednostranného působení zdroje tepla,
- řešením úkosu, hlavně tedy jeho rozevřením,
- při použití vícevrstvého svaru.

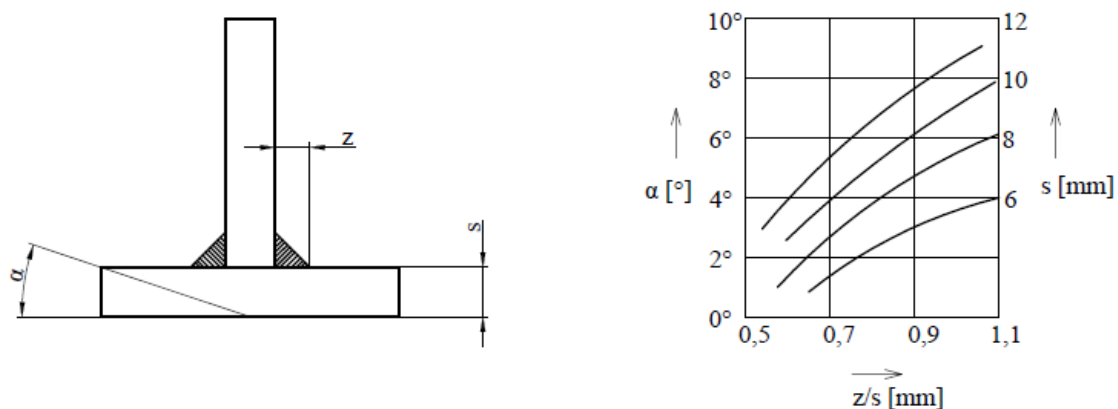
Úhlová deformace je velmi nežádoucím jevem doprovázejícím svařování, jelikož jako taková způsobuje změnu tvaru svařované součásti. Proto je vhodné předcházet těmto deformacím, protože jejich pozdější odstranění je poměrně náročné, viz kap. 1.2.1.



Obr. 1.9 - Smrštění desky [2]

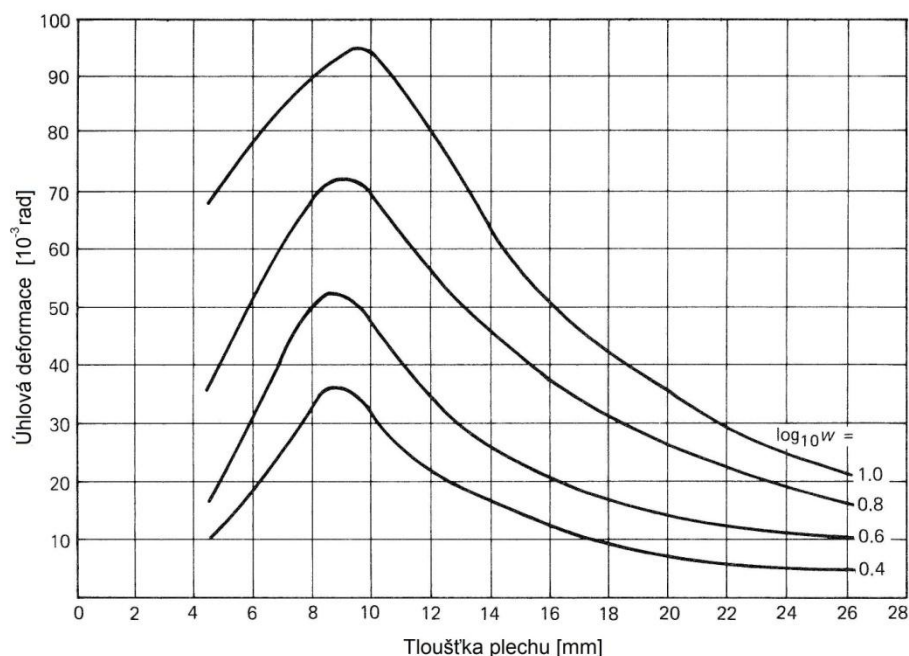


Obr. 1.10 - Vývoj úhlové deformace X svaru [1]



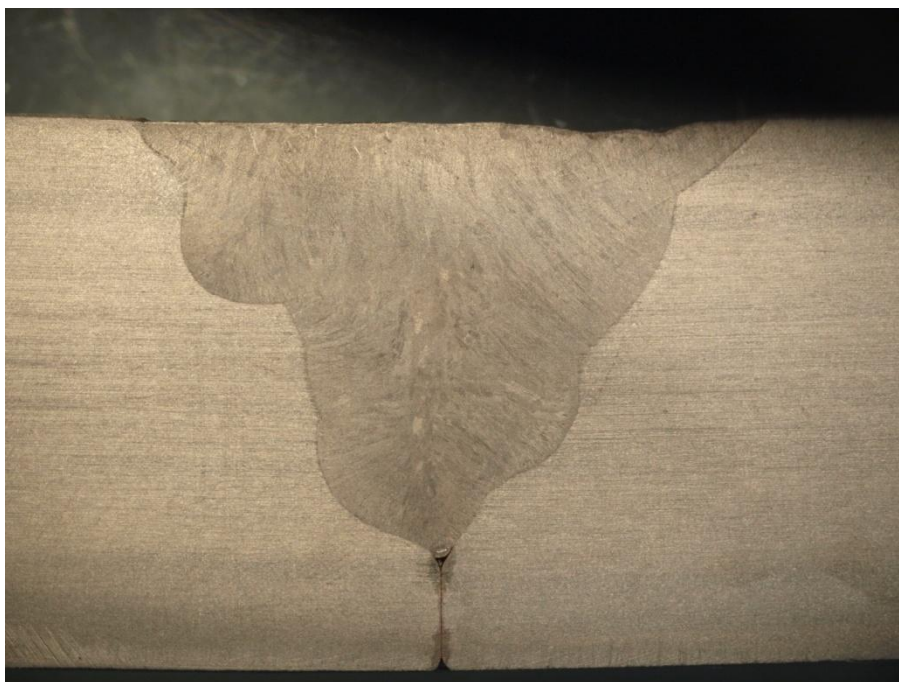
Obr. 1.11 - Závislost úhlové deformace na poměru tloušťky svarového spoje k tloušťce desky [4]

Podle jiné metody lze úhlovou deformaci určit na základě spotřebované elektrody na 1mm délky svaru vůči tloušťce plechu. Na obrázku 1.12 je možné pozorovat průběhy úhlových deformací, kterých bylo dosaženo na základě experimentálního měření při svařování nízkouhlikové konstrukční oceli obalenou elektrodou, jejíž průměr byl 5mm. Jak je možné vidět, tak nejvyšších hodnot dosahuje úhlová deformace při tloušťce materiálu, která se pohybuje okolo 9mm. Naopak u plechů nižších tloušťek, které byly svařeny za stejných podmínek, byla výsledná deformace nižší. To bylo zapříčiněno rovnoměrnějším tepelným ovlivněním ve směru tloušťky materiálu. U plechů, jejichž plocha dosahovala větších hodnot než 9mm, byl pokles deformace ještě markantnější z toho důvodu, že s rostoucí tloušťkou materiálu vzrostla i tuhost svařované součásti.



Obr. 1.12 - Úhlová deformace v závislosti na tloušťce plechu a délce housenky[11]

Úhlovou deformaci tupého svaru lze poměrně jednoduše určit i na základě vyhodnocených makroskopických snímků, viz obr. 1.13. Způsobů, jak určit z takto pořízené fotografie úhlovou deformaci svaru, je celá řada. Jednou z nich je nanesení rastru na fotografii a v příslušném měřítku získat požadovaný úhel smrštění. To se dá provést pomocí výpočtové techniky, kdy je rastr nanesen automaticky a vyhodnocení proběhne za pomoci počítače. Druhou možností, jak nanést rastr na fotografii a zejména provést vyhodnocení, je ruční nanesení rastru taktéž v měřítku. Pro získání úhlu deformace se poté použijí goniometrické funkce, nebo některá z ověřených metod.

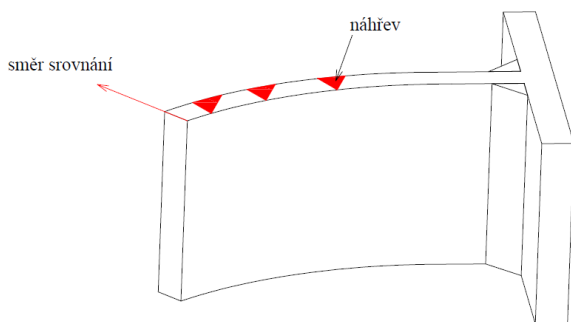


Obr. 1.13 - Makroskopický snímek tupého svaru [12]

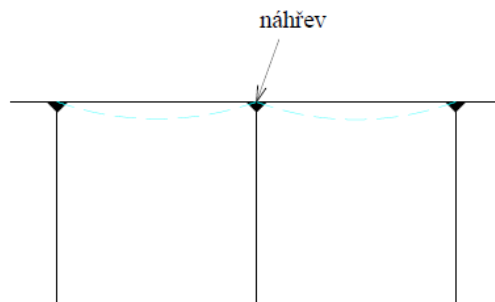
Obě tyto možnosti jsou prakticky ověřeny v experimentální části této práce, viz kapitola 3. Makroskopický snímek, který je zobrazen výše a na kterém bude posléze demonstrováno praktické ověření, je převzat z experimentu pana Martina Bočka a byl použit s jeho výslovným souhlasem.

1.2.1 Způsoby minimalizování napětí a deformací

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, je odstranění deformací vzniklých po svařování velmi obtížné a mnohdy časově náročné. Proto je vhodné zavést taková opatření, aby se deformacím předcházelo. Ještě před samotným svařováním se musí určit technologie a postup svařování. Konstrukce, které jsou složené z velkého počtu složitých dílů, je vhodné konstruovat z podskupin (podsestav). Tyto podskupiny se nejprve skládají stehováním a až v sestehovaném stavu se poté svařují. Konečnou konstrukci (svařenec) je výhodnější svařit až z připravených svařených podskupin. Úhlovým deformacím se často zamezuje nastavením opačné deformace při skládání určené pomocí výpočtů, kdy se při svaření svarek smrští do požadované polohy. Dále lze úhlové deformace zmenšit, pokud je svařování vrstvy svaru prováděno kývavým pohybem, což vyvolá menší deformaci než svařování svaru více housenkami. Velký vliv na konečnou deformaci má konstruktér, který například konstruuje pro jednotlivé svařované podskupiny svařovací přípravky nebo určí maximální potřebný počet a velikost svarů. Při svařování v přípravku ovšem vzroste napětí a tudíž se musí následně celá konstrukce vyžít, aby se toto napětí odstranilo. Žihání se provádí buďto v peci nebo vibrační metodou, která je z hlediska času potřebného k vyžihání a také z hlediska finančních nákladů výhodnější. Pokud přece jen dojde k deformaci, tak její odstranění probíhá rovnáním nejčastěji náhřevy autogenem, které se provádí tak, aby se deformovaná část smrštila do požadované polohy, jak znázorňují obrázky 1.14 a 1.15. Při svařování nelze bohužel nikdy docílit toho, aby byla zcela odstraněna deformace a zároveň byl potlačen vznik napětí. Níže jsou popsána některá opatření, která potlačují vznik napětí a deformací před započítím svařování nebo je případně pomáhají odstranit po svaření.



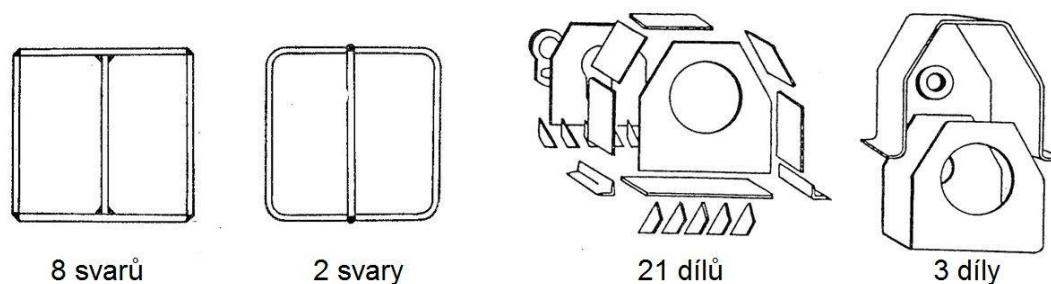
Obr. 1.14 [2]



Obr. 1.15 [2]

- Technologičnost konstrukce

Co se týče technologičnosti konstrukce, má hlavní slovo konstruktér. Ten může rozhodnout, z jakého počtu jednotlivých dílů se bude skládat výsledná konstrukce a jakou tloušťku a rozměry budou mít dané díly. Toto všechno má na výsledné napětí, potažmo deformace, velký vliv. Pokud totiž bude konstrukce příliš složitá, bude to znamenat nárůst tuhosti. Stejně tak tomu bude, pokud bude mít materiál příliš velkou tloušťku. I odvod tepla závisí na jmenovaných hodnotách a taktéž zde hraje významnou roli. Při velké tuhosti je nutné při svařování použít vyšší příkon, což má za následek vznik zbytkového napětí. Naopak při velkém odvodu tepla je možné svařovat příkonem nižším, ten ale vyvolá velké deformace. Z hlediska výsledné konstrukce je možné tomu předejít. Pokud její část, skládající se například z několika svařených částí, lze nahradit plechem, který se v místech, kde by měl figurovat svar, ohne. Tím se výrazně zredukuje počet dílů, čímž klesne výsledná tuhost a odvod tepla, viz obr. 1.16. Minimalizuje se tím i počet svarů.



Obr. 1.16 - Nahrazení velkého počtu dílů třemi výlisky [11],[3]

- Dopad technologie

Kromě konstrukčního hlediska má podíl na vzniku napětí a deformace i technologie. Nejdůležitějším jevem, který ji reprezentuje, je intenzita procesu nebo-li koncentrace napětí. K dosažení vyšší koncentrace je nutné použít zdroj s vyšším příkonem a vzhledem k tomu, že je tento zdroj koncentrován, působí tak na menší ploše svaru. Což poskytuje možnost svařovat do užších mezer mezi svarovými plochami, čímž pádem je možné svařovat vyšší rychlostí. Tyto poznatky směřují k tomu, že ve výsledku dochází k nižšímu vnášení tepla do svaru a tudíž je minimalizován vznik napětí a deformace. Toto vše má na starosti technolog. Přípravou vhodného technologického postupu, který obsahuje informace od přípravy výroby přes stehování až po samotné svařování, může ovlivnit vznik zmíněných jevů. Při svařování sestav se vychází z dvou hledisek - potlačení vzniku deformace nehledě na vznik vnitřního pnutí a potlačení obojího. Na základě toho se používají dva postupy při svařování:

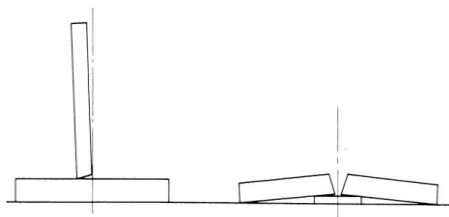
- sestava napevno,
- volná sestava.

V prvním případě se všechny součásti vyztuží (nejlépe v tuhém přípravku), přičemž stehování je prováděno od kraje ke středu sestavy. Následné svařování je realizováno v opačném směru z toho důvodu, aby svary na kraji sestavy, které mohou zapříčinit celkovou deformaci, byly svařeny nakonec. Tímto postupem je zajištěna celková rozměrová stabilita, ale jen za cenu vzniku zbytkových napětí. U tzv. volné sestavy se využívá při stehování předehtnutí a předehtnutí. To může být uskutečněno jak od středu sestavy k okraji, tak směrem opačným, viz obr. 1.17, přičemž první varianta je výhodnější. Okraje se rovnají snadněji než prostředek. Tím se dá poměrně snadno docílit odstranění deformací při potlačení vzniku zbytkových napětí. Následné svařování se provádí od svarů, které jsou nejvíce vzdáleny od neutrální osy, směrem ke středu. Nutnost rovnání přitom klesá.

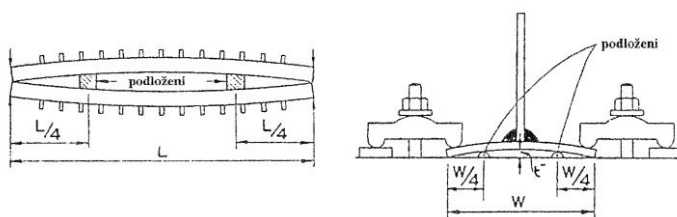


Obr. 1.17 - Způsoby stehování u volné sestavy [3]

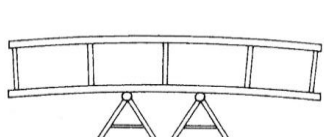
Pro řízení napětí a deformací se v praxi používá spousta dílenských způsobů. Jedním z nich je přednastavení plechů. To je založeno na nastavení dvou plechů, respektive jejich rozevření tak, aby se po jejich svaření smrštily do požadované polohy, viz obr. 1.18. Dalším způsobem je předehtnutí. V principu se jedná o velmi podobný způsob. Před svařením se díl, který má být svařen, ohne, aby se po svaření vyrovnal, jak je požadováno, viz obr. 1.19. Jeho specifickým typem je předehtnutí pomocí gravitace. Je to typ předehtnutí, který se využívá při svařování nosníků, viz obr. 1.20.



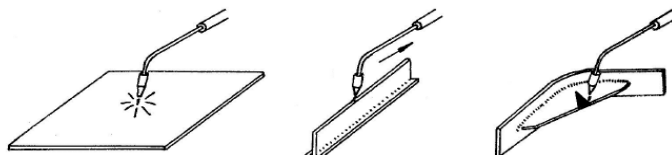
Obr. 1.18 - Způsoby přednastavení [3],[11]



Obr. 1.19 - Ukázky předehtnutí [3], [11]



Obr. 1.20 - Gravitační způsob [3], [11]



Obr. 1.21 - Typy náhřevů zleva - bodový, pásmový, klínový [3], [11]

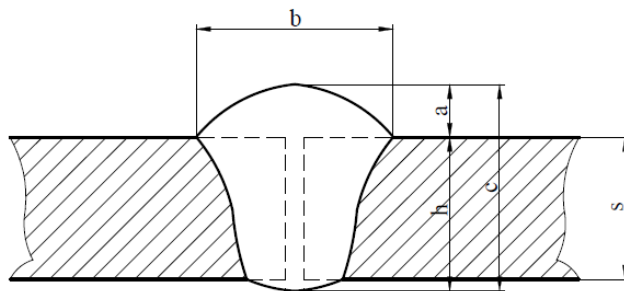
- Eliminování deformací

Pokud se součást vlivem svařování zdeformuje, tak je možné dosáhnout jejího požadovaného tvaru dvěma způsoby - buďto mechanicky (ručně, nebo za pomoci lisu), nebo jejím zahřátím. První způsob se provádí za studena a celkové vyrovnání součásti trvá poměrně dlouho v důsledku náročnosti, proto není z tohoto hlediska příliš vhodné. Při rovnání teplem se vychází ze stejného jevu, jehož působení má za následek vznik deformace při svařování. Pokud je materiál ohříván, tak v důsledku tohoto ohřátí nastane zvětšení jeho objemu. Takto ohřátý materiál se napěchovává na okolní materiál s nižší teplotou, přičemž dochází k jeho roztažení ve směru tloušťky, jelikož v tomto směru je pro jeho roztažení kladen nejmenší odpor. Při procesu chlazení se poté materiál smrští ve všech směrech najednou. To má za následek jeho zkrácení v místě ohřevu. Pro nahřívání součástí existují tři základní typy náhřevů, viz obr. 1.21.

Bodovým ohřevem lze provést rovnání svařených součástí kývavým pohybem hořáku u místa největší deformace do doby, než toto místo dosáhne třešňové barvy. Pásmovým ohřevem je možné odstranit deformace vzniklé svařováním koutových svarů. Zde je hořák veden podél svaru v určité délce od něj, přičemž je nutné s náhřevem přestat při dosažení již zmíněné třešňové barvy ohřívané plochy. Klínovým ohřevem se odstraňují deformace robustnějších konstrukcí a opět je zde doporučeno při náhřevu rozkývání hořáku. Celý proces lze uspišit silovým působením (boucháním kladivem, gravitací), nebo chlazením vodou případně stlačeným vzduchem. Ohřevy jako takové jsou velmi specifickou záležitostí a dosažení kvalitního ohřevu, kterým se docílí vyrovnání součásti, závisí hlavně na zručnosti a zkušenostech daného pracovníka.

1.3 Technologické parametry svařování

Důležitými parametry, které ovlivňují vznik napětí při svařování, jsou napětí, proud a rychlost svařování. Tyto parametry byly v souvislosti se vznikem napětí popsány v kapitole 1.1.2. Ovšem všechny zde zmíněné parametry ovlivňují kromě vzniku napětí při svařování také formu svaru, která může mít vliv na následné deformace. Například u svařování elektrickým obloukem se jedná o následující charakteristické rozměry svaru, viz obr. 1.22.



Obr. 1.22 - Charakteristické rozměry svaru [9]

kde: h - hloubka průvaru do základního materiálu [mm]

a - převýšení svaru [mm]

b - šířka svaru [mm]

Následné chemické složení, struktura materiálu a mechanické vlastnosti svaru jsou závislé na hodnotě součinitele formy svaru. Tento součinitel se dá spočítat pomocí vztahu:

$$\Phi = \frac{b}{h} \quad (1.4)$$

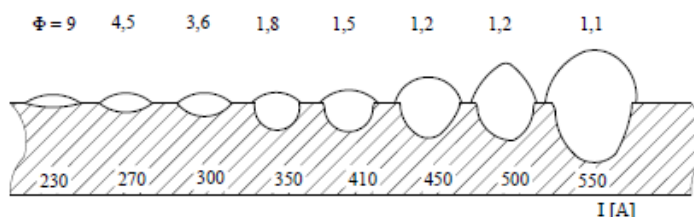
Rozměry svaru a forma svaru se poté odvíjí od velikosti tepla, která závisí právě na svářecím proudu, svářecím napětím a rychlosti svařování. Kromě těchto parametrů, které jsou hlavními ovlivňujícími parametry, jsou i parametry vedlejší, které mají také svůj podíl na konečném rozměru svaru, respektive formě svaru. Hlavní a vedlejší parametry tedy jsou:

- | | |
|----------------------|--|
| hlavní parametry - | svařovací proud [A] |
| | napětí na oblouku [V] |
| | rychlost svařování [m/hod] |
| vedlejší parametry - | průměr svařovacího drátu [mm] |
| | sklon elektrody [°] |
| | sklon základního materiálu [°] |
| | vyložení svařovacího drátu [mm] |
| | charakter svařovacího proudu a jeho polarita |
| | druh tavidla a jeho zrnitost |

Níže jsou podrobněji popsány vlivy jednotlivých hlavních parametrů na výslednou formu svaru.

- Vliv svařovacího proudu

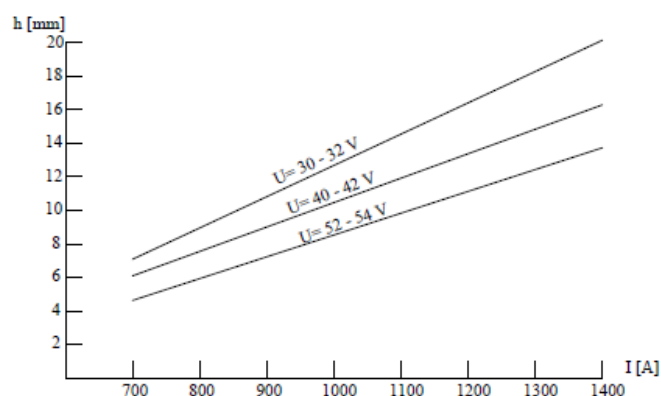
Proudem lze u svařování korigovat intenzitu tepla, tudíž i velikost průvaru svarové lázně do základního materiálu. Tento děj je přímo úměrný, což znamená, že s rostoucím proudem roste i intenzita vneseného tepla a vzniká větší množství nataveného kovu. To má za následek hlubší průvar svarové lázně do základního materiálu, čímž se na základě vzorce 1.4 zmenšuje součinitel formy svaru. Tím poté dojde k růstu převýšení svarového kovu, viz obr. 1.23.



Obr. 1.23 - Vliv velikosti svařovacího proudu na změnu formy svaru [9]

- Vliv velikosti napětí

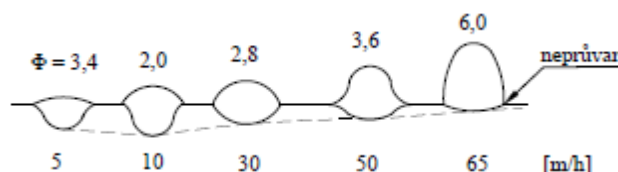
Napětím je možné měnit stabilitu oblouku, jejímž ukazatelem je rozstřík. Působí-li teplo vzniklé v elektrickém oblouku na rozsáhlé ploše materiálu, má to za následek zmenšení hloubky protavení a zvětšení šířky svarové housenky, viz obr. 1.24. Napětí se poté určí v závislosti na proudu tak, aby se získal potřebný součinitel formy svaru.



Obr. 1.24 - Vliv velikosti napětí na oblouku na hloubku provaření svarové housenky [9]

- Vliv velikosti rychlosti svařování

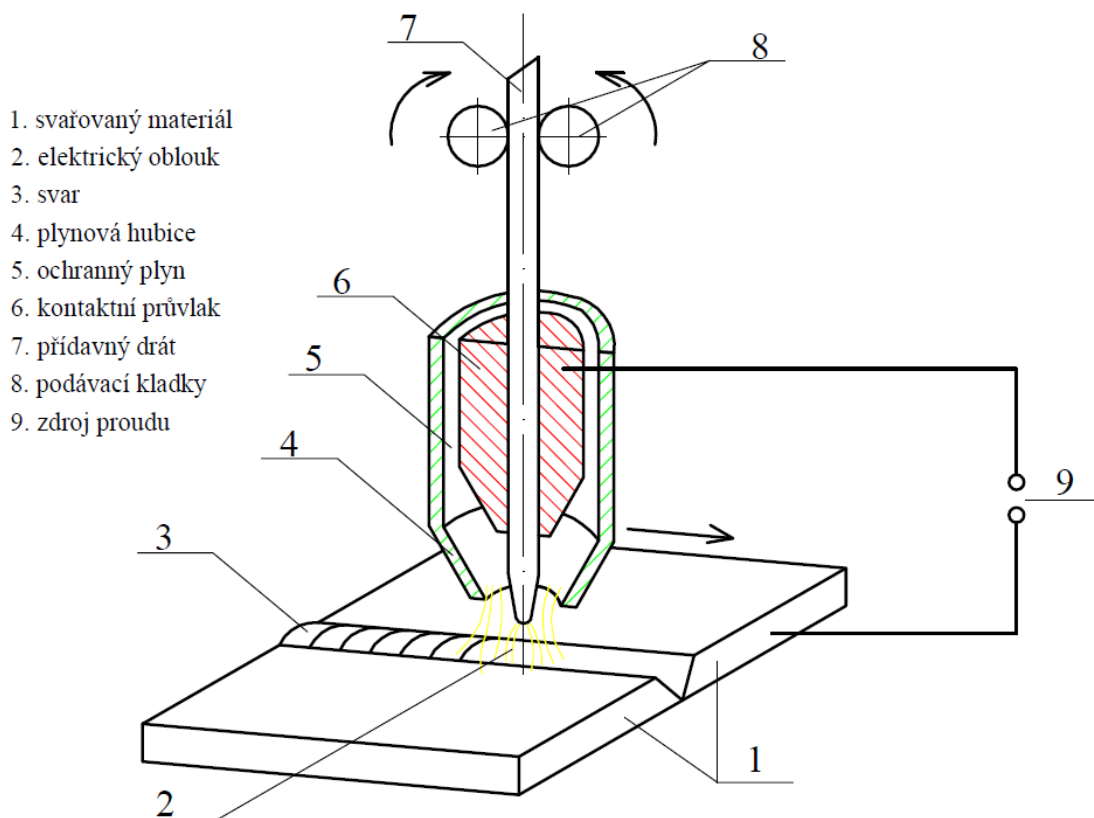
Nemění-li se svařovací napětí a svařovací proud, tak se změnou svařovací rychlosti docílí změny velikosti vneseného tepla na jednotku délky svaru. Je-li rychlost svařování malá, hoří oblouk prakticky kolmo a natavení materiálu je dostatečné. Při vyšší rychlosti není toto teplo schopné natavit svarovou plochu, čímž může docházet až k tvorbě neprůvaru, viz obr. 1.25.



Obr. 1.25 - Vliv rychlosti svařování na koeficient formy svaru [9]

2 SVAŘOVÁNÍ METODOU MIG/MAG [6], [7], [9], [10]

Vzhledem k tomu, že byla součástí, na které byl prováděn experiment, svařována právě metodou MIG/MAG, je vhodné ji na základě této skutečnosti zmínit a popsat její princip. Jedná se o metodu, která vznikla sloučením metody MIG (což je metoda obloukového svařování tavící se elektrodou v atmosféře inertního ochranného plynu) s metodou MAG (což je taktéž metoda obloukového svařování tavící se elektrodou, ale v atmosféře aktivního ochranného plynu). Princip svařování, který je zobrazen na obrázku 2.1, zde spočívá v tom, že při započetí procesu se zapálí oblouk, který hoří mezi tavící se elektrodou (přídavným drátem) a základním materiálem, přičemž jeho hoření může probíhat v atmosférách obou již zmíněných plynů. Do drátu je dodáván elektrický proud pomocí třecího kontaktu, který je umístěn v ústí hořáku, aby byl drát elektricky zatížen na co nejmenším úseku. Následné podávání drátu je prováděno podávacími kladkami, které mohou být situovány v podavači nebo ve vlastním hořáku. Existuje i možnost kombinace obou systémů, kdy je drát podáván z cívky.



Obr. 2.1 - Princip svařování metodou MIG/MAG [9]

Touto metodou se dají svařovat nejrůznější druhy materiálů. Nejčastěji to jsou nelegované, nízkouhlíkové a nízkolegované materiály. Na základě svařovaného materiálu se poté volí příslušné ochranné plyny.

2.1 Ochranné plyny

Nejdůležitější funkcí ochranných plynů je chránit svarovou lázeň před přístupem vzduchu. Ten působí negativně na výslednou lázeň a může velmi výrazně zhoršit mechanické vlastnosti svarového spoje. Dále příznivě ovlivňují zapálení a hoření oblouku a také stabilitu procesu svařování jako takového. Při svařování metodou MIG/MAG se jako základní složky ochranných plynů používají argon (Ar) a oxid uhličitý (CO₂). Argon (Ar) je stále častěji doplňován tzv. doplňkovými složkami, se kterými tvoří vícesložkové ochranné plyny. Jsou jimi oxid uhličitý (CO₂), kyslíky (O₂) a hélium (He). Přičemž přidáním prvních dvou zmíněných složek se docílí zvýšení stability oblouku a naproti tomu hélium zvýší tepelný výkon při svařování. Vhodným složením směsi plynu lze docílit lepší stability svařovacího procesu, snížení rozstříku a zvýšení produktivity svařování. Musí se ale brát zřetel na náchylnost jednotlivých materiálů na oxidaci. Ochranné plyny používané u metody MIG/MAG se dají rozdělit podle mnoha kritérií. Základním kritériem pro jejich rozdělení je počet složek, ze kterých se daný plyn skládá. Rozdělení je poté následující:

- jednosložkové ochranné plyny (Ar, He, CO₂),
- dvousložkové ochranné plyny (Ar + CO₂, Ar + O₂, Ar + He),
- třísložkové ochranné plyny (Ar + CO₂ + O₂, Ar + He + CO₂, Ar + He + O₂),
- čtyřsložkové ochranné plyny (Ar + He + CO₂ + O₂).

Dalším faktorem pro rozdělení ochranných plynů je jejich chemická aktivita. Na jejímž základě se plyny dělí na:

- inertní plyny - skupina I (Ar, He, směsi Ar + He),
- oxidační plyny na bázi argonu - skupina M (směsi Ar + CO₂, Ar + O₂, Ar + CO₂ + O₂, Ar + He + CO₂ + O₂),
- redukční plyny na bázi argonu - skupina R (směsi Ar + H₂, N₂ + H₂),
- oxidační plyny na bázi oxidu uhličitého - skupina C (CO₂, směsi CO₂ + O₂),
- nereagující plyny - skupina F (N₂).

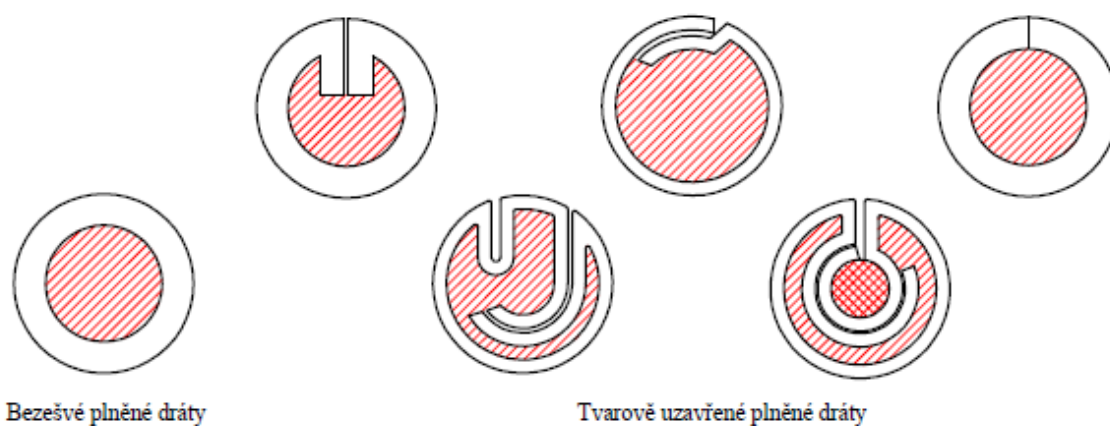
Nejčastějšími ochrannými plyny při MIG/MAG svařování jsou oxidační plyny na bázi argonu (skupina M). Ty se potom na základě procentuálního zastoupení jednotlivých prvků dělí do těchto podskupin:

- mírně oxidační plyny - podskupina M1 (směsi argonu s přísadami max. 5 % CO₂, nebo max. 3 % O₂),
- středně oxidační plyny - podskupina M2 (směsi argonu s přísadami 5 - 25 % CO₂, nebo 3 - 10 % O₂),
- silně oxidační plyny - podskupina M3 (směsi argonu s přísadami 5 - 50 % CO₂, nebo 10 - 15 % O₂).

2.2 Přídavné materiály

Použití konkrétního přídavného materiálu u metody MIG/MAG závisí na druzích materiálů, které jsou svařovány. Mezi tyto materiály lze zařadit uhlíkové, střednělegované a vysokolegované oceli, dále také slitiny hliníku mědi a niklu. Základní druhy přídavných materiálů (dle tvaru průřezu drátu) jsou plné dráty a plněné dráty (trubičkové dráty). Škála vyráběných průměrů plných drátů je následující - 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,6; 2,0; 2,4 mm, přičemž rozmezí nejvíce používaných průměrů je mezi 0,8 - 1,6 mm. Plněné dráty jsou v dnešní době vyráběny ve dvou základních skupinách, viz obr. 2.2. Těmito skupinami jsou:

- bezešvé plněné dráty
- tvarově uzavřené plněné dráty



Obr. 2.2 - Typy plněných drátů [9]

Průvod drátu, ať už plného nebo plněného, je uskutečňován pomocí cívek, na které je namotán, viz obr. 2.3. Ty jsou vyráběny na základě rozměrů a hmotností drátů v následujícím rozmezí - 5, 6, 10, 12, 16, 18, 25, 30 kg. Možné je také dodávat drát ze svitku o hmotnosti 200 kg, což je výhodné zejména pro robotizovaná pracoviště, jelikož je tím zajištěno svařování v delším časovém horizontu bez nutnosti přerušení.



Obr. 2.3 - Cívka [6]

- Zdroj svařování

Svařování při experimentu, který je obsažen v kapitole 3, probíhalo pomocí svařovacího zdroje značky Fronius - TransPuls Synergic 4000, viz obr. 2.4 a 2.5, což je právě zdroj MIG/MAG, který je řízený pomocí mikroprocesoru a umožňuje svařovat krátkým, rozstříkovým a impulzním obloukem. Základní parametry stroje jsou zobrazeny v tabulce 1.



Obr. 2.4



Obr. 2.5[7]

Svařovací zdroj značky Fronius - TransPuls Synergic

Tab. 1 - Parametry zdroje Fronius - TransPuls Synergic 4000 [6]

Sít'ové napětí	Jištění	Svařovací proud při zatížení			Přepínání stupňů	Rozměry d x š x v
-	-	50%	60%	100%	-	-
3x400 V	35 A	400 A	365 A	320 A	plynulé	625x290x480mm

Informace, které byly uvedeny v předchozích kapitolách, byly důležitým předpokladem k tomu, aby mohlo být přikročeno k experimentu, který měl za cíl prakticky ověřit vliv parametrů svařování na chování svařované součásti a jehož průběh je popsán v následující kapitole.

3 EXPERIMENT [5], [8], [11], [12]

Součást, na které se demonstroval vliv parametrů svařování na následné úhlové deformace, se skládala ze dvou plechů, které bylo nutné nejprve nařezat na pásové pile. Po nařezání se plechy nastehovaly kolmo na sebe do tvaru „T“ a připevnily do přípravku, který je možné vidět na obrázcích 3.1 a 3.2, v němž probíhalo samotné svařování. Materiál obou plechů byl z neušlechtilé konstrukční oceli s označením podle ČSN 11 373 a jeho tloušťka byla 10 mm. Vzhledem k chemickému složení, viz tabulka 2, se jedná o ocel, která se dá snadno svařovat, tudíž nebylo potřeba zavést žádná opatření před samotným svařováním. To bylo prováděno mechanizovaně rychlostí 55 cm.min^{-1} při nastaveném proudu, který se v průběhu experimentu měnil. Napětí, jehož hodnotu si nastavil zdroj sám na základě hodnoty proudu, taktéž nebylo při provádění měření stejné. Průměr drátu, kterým se svařovalo, byl 0,8 mm. Pro větší přehlednost jsou všechny parametry svařování zaneseny v tabulce 3. Celkem bylo provedeno navaření třech svarových housenek, přičemž měření velikosti výchylky probíhalo po navaření každé housenky zvlášť.



Obr. 3.1



Obr. 3.2

Přípravek, ve kterém probíhalo svařování

Tab. 2 - Chemické složení oceli 11 373 [5]

C [%]	Mn [%]	Si [%]	P [%]	S [%]	N [%]	Al [%]
max. 0.170	-	-	max. 0,045	max. 0,045	max. 0,007	-

Tab. 3 - Parametry svařování a hodnoty výchylek

	$v_s [\text{cm.min}^{-1}]$	I [A]	U [V]	$\Delta x [\text{mm}]$	$\alpha [^\circ]$
1. housenka	55	216	27,6	1,5	0°29'28,01''
2. housenka	55	218	29,2	2,5	0°49'6,74''
3. housenka	55	209	27,6	0,5	0°9'49,33''
celkové Δx				4	1°28'24,08''

Přepočet výchyly z milimetrů na stupně byl proveden pomocí jednoduchého goniometrického vztahu:

$$\sin \alpha = \frac{\Delta x}{l} \quad (3.1)$$

kde: Δx - výchylka naměřená pomocí měřicího zařízení [mm]

l - délka ukazatele - tomto případě 175 mm

z toho vyplývá:

$$\alpha = \arcsin \cdot \frac{\Delta x}{175} [^\circ] \quad (3.2)$$

Výpočty smrštění po navaření jednotlivých svarových housenek mají poté následující podobu:

1. housenka:

$$\alpha_1 = \arcsin \cdot \frac{\Delta x_1}{175} = \frac{1,5}{175} = 0^\circ 29' 28,01''$$

2. housenka:

$$\alpha_2 = \arcsin \cdot \frac{\Delta x_2}{175} = \frac{2,5}{175} = 0^\circ 49' 6,74''$$

3. housenka:

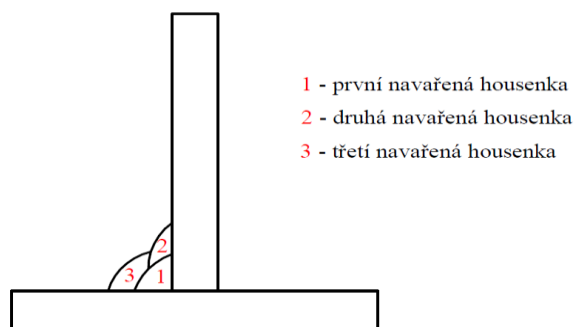
$$\alpha_3 = \arcsin \cdot \frac{\Delta x_3}{175} = \frac{0,5}{175} = 0^\circ 9' 49,33''$$

Výsledné smrštění se rovná součtu jednotlivých elementárních smrštění:

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 \quad (3.3)$$

$$\alpha = 0^\circ 29' 28,01'' + 0^\circ 49' 6,74'' + 0^\circ 9' 49,33'' = 1^\circ 28' 24,08''$$

Největší smrštění bylo změřeno po navaření druhé housenky, což je zapříčiněno způsobem navařování jednotlivých vrstev, viz obr. 3.3.

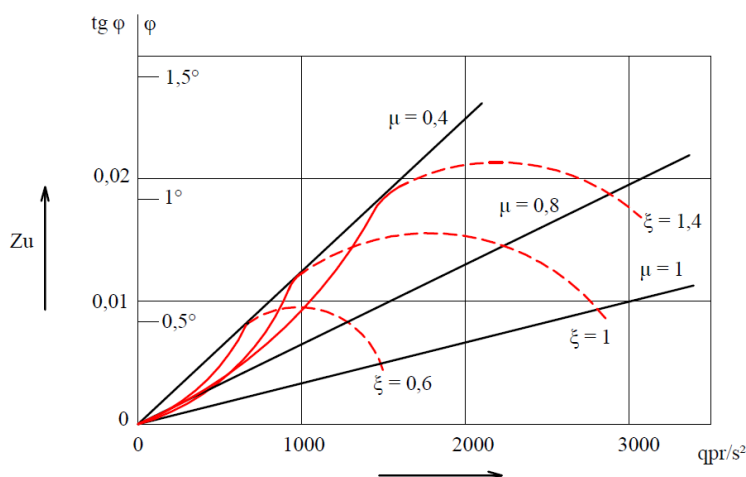


Obr. 3.3 - Postup navaření jednotlivých housenek

Po provedení experimentu, odečtení jednotlivých hodnot na úchylkoměru a jejich následném přepočítání, byly tyto hodnoty zaznamenány do tabulky, aby poté mohly být porovnány s hodnotami získanými na základě provedení výpočtů a odečtení hodnot z grafu. V následující kapitole je výpočtem ověřena a porovnána hodnota výchylky získané z provedeného experimentu, kde byly postupně navařeny tři koutové svary. Aby bylo v experimentální části zahrnuto i praktické ověření úhlové deformace tupého svaru, byl použit vyhodnocený makroskopický snímek z práce pana Martina Bočka.

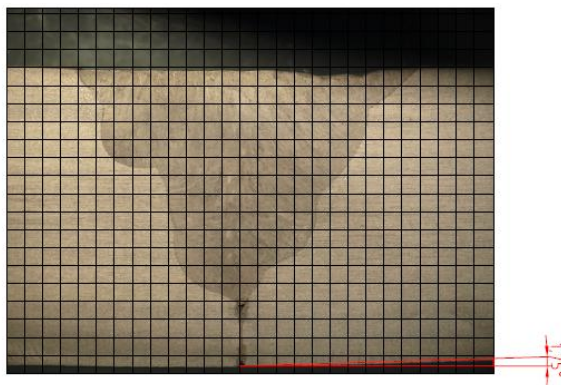
3.1 Teoretický výpočet úhlových deformací

V první části této kapitoly je provedeno spočítání a následné ověření úhlové deformace tupého svaru. K tomu byl použit již zmíněný makroskopický snímek. Jako první je proveden výpočet pomocí jednoduchého goniometrického vztahu, který je posléze ještě doplněn výpočtovou metodou, tím se docílilo ověření výsledné hodnoty natočení více způsoby. Touto výpočtovou metodou je metoda podle Okerbloma. Na základě této metody se úhlové deformace tupých svarů stanoví výpočtem poměrné energie, která je potřebná na roztavení základního materiálu, a také pomocí tvaru návaru a tvaru svaru. Na obrázku 3.4 je znázorněna závislost úhlové deformace na poměrné energii k tloušťce materiálu.



Obr. 3.4 - Závislost úhlové deformace na poměrné energii k tloušťce materiálu [8]

Úhlovou deformaci tupého svaru lze tedy poměrně jednoduše určit na základě vyhodnocených makroskopických snímků, viz obr. 3.5. Na tuto fotografii byl umístěn rastr v měřítku 1:5, z něhož se dal výsledný úhel zakótovat v programu AutoCAD nebo posléze i ověřit výpočty.



Obr. 3.5 - Určení úhlové deformace tupého svaru pomocí rastru [12]

Ačkoliv byla fotografie zvětšena, tak to nebránilo zavedení rastru, zvolení měřítka a ověření výpočtem. Do již zmíněného programu byla vložena fotografie, jejíž délka a šířka se zakótovaly a jejich výsledné hodnoty byly ve stejném pořadí 135 mm a 100 mm. Proto bylo zvoleno měřítko 1:5 (1 díl rastru = 5 mm ve skutečnosti). Poté již jen stačilo spočítat počet polí ve svislém a vodorovném směru, přičemž ve vodorovném směru (od kořene svaru) se jejich počet rovnal hodnotě 14 a ve svislém (od natočené hrany plechu dolů) se dala odhadem určit hodnota 2/5 jednoho dílku. Jednoduchým přepočtem se následně získaly hodnoty pro výpočet - ve vodorovném směru to tedy bylo 70 mm a ve svislém 2 mm. Výpočet úhlu se v tomto případě provedl pomocí goniometrické funkce tangens:

$$\tan \alpha = \frac{y}{x} \quad (3.4)$$

kde: x - hodnota delší odvěsny [mm]

y - hodnota kratší odvěsny [mm]

potom:

$$\alpha = \arctan \cdot \frac{y}{x} = \arctan \cdot \frac{2}{70} = 1^{\circ}38'11,68'' \quad (3.5)$$

Zakótovaná hodnota je sice $1,75^{\circ}$, ta se ale dá v přepočtu na stupně a minuty napsat jako $1^{\circ}45'$, jelikož má 1 stupeň 60 minut. Výsledné hodnoty se od sebe tudíž tolik neliší a deformace se tedy pohybuje zhruba v jejich rozmezí.

- Výpočty

Tuto hodnotu je možné ověřit také pomocí výpočtů a to na základě metody podle Okerbloma. Jelikož je na fotografii zavedený rastr je nutné nejprve spočítat počet dílků pro šířku svaru a výšku svaru, na základě kterých bude poté proveden výpočet tvaru návaru, respektive tvaru svaru. Po získání těchto hodnot bude možné z grafu, který je na obrázku 3.4, určit celkové natočení tupého svaru. Pro šířku svaru je počet dílků roven 19 a pro výšku svaru je roven 13. Je nezbytné taktéž přepočítat tloušťku materiálu. Pro ni je počet dílků 16,5. Po přepočítání těchto dílků na milimetry podle zvoleného měřítka výše byly získány hodnoty, které jsou pro větší přehled obsaženy v následující tabulce 4.

Tab. 4 - Hodnoty pro výpočet tvar svaru a tvaru návaru

v [mm]	b [mm]	s [mm]
65	95	82,5

Parametry svařování v experimentu pana Bočka jsou zaznamenány v následující tabulce:

Tab. 5 - Parametry svařování tupého svaru

U [V]	I [A]	v_s [mm.s ⁻¹]	η [-]
21,1	195	4,83	0,75

Poté se již mohlo přistoupit k samotnému výpočtu tvaru návaru a tvaru svaru:

- Tvar návaru je dán poměrem:

$$\mu = \frac{v}{s} \quad (3.6)$$

$$\mu = \frac{v}{s} = \frac{65}{82,5} = 0,78 \approx 0,8$$

kde: v - výška svaru [mm]

s - tloušťka materiálu [mm]

- Tvar svaru je dán poměrem:

$$\xi = \frac{b}{s} \quad (3.7)$$

$$\xi = \frac{b}{s} = \frac{95}{82,5} = 1,15 \approx 1,2$$

kde: b - šířka svaru [mm]

- Tepelná energie svařovacího režimu je dána vztahem:

$$q_{pr} = 0,75 \cdot q_p \text{ [J} \cdot \text{mm}^{-1}] \quad (3.8)$$

kde: $q_p = \frac{q}{10^3 \cdot v_s} \quad (3.9)$

kde: $q = U \cdot I \quad (3.10)$

poté:

$$q_{pr} = 0,75 \cdot \frac{U \cdot I}{10^3 \cdot v_s} \quad (3.11)$$

$$q_{pr} = 0,75 \cdot \frac{21,1 \cdot 195}{10^3 \cdot 4,83} = 0,6388 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1} = 638,8 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-1}$$

kde: v_s - svařovací rychlost [mm.s⁻¹]

U - napětí [V]

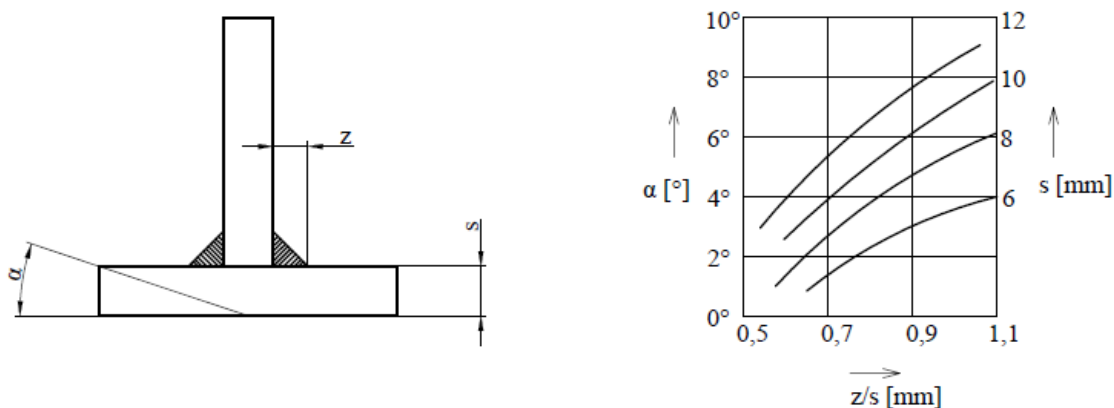
I - proud [A]

Po dokončení výpočtů byla na základě výsledků určena hodnota úhlové deformace. Tyto vypočítané hodnoty byly zaneseny do grafu závislosti úhlové deformace na poměrné energii k tloušťce materiálu, přičemž bylo dostačující vynést pouze hodnoty tvaru svaru a tvaru návaru. Z grafu, viz obr 3.4, je zřejmé, že se výsledná hodnota natočení pohybuje kolem 1° . To znamená, že se tato hodnota téměř shoduje s hodnotou úhlu na rastru a spočítanou hodnotou. Po tomto ověření lze tedy říct, že výsledná deformace se pohybuje okolo těchto hodnot.

Druhá metoda, podle níž bylo možné určit hodnotu smrštění, která se následně porovnávala s celkovou přepočítanou výchylkou z experimentu, byla zmíněna již v kapitole 1.2. Pomocí této metody se dá určit úhlová deformace koutového svaru v závislosti k poměru tloušťky svaru k tloušťce materiálu. Po spočítání tohoto poměru se poté z grafu, viz obr. 3.6, určil výsledný úhel smrštění. Hodnoty potřebné k určení tohoto úhlu jsou uvedeny v tabulce 6.

Tab. 6 - Hodnoty potřebné k určení smrštění z grafu

s [mm]	z [mm]	z/s [mm]
10	8	0,8



Obr. 3.6 - Závislost úhlové deformace na poměru tloušťky svarového spoje k tloušťce desky [4]

Z grafu je zřejmé, že by se výsledná hodnota smrštění měla pohybovat kolem 5° , což se s přepočítanou výchylkou, která je $1^\circ 28' 24,08''$, zdaleka neshoduje.

Zhodnocení vypočítaných hodnot s hodnotami experimentu, jak u úhlové deformace svaru způsobené koutovými svary, tak u svařování tupým svarem, je provedeno v následující kapitole.

4 DISKUZE

Experimentální část práce se skládala ze dvou experimentů, přičemž pouze jeden byl v rámci této práce proveden prakticky. Jednalo se o vznik úhlové deformace tupého svaru a posléze i vznik úhlové deformace po svaření dvou desek více koutovými svary. U prvně zmíněného experimentu byla hodnota úhlové deformace určena díky rastru, který byl aplikován na metalograficky vyhodnocený snímek. Jak je z tohoto snímku zřejmé, bylo svařování prováděno do poměrně úzké mezery. To je z hlediska svařování tupých svarů výhodné, jelikož je možné při svařování do úzkých mezer docílit velmi malých deformací, což bylo zmíněno v teoretické části této práce. Aby byl tento teoretický fakt podložen výpočty, byl do již zmíněného metalografického snímku vložen rastr v programu AutoCAD. Nejprve bylo provedeno zakótování tohoto úhlu právě na základě rastru a jeho hodnota byla $1^{\circ}45'$. Posléze byla tato hodnota ještě ověřena výpočtem pomocí jednoduchého goniometrického vztahu. Zde se spočítaly počty dílků rastru nejprve od kořene svaru po konec jedno ze svařovaných plechů a poté od spodní (deformované) hrany plechu dolů. Po přepočítání těchto dílků na milimetry v měřítku 1:5 a dosazení do vztahu pro funkci tangens vyšla výsledná úhlová deformace $1^{\circ}38'$. Jak je zřejmé, výsledné hodnoty se od sebe moc neliší. I tak byla ještě použita metoda podle Okerbloma, podle níž se úhlové deformace tupých svarů stanoví výpočtem poměrné energie, která je potřebná na roztavení základního materiálu a taktéž výpočtem tvaru svaru a tvaru návaru. Opět se zde musely pro potřebné hodnoty výšky svaru, šířky svaru a tloušťky materiálu určit hodnoty dílků rastru, které byly následně přepočítány na milimetry a dosazeny do vzorců pro tvar návaru a tvar svaru. Hodnoty těchto dvou ukazatelů byly vyneseny do grafu a na jejich spojnici byla určena přibližná hodnota úhlové deformace kolem 1° . Z těchto tří získaných hodnot vyplývá, že skutečná hodnota smrštění leží v jejich rozmezí. Rozdíly, ačkoliv jsou minimální, jsou způsobeny hrubým sčítáním dílků rastru, které mohlo vnést do výpočtu nepřesnosti. Lze ovšem říci, že svařováním do úzké mezery se docílilo velmi malé deformace, což potvrzuje teoretický základ tohoto faktu. Druhým experimentem, který byl proveden v dílnách Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně, bylo svaření dvou desek, které k sobě byly nejdříve nastehovány kolmo do tvaru T, třemi koutovými svary, přičemž výchylky byly měřeny po navaření každé housenky zvlášť pomocí úchylkoměru. Tyto hodnoty byly naměřeny v milimetrech, tudíž musely být přepočítány na stupně, což bylo provedeno pomocí goniometrické funkce sinus. Po přepočítání vyšla celková úhlová deformace $1^{\circ}28'24,08''$. Zbývalo tuto hodnotu ověřit pomocí některé z metod uvedených v teorii. Její ověření proběhlo na základě poměru tloušťky svarového spoje k tloušťce desky. Tento poměr, jehož hodnota byla 0,8, byl vynesen do grafu a v průsečíku s křivkou, která znázorňovala tloušťku materiálu 10 mm, byl určen úhel deformace zhruba 5° , což v porovnání s přepočítanou výchylkou představuje poměrně velký rozdíl. Tento rozdíl nemusel být způsoben chybou ve výpočtu ale faktem, že teoretické určení úhlové deformace se v mnoha případech liší od praxe. Svůj podíl na tom nese například způsob navaření housenek, který byl v tomto experimentu specifický. Největší smrštění způsobilo navaření druhé housenky. Velkou roli zde hrálo právě místo navaření druhé housenky, viz obr. 3.3, kdy byla tepelně ovlivněna pouze oblast stojny, což způsobilo oproti zbylým dvěma housenkám poměrně velkou deformaci. Na tuto hodnotu, která byla $0^{\circ}49'6,74''$, mohl mít vliv i svařovací proud, který dosahoval u jednotlivých navaření rozdílných hodnot a jehož hodnota byla právě u navaření druhé housenky nejvyšší a díky němuž bylo vneseno do svaru velké teplo. Na rozdíl obou celkových hodnot úhlové deformace mohla mít velký vliv i poslední navařená housenka. Ta byla totiž navařena na již navařené svary a tepelně ovlivnila hlavně oblast základní desky a stojnu téměř vůbec. To způsobilo jen velmi malé smrštění - $0^{\circ}9'49,33''$. Toto bohužel v této teoretické metodě není

žádným způsobem ošetřeno, tudíž se domnívám, že experiment byl proveden správně a hodnota úhlové deformace je tedy $1^{\circ}28'24,08''$. Hodnota 5° je pouze orientační vzhledem k tomu, že nezahrnuje výše zmíněné faktory. Ačkoliv výsledná deformace nevyšla moc velká, což bylo způsobeno nastehováním plechů a svařováním v přípravku, bylo by možné ji ještě zmenšit. Toho je možné dosáhnout zredukováním počtu housenek na dvě nebo i na jednu při zachování stejného průřezu svaru. Tímto zredukováním za podmínky stejného průřezu svaru by bylo potřeba svařovat vyšší proudem, aby bylo zajištěno dostatečné množství nataveného kovu, což by ovšem znamenalo zvýšení velikosti vneseného tepla do svaru a riziko vzniku napětí a z něho plynoucí deformace. Při zvýšení svařovací rychlosti by ovšem bylo tepelné ovlivnění podél tloušťky materiálu rovnoměrnější a výsledná deformace by byla nižší. Jak již totiž bylo zmíněno v teoretické části této práce, při svařování méně svarovými housenkami dochází k menším deformacím než při svařování více housenkami při zachování stejného průřezu svaru.

ZÁVĚRY

Práce jako celek tvoří náhled do problematiky vzniku průvodních jevů doprovázejících tavné svařování, jimiž jsou napětí a deformace, ať už z teoretického hlediska, tak i praktickým podložením některých faktů vyskytujících se v rešeršní části práce. V té jsou postupně tyto termíny popsány, přičemž je zde věnována pozornost vlivům, které mají negativní dopad na vznik výše zmíněných jevů. V další části práce jsou zmíněny některé způsoby určení úhlových deformací, ze kterých je jeden implementován i do experimentální části práce. Jsou zde i zmíněna opatření, kterými je možné potlačit vznik napětí a deformací při svařování, případně je zde uveden i způsob odstranění vzniklých deformací. Praktická (experimentální) část se skládá ze dvou experimentů, které měly za cíl prakticky si ověřit informace obsažené v teoretické části práce, což bylo splněno. Jedním z experimentů bylo určení úhlové deformace tupého svaru, které bylo provedeno za pomoci rastru. Svařování probíhalo do úzké mezery, což je u tupých svarů žádoucí, tudíž byl předpoklad velmi malých deformací. Pomocí třech způsobů, které jsou v této práci popsány, bylo postupně zjištěno, že byl tento předpoklad správný. Dalším experimentem bylo svaření dvou plechů kolmo k sobě pomocí třech svarových housenek. Zde se již hodnota výchylky získaná výpočtem a následným určením z grafu poměrně dost lišila s výchylkou přepočítanou v experimentu. Neznačená to, že by byl experiment špatně proveden, ale pouze to potvrzuje fakta obsažená v teorii a taktéž i fakt, že hodnoty natočení získané teoreticky se v praxi mnohdy liší. Úhlové deformace totiž závisí na způsobu a pořadí kladení housenek. To bylo v tomto experimentu provedeno tak, že první dvě housenky, zvláště ta druhá, způsobily poměrně velké smrštění, ale poslední housenka už nikoliv. To bylo dáno tím, že byla navařena na předchozí dvě housenky a tepelně ovlivnila hlavně základní desku a ovlivnění stojny bylo minimální. Toto příslušná výpočtová metoda nezohledňuje, stejně tak ani parametry svařování, které se v průběhu svařování měnily. Z toho plyne, že samotný experiment byl proveden správně a jeho porovnání s hodnotou z grafu jen potvrdilo fakta zmíněná v teorii.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. Münchner, L., Iždinský, O., Ruža, V.: *Deformácie a napätia pri zvaraní*, Interná publikácia VÚZ, Alfa Bratislava 1964
2. Daněk, Ladislav, *Technologie svařování.*, přednáška Brno: Vysoké učení technické v Brně, 16. 10. 2014.
3. HUDEC, Zdeněk. 1998. *Deformace a napětí při svařování*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita, 76 s. ISBN 80-708-3313-0.
4. KUNCIPÁL, Josef. 1986. *Teorie svařování*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství technické literatury, 265 s.
5. ČSN 11373: nelegovaná ocel obvyklých jakostí pro konstrukce. 2011. *CZ FERRO - STEEL, spol. s.r.o.: velkoobchod s hutním materiálem* [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: <http://www.czferrosteel.cz/pdf/profily4-11373.pdf>
6. Svařovací zdroje. 2015. *FROWELD: profesionální svařovací, řezací a nabíjecí technika* [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: <http://www.froweld.cz/svarovaci-technika/eshop/2-1/0/5/1220-TransPuls-Synergic-4000>
7. FRONIUS TransPuls Synergic 4000. 2011. *ALGAN METAL* [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: <http://www.alganmetal.com.tr/tr/default.asp?sayfa=urundetay&AlbumID=105>
8. GRUTKA, Emil a Ján ZVIRINSKÝ. 1986. *Teória zvarania: Návodý na cvičenia*. Bratislava: ALFA, vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry, 105 s.
9. AMBROŽ, Oldřich, Bohumil KANDUS a Jaroslav KUBÍČEK. 2001. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 1. vyd. Ostrava: Zeross, 395 s.: il. ISBN 8085771810.
10. ORSZÁGH, Peter a Viktor ORSZÁGH. 2000. *Zváranie MIG/MAG ocelí a neželezných kovov*. 1. vyd. Bratislava: Polygrafia SAV, 460 s.: il. ISBN 8088780365.
11. VANĚK, Mojmír. *Predikce deformací svarových spojů pomocí počítačové simulace*. Brno, 2012. 98 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
12. Boček, M.: fotografie makrostruktury příčného řezu tupého svaru. 2015.
13. Zpracování černé oceli. 2015. *ACO Industries k. s.* [online]. [cit. 2015-05-13]. Dostupné z: <http://www.aco-industries.cz/co-delame/vyroba/zpracovani-cerne-oceli/>
14. FRONIUS Česká republika: Produkty - Obloukové svařování. 2015. *Fronius International GmbH* [online]. [cit. 2015-05-13]. Dostupné z: http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-37E21976-22E358D7/fronius_ceska_republika/hs.xml/29_998.htm#.VVMv-vntmko
15. ABB otevřela poblíž Prahy evropský showroom svařovacích technologií. 2015. *Konstrukter.cz* [online]. [cit. 2015-05-13]. Dostupné z: <http://www.caxmix.cz/2015/01/28/abb-otevrela-pobliz-prahy-evropsky-showroom-svarovacich-technologii/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Jednotka	Popis
E	[MPa]	modul pružnosti v tahu
I	[A]	svařovací proud
K	[-]	koeficient intenzity
L	[mm]	délka upnutí
Q	[J]	vnesené teplo do svaru
Q _s	[kJ.min ⁻¹]	specifické vnesené teplo
R	[Ω]	elektrický odpor
a	[mm]	převýšení svaru
b	[mm]	šířka svaru
h	[mm]	hloubka průvaru do základního materiálu
l	[mm]	délka ukazatele
q _{pr}	[J.min ⁻¹]	tepelná energie svařovacího režimu
s	[mm]	tloušťka materiálu
t	[s]	doba průchodu tepla
v	[mm]	výška svaru
x	[mm]	hodnota delší odvěsny
y	[mm]	hodnota kratší odvěsny
z	[mm]	tloušťka svarového spoje
z _u	[°]	velikost smrštění
α	[°]	označení celkové výchylky
α ₁	[°]	označení výchylky po navření první svarové housenky
α ₂	[°]	označení výchylky po navření druhé svarové housenky
α ₃	[°]	označení výchylky po navření třetí svarové housenky
Δx	[mm]	výchylka naměřená pomocí měřicího zařízení
η	[-]	koeficient účinnosti
μ	[-]	tvar návaru
ξ	[-]	tvar svaru