



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 PŘÍČNÉ DEFORMACE

INFLUENCE OF WELDING PARAMETERS ON A TRANSVERSE DISTORTION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

DANIEL HARMANIAK

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): Daniel Harmaniak

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 příčné deformace

v anglickém jazyce:

Influence of welding parameters on a transverse distortion

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Sledování velikosti příčné deformace v závislosti na parametrech svařování a ploše příčného průřezu svaru. Jedno a vícevrstvé svařování.

Cíle bakalářské práce:

Napětí a deformace jako průvodní jev svařování.

Výpočet příčných deformací v závislosti na velikosti svaru, použitých parametrů svařování a skladby svaru.

Experimentální ověření vypočítaných hodnot.

Seznam odborné literatury:

1. KOUKAL,J., D.SCHWARZ a J. HAJDÍK Materiály a jejich svařitelnost. 1. vyd. Ostrava: Český svářečský ústav s.r.o. Ostrava, VŠB-Technická univerzita Ostrava. 2009. 241 s. ISBN 978-80-248-2025-5.
2. MESSLER, Robert. Principles of welding. USA 1999. 662 s. ISBN 0-471-25376-6.
3. AMBROŽ, Oldřich, B. KANDUS a J. KUBÍČEK. Technologie svařování a zařízení. Ostrava: ZEROSS 2001. 395 s. ISBN 80-85771-81-0
4. HUDEC, Zdeněk .Deformace a napětí při svařování. Technická univerzita v Liberci..Listopad 1998, 76 s. ISBN 80-7083-313-0

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

HARMANIAK Daniel: Vliv parametrů svařování na příčné deformace.

V bakalárskej práci je popísaná teória vzniku vnútorných napätí a deformácií pri zváraní. Uvádza technologické a konštrukčné zásady pre minimalizovanie ich vzniku a metódy na odstránenie vnútorných napätí. Pre priečne deformácie boli uvedené výpočetné metódy v závislosti od rozdielnych parametroch zvárania. Bol zhotovený tupý zvarový spoj dvoch plechov a meralo sa jeho priečne zmrštenie. Nameraná hodnota bola porovnaná s vypočítanou.

Kľúčová slova: zváranie, deformácie, vnútorné napätia, parametre zvárania

ABSTRACT

HARMANIAK Daniel: Influence of welding parameters on a transverse distortion.

In my bachelor thesis is described a theory of internal tensions and distortions during welding. My thesis also contains technological and structural principals used to minimize them and methods used for elimination of internal tensions. There are also included calculated methods depending on the different parameters of welding concerning transverse distortions. A butt weld was done between two sheets of tin and its transverse shrinkage was measured. The measured value was compared with the calculated one.

Key words: welding, distortion, internal tensions, parameters of welding

Keywords: welding, distortion, residual stresses, welding parameters

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HARMANIAK, Daniel. *Vliv parametrů svařování na příčné deformace*. Brno, 2015. 33s, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí práce doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V dne 10.5.2000

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Týmto velmi děkuji mojim rodičům za podporu při štúdiu.

Pánovi doc. Ing. Ladislavovi Daňkovi, CSc. za užitočné rady a pripomienky týkajúce sa zapracovania bakalárskej práce.

Paní Jarmile Houdkové a pánovi Romanovi Kratochvilovi za pomoc s výrobou vzorku.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

OBSAH.....	- 8 -
ÚVOD.....	- 9 -
1 NAPĚTIA A DEFORMÁCIE	- 10 -
1.1 Vznik napětí a deformací při zvarování.....	- 10 -
1.3 Priebeh zvyškových napätí při zvarování dvouch dosiek tupým zvarom.....	- 13 -
1.4 Deformácie pri zvarování	- 14 -
1.4.1 Elementárne deformácie	- 15 -
1.4.2 Stanovenie veľkosti priečného zmrštenia	- 16 -
2 ZNIŽOVANIE VNÚTRNÝCH NAPĚTÍ A DEFORMACÍ	- 18 -
2.1 Spôsoby minimalizácie vzniku napětí a deformácii v zvaracom procese	- 18 -
2.1.1 Materiál.....	- 18 -
2.1.2 Konštrukcia.....	- 19 -
2.1.3 Voľba technológie	- 21 -
2.2 Znižovanie napětí vzniknutých zvaracím procesom.....	- 24 -
2.2.1 Žíhaním.....	- 24 -
2.2.2 Vibráciami	- 24 -
3 EXPERIMENTÁLNA ČASŤ.....	- 26 -
3.1 Základný materiál	- 26 -
3.2 Příprava a zvar vzorku	- 26 -
4 VPLYV ZMENY PARAMETROV	- 29 -
4.1 Zvarací prúd.....	- 29 -
4.2 Napätie	- 30 -
4.3 Rýchlosť zvarovania	- 31 -
4.4 Ochranný plyn.....	- 31 -
ZÁVERY	- 33 -
Zoznam použitých zdrojov	- 34 -
Zoznam použitých symbolov a skratiek	- 36 -
Zoznam obrázkov	- 37 -
Zoznam tabuliek	- 37 -

ÚVOD

Zváranie zaujíma významnú pozíciu v oblasti strojárenských technológií. Vytvára nerozoberateľné spoje súčiastok, či celých konštrukcií a spracováva najväčší objem kovových materiálov, či už tvárnených alebo liatych. Môžeme ho uplatniť pri výrobe nových konštrukcií alebo tlakových nádob, pri stavbe mostov, lodí, ropovodov alebo pri opravách.

Najstaršou metódou zvárania je zváranie kovácke. Až na konci 19. storočia boli rozvinuté metódy zvárania elektrickým oblúkom alebo plameňom a odporové zváranie. V nasledujúcich rokoch sa tieto metódy ďalej zdokonaľovali a našli široké uplatnenie. Medzi výhody zvárania patria: úspora materiálov a energií, zníženie hmotnosti výrobkov a zvýšenie produktivity práce. Z ekonomického hľadiska sa to prejaví znížením výrobných nákladov. Ďalším faktom je, že mnoho konštrukčných nápadov nie je možné bez zvárania vôbec realizovať, prípadne len s veľkými ťažkosťami a vysokými nákladmi. [8,13]

Princípom zvárania je vytvorenie nových kovových väzieb medzi materiálmi za pôsobenia koncentrovaného zdroja tepla alebo tlaku, prípadne oboch súčasne. Pôsobením koncentrovaného zdroja tepla sa materiál neohrieva v celom objeme rovnako, čo má za následok vznik napätí a deformácií v mieste zvaru. Nesprávna aplikácia zvárania, ktorá je predovšetkým spôsobená nízkou úrovňou vedomostí, nesprávnou voľbou metódy a materiálu, vedie k finančným stratám, prípadne k ohrozeniu ľudských životov. Pri snahe predísť týmto chýbам, predchádza zavedeniu novej technológie do výroby séria výpočtov a experimentov. [5,7]



Obr. 1 Zváranie [2,18]

1 NAPÄTIA A DEFORMÁCIE

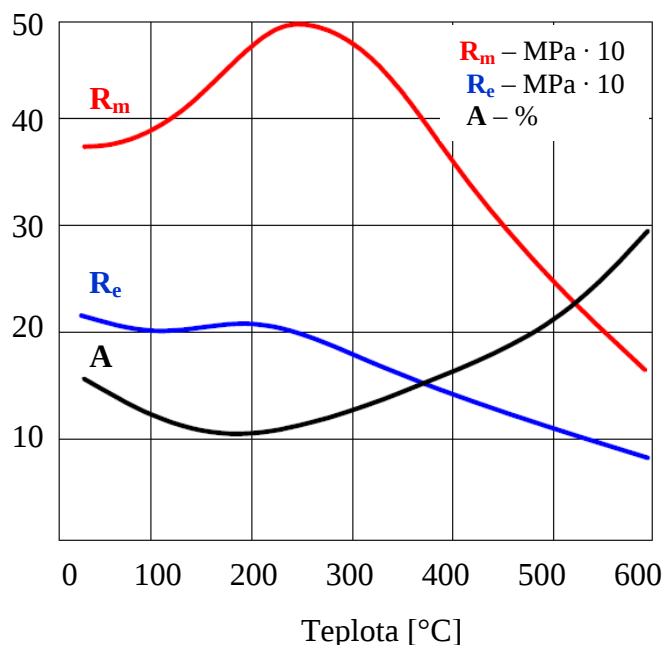
Vznik zvyškových napätí a deformácií má veľký význam vo všetkých druhoch technológiách výroby. Sú to napätia, ktoré pôsobia v telese bez toho, aby naň pôsobili vonkajšie sily. V telese vznikajú aj pri iných technologických procesoch ako je zváranie, napr. pri tvárnení alebo obrábaní, pri tepelnom spracovaní či odlievaní. Výsledné napätie predstavuje v telese rovnovážny stav, lebo statické účinky síl a ich momentov sa v ľubovoľnom priereze rušia.

Následkom zvyškového napätia môže dôjsť k vzniku plastickej deformácie, prípadne k prekročeniu medze pevnosti u materiálov s nižšou zásobou plasticity, ktorá môže spôsobiť porušenie materiálu. Počas zvárania vždy dochádza k vzniku zvyškových napätí a deformácií, ktorým sa nie je možné vyhnúť. Pre tento fakt je dôležité zamerať sa na výber vhodnej zvárackej metódy a technológie. [4,5,7]

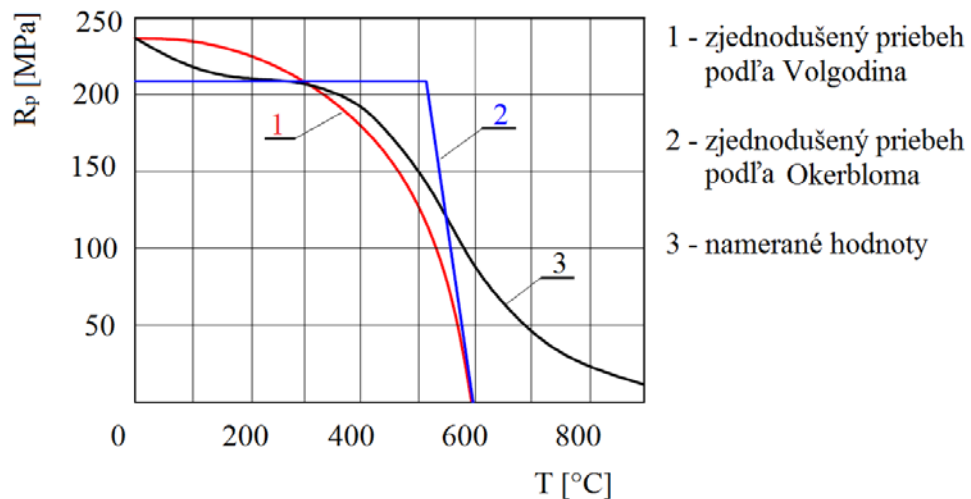
1.1 Vznik napätí a deformácií pri zváraní

Vznik napätia je zapríčinený vnesením tepla tepelným zdrojom a nerovnomerným ohrevom zvarenca. So zmenou teploty dochádza k zmene mechanických a tepelno-fyzikálnych vlastností. Mení sa: tepelná rozťažnosť, medza klzu, medza pevnosti, tepelná vodivosť, húževnatosť, ťažnosť atď. Na obr. 2 sú zobrazené zmeny mechanických vlastností nízkouhlíkovej ocele o pevnosti 370 MPa v závislosti na teplote. Pri zváraní dochádza k intenzívnemu ohrevu materiálu v mieste pôsobenia koncentrovaného tepelného zdroja. Následkom vneseného tepla má materiál snahu sa rozťahovať, ale okolitý materiál nemá až takú vysokú teplotu, čím zabraňuje rozťahovaniu. Platí, že materiál s nárastom teploty stráca svoju pevnosť. Na obr. 3 je zjednodušený priebeh závislosti medze klzu na teplote podľa Volgodina a Okerbloma [4,5]

Vlastnosti



Obr. 2 Závislosť mechanických vlastností ocele na zmene teploty [4]



Obr. 3 Zmena medze klzu s nárastom teploty [4]

Keď napätie narastie až nad medzu klzu a vzniká splastizovaná oblasť, v ktorej je materiál s vyššou teplotou ubíjaný na vzdialenejši chladnejší materiál. V tomto prípade platí, že čím je zdeformovaná oblasť väčšia, tým je väčšie aj vzniknuté zvyškové napätie. Po zvarení nastáva fáza chladnutia. V mieste zvaru sa ochladzuje materiál najrýchlejšie, lebo odovzdáva teplo do celého objemu materiálu. Pri chladnutí sa zvarový kov zmršťuje a narastá jeho medza pevnosti. Pri zmrštení ale narastá deficit kovu následkom ubitia materiálu v splastizovanej oblasti, ktorý sa prejaví nárastom vnútorného napätia. Z toho dôvodu, že napätie vo vnútri zvarenca musí byť v rovnováhe, vyvolá zmena napätia v oblasti zvaru reakciu aj vo vzdialenejšom materiáli. Plastické deformácie môžu vyčerpať určitú zásobu plasticity materiálu, následkom čoho sa zvarový spoj javí ako menej húževnatý. Napätie vzniknuté pri zváraní sa sčíta s napätím vzniknutým v predošlých výrobných operáciách (tvárnenie za studena, obrábanie a valcovanie). Výsledné napätie sa v závislosti od materiálu môže uvoľniť hneď ako vonkajšia deformácia, prípadne až časom pri ďalších technologických operáciách alebo v priebehu prevádzky. [4,5,7]

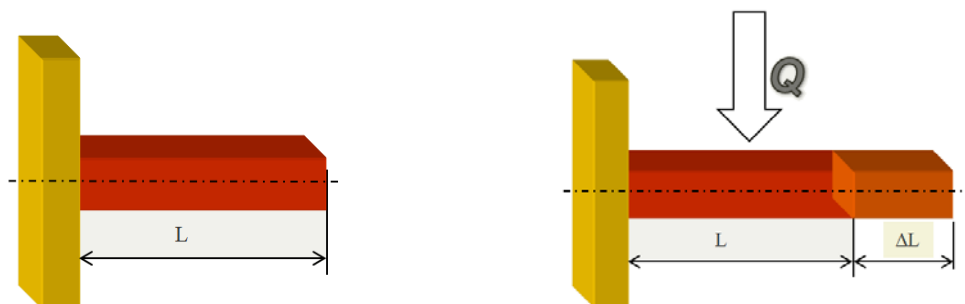
Vznik napätí a deformácií je možné priblížiť pomocou nasledujúcich príkladov:

Na obr. 4 je tyč o dĺžke L_0 upnutá z jednej strany a rovnomerne ohrievaná teplotou Q , následkom čoho dôjde k dilatácii tyče, ktorá sa predĺži o ΔL . Po rovnomernom ochladení na počiatočnú teplotu má materiál pôvodnú dĺžku a nevzniknú žiadne zvyškové napätia. Pri zváraní tento ideálny stav nemôže nastať.

Veľkosť lineárnej teplotnej rozťažnosti alebo zmrštenia rovnomerne ohrievaného či ochladzovaného materiálu, môžeme vyjadriť vzťahom (1.1). [5,17]

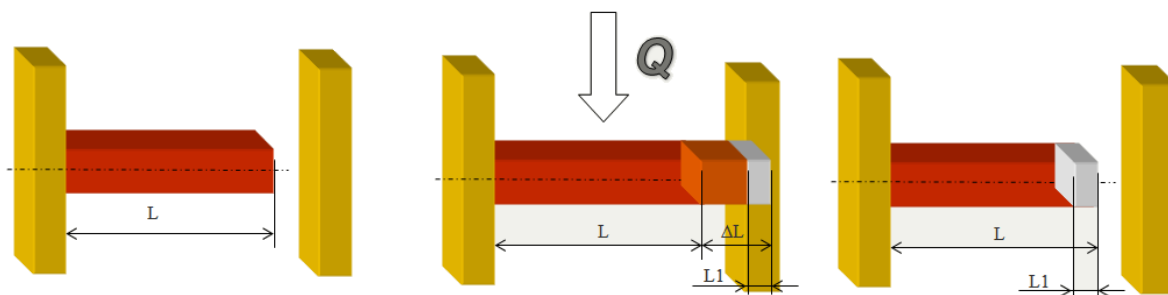
$$\Delta L = L_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T \text{ [m]} \quad (1.1)$$

Kde: L_0 – pôvodná dĺžka tyče [m],
 α – súčiniteľ lineárnej teplotnej rozťažnosti [K^{-1}],
 ΔT – rozdiel pôvodnej a konečnej teploty tyče [K].



Obr. 4 Jednostranné upnutie [17]

V druhom prípade na obr. 5 je rovnaká tyč z jednej strany upnutá, ale z druhej obmedzuje jej predĺženie doraz. Ak deformácia tyče zostane v oblasti elastických deformácií, bude mať tyč po ochladení opäť pôvodnú dĺžku L a nezostanú v nej žiadne zvyškové napätia. Keď dôjde k deformáciám plastickej, dochádza k ubitiu materiálu a už sa nevráti na svoju pôvodnú dĺžku L , ale je skrátená o veľkosť ubitej oblasti L_1 . Po rovnomernom ochladnutí nevznikajú v tyči žiadne zvyškové napätia. [5,17]



Obr. 5 Jednostranné upnutie s dorazom [17]

Pri zváraní je najbežnejšie, že materiál je upnutý z oboch strán (obr. 6), čo zabráňuje voľnej dilatácii tyče a vzniká napätie, ktoré je možné vyjadriť z Hookovho zákona (1.2) a následkom ktorého dochádza k ubitiu materiálu. [5]

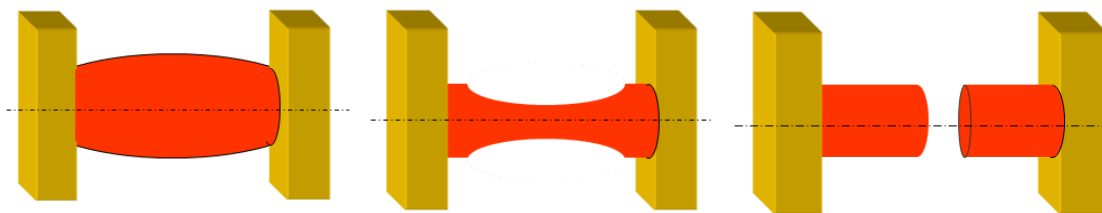
$$\sigma = \varepsilon \cdot E = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot E = \alpha \cdot \Delta T \cdot E \text{ [MPa]}$$

(1.2)

kde: ε – pomerné predĺženie [-],

E – modul pružnosti [MPa].

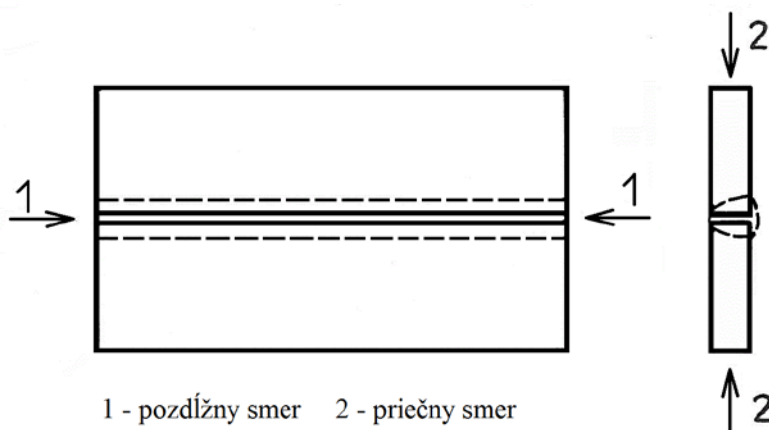
Platí, že pri chladnutí sa budú tlakové napätia znižovať približne podľa rovnakej závislosti ako sa zvyšovali pri ohreve. Počas chladnutia bude mať tyč snahu skrútiť sa o veľkosť plastickej deformácie vzniknutej ubitím, čomu bráni pevné upnutie. V materiáli začne vznikať ťahové napätie, ktoré môžu opäť dosiahnuť medze klzu. Po vychladnutí zostane v tyči ťahové napätie. Po uvoľnení upnutia sa uvoľní zvyškové napätie a elastická deformácia. V tyči zostane iba výsledná plastickej deformácia. U húževnatých materiálov sa deformácia prejaví ako zúženie. U materiálov s malou zásobou plasticity ale dôjde k prekročeniu medze pevnosti a pretrhnutiu. [4,5,17]



Obr. 6 Upnutie z oboch strán [17]

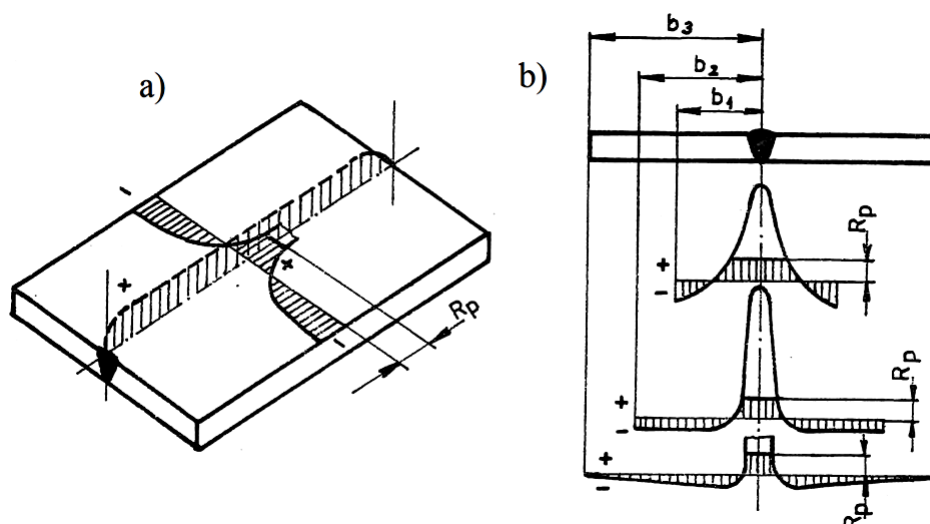
1.3 Priebeh zvyškových napätí pri zváraní dvoch dosiek tupým zvarom

V experimentálnej časti práce budú zvárané vzorky dvoch plechov tupým zvarom. Preto bude tento spôsob trochu priblížený. Pri zváraní dvoch dosiek pozdĺžnym tupým zvarom je zvar a okolie zvaru namáhané v pozdĺžnom smere silou od zmršťujúceho sa zvaru. V smere priečnom vzniká napätie vyvolané jednostranným ohrevom dosiek. Schéma zvaru je zobrazená na obr. 7. U plechov väčšej hrúbky je nutné brať do úvahy aj napätie v smere hrúbky. [1,4]



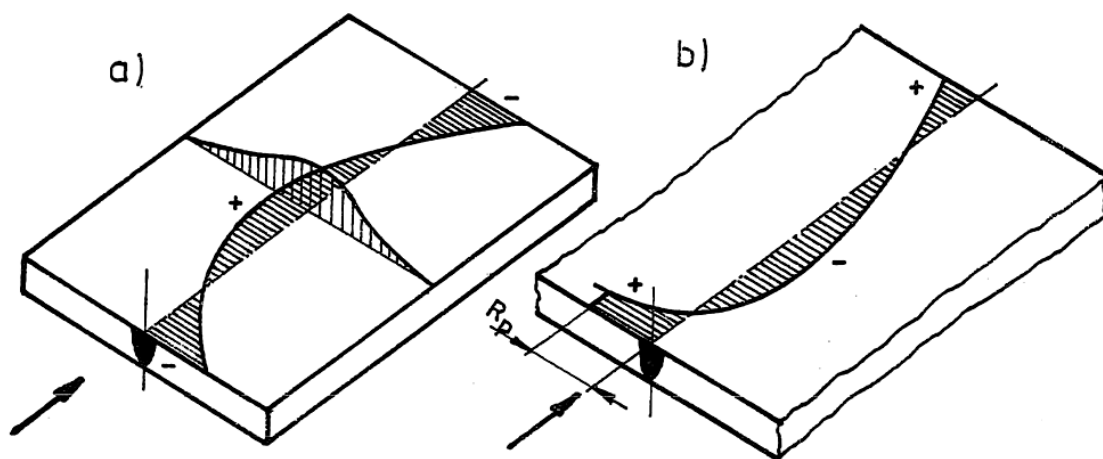
Obr. 7 Tupý zvar plechov [1]

Na obr. 8 a) je zobrazený priebeh pozdĺžnych zvyškových napätí na úrovni povrchu plechu a priebeh napätí v ose zvaru v jeho dĺžke pootočený o 90° do zvislej polohy. Na obr. 8 b) je znázornený vplyv šírky dosiek na priebeh pozdĺžnych napätí. Z obrázku vyplýva, že v mieste zvaru je vždy ťahové napätie, ktoré prekročí medzu klzu. Šírka pásma sa mení so šírkou dosiek. Čím sú dosky širšie, tým je toto pásmo menšie. U užších dosiek sú vnútorné plastické deformácie najmenšie, ale oblasť s ťahovým napätím najväčšia. Z toho vyplýva, že pri zváraní užších dosiek bude dochádzať k väčším deformáciám ako pri zváraní dosiek širších. Priebeh pozdĺžnych napätí ovplyvňuje aj voľba zváracieho režimu. Pri zváraní rovnako širokých dosiek rozdielnou mohutnosťou tepelného zdroja alebo rýchlosťou dôjde pri mohutnejšom tepelnom zdroji a nižšej rýchlosti k podobným priebehom napätí ako pri doskách užších. [1,4]



Obr. 8 Priebeh napätí pri zvarení dosiek a vplyv šírky zváraných dosiek na priebeh pozdĺžnych napätí v smere osi zvaru [1]

Priebeh a veľkosť priečného napätia závisí od spôsobu kladenia zvarových húseníc. Na obr. 9 sú znázornené priebehy zvyškových napätí v smere osi zvaru krivkami v rovine plechu. V polohe zvislej je priebeh priečných napätí k okrajom plechu natočený o 90° . Smer zvarovania je vyznačený šípkami. V prípade, že sa plechy pri zváraní môžu voľne deformovať alebo pri zvaroch úzkych dosiek vysokou mohutnosťou zdroja s nízkou rýchlosťou zvarovania, budú priebehy napätí odpovedať obr. 9a). Ak sa deformácie nemôžu výraznejšie prejavíť a zmrštenie bude v priečnom smere približne konštantné (napr. pri zváraní širokých dosiek s nízkou intenzitou zdroja alebo pevne upnutých plechoch) bude napätie v smere osi odpovedať obr. 9b). [1,4]



Obr. 9 Priebeh priečných napätí [j]

1.4 Deformácie pri zváraní

Deformácia je charakterizovaná ako zmena rozmeru a tvaru konštrukcie alebo súčiastky zapríčinená zvyškovým napätím, prípadne vonkajším zaťažením. Deformácie spôsobené zváraním môžeme rozdeliť rôznymi spôsobmi v závislosti od podmienok vzniku a ich charakteru.

Podľa miesta pôsobenia ich môžeme deliť na deformácie vonkajšie a vnútorné. Vonkajšie deformácie rozdeľujeme na: [1,4,7]

- lokálne – dochádza k zmene tvaru prierezu len v určitých miestach zvarenca
- celkové – prejavia sa zmenou tvaru a rozmeru celého zvarenca
- elementárne

Podľa doby existencie:

- prechodné – existujú len po dobu pôsobenia príčiny ich vzniku
- zvyškové – pretrvávajú po vychladnutí zvaru a jeho uvoľnení z upínacieho zariadenia

Podľa stálosti:

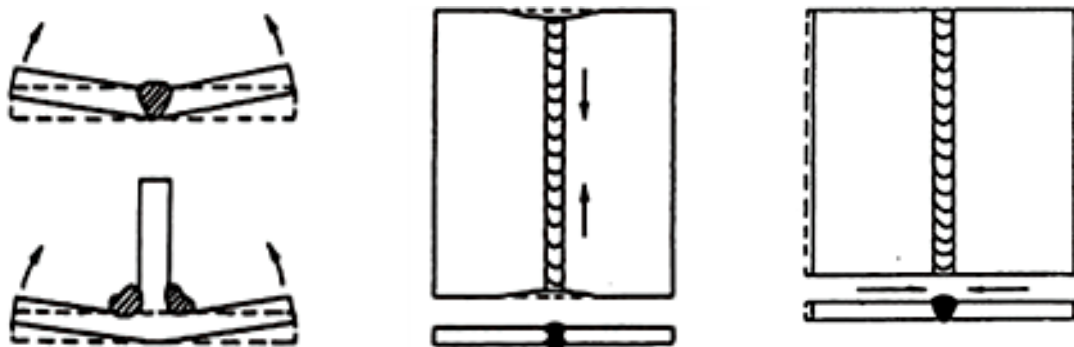
- elastické – napätie neprekročí medzu pružnosti a po ukončení pôsobenia sily sa súčasť vráti do pôvodného stavu a rozmeru
- plastické – došlo k prekročeniu medze klzu a deformácie sa tak stali trvalé.

1.4.1 Elementárne deformácie

K elementárnym deformáciám dochádza pri ochladzovaní zvarového spoja, ktorý sa zmršťuje vo všetkých troch osiach svojich rozmerov, čo sa prejaví nasledujúcimi deformáciami: [4]

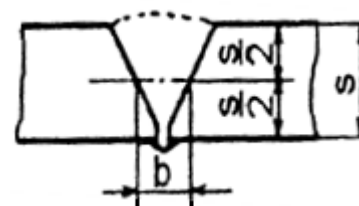
a) **uhlová deformácia zvaru** – je výslednica ohybových momentov od zmršťujúcich síl jednotlivých zvarových húseníc. Prejaví sa odchýlením roviny dosky zvarenca od pôvodnej roviny (Obr. 9). Najčastejšie vzniká pri kútových zvaroch alebo pri zvaroch typu U, V a narastá počtom zvarových húseníc.

b) **pozdĺžna deformácia zvaru** – vzniká tak, že voľnému predĺženiu zvarového kovu v pozdĺžnom smere bráni okolitý materiál. Pri ochladzovaní zvarového kovu vznikajú vo zvarovom spoji napätia, ktoré pri teplote 20 °C prekračujú medznú hranicu elastickej deformácie a stáva sa z nich deformácia plastická. Prejaví sa ako zmrštenie zvarového spoja v smere osi zvaru (obr. 10). Spôsobujú problémy najmä pri zváraní jednovrstvovom, zváraní tenkých plechov, kde môže dôjsť k zvlneniu plechu. U plechov hrubších ako 10 mm je zmrštenie zanedbateľne malé. U tupého zvaru je pozdĺžna deformácia výrazne menšia ako priečna deformácia. [4,8,12]



Obr. 10 Uhlová, pozdĺžna a priečna deformácia [4]

c) **priečna deformácia** – je skrátenie rozmerov zvarového spoja v smere kolmom na os zvaru v rovine povrchu plechu (obr. 11). Jej veľkosť závisí hlavne od hrúbky materiálu, dĺžky a tvaru spoja, tepelného príkonu, spôsobu zvárania, tuhosti zvarku a spôsobu upnutia. [1,4,8]



Obr. 11 Stredná šírka zvaru [1]

1.4.2 Stanovenie veľkosti priečného zmrštenia

Veľkosti priečného zmrštenia sú dané výsledkom vzájomného pôsobenia jednotlivých faktorov. Podľa Pilousa vypočítame priečne zmrštenie pri zváraní obalenou elektródou dvoch dosiek tupým zvarom, ktoré môžeme vyjadriť vzťahom: [1,8]

$$Z_p = 0,1716 \cdot \frac{S_{sv}}{s} + 0,0121 \cdot b_s \quad [\text{mm}], \quad (1.3)$$

kde: S_{sv} – plocha priečného prierezu zvaru [mm^2],
 s – hrúbka zváraných dosiek [mm],
 b_s – stredná šírka zvaru (obr. 10) [mm].

Tento vzťah nie je úplne presný, lebo veľkosť zmrštenia nezávisí len od plochy zvaru, ale aj veľkosti splastizovanej plochy základného materiálu, teda pásma teplotného poľa nad 600°C . To znamená, že pri zmenšení tohto pásma (napr. zvýšením intenzity prúdu a vyššej rýchlosti mechanizovaného zvárania alebo skrátením dĺžky zvaru) sa zmenší aj priečne zmrštenie, ale pozdĺžne narastie. [5,7]

Malisius do výpočtu priečnej deformácie zahŕňa aj druh zváracej metódy: [7]

$$Z_p = 1,3 \cdot \left(0,6 \cdot \lambda_1 \cdot k \cdot \frac{S_{sv}}{s} + \lambda_2 \cdot b_s \right) [\text{mm}] \quad (1.4)$$

kde: λ_1 – koeficient 0,0044 [-]
 λ_2 – koeficient 0,0093 [-]
 k – koeficient podľa metódy zvárania [-]
 (pre ROS neobalenou elektródou $k = 43$, pre ROS obalenou elektródou $k = 50$,
 pre zváranie plameňom $k = 75$).

Okerblomova metóda využíva mohutnosť zdroja tepla q , ktorá je daná zváracím režimom: [7]

$$q = \eta \cdot 0,24 \cdot E \cdot I \quad [\text{cal} \cdot \text{cm}^{-1}] \quad (1.5)$$

kde: η – koeficient vplyvu tepla oblúka na vývin deformácií [-],
 (pri navarení a I - zvaroch $\eta = 0,55$ a pri kútových zvaroch a zvaroch s úkosmi $\eta = 0,7$).
 U – napätie [V],
 I – prúd [A].

Výsledné priečne zmrštenia jednovrstvových dlhých zvaroch môžeme stanoviť zo vzťahu:

$$Z_p = 3,5 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{q}{60 \cdot v \cdot s} \quad [\text{mm}]$$

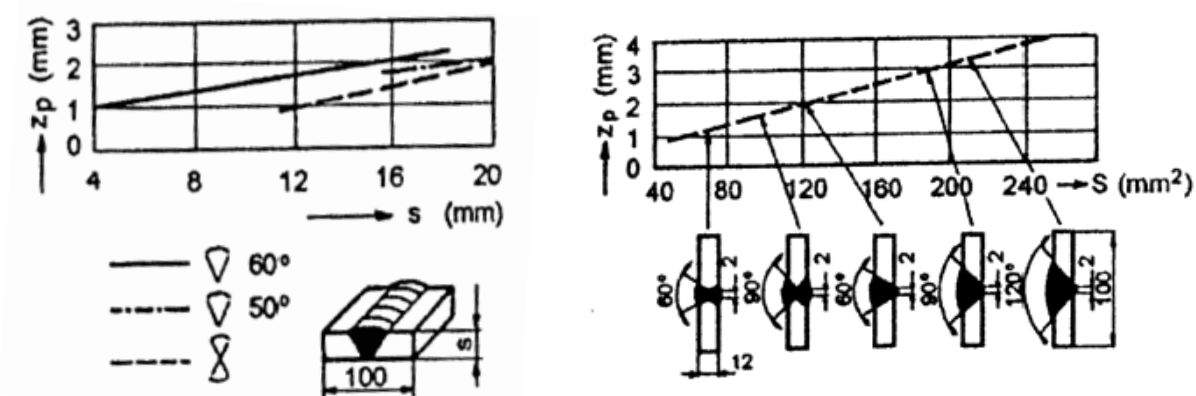
kde: v – rýchlosť zvárania [$\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$],

Gildehi počíta s fyzikálnymi vlastnosťami materiálu a množstvom vneseného tepla: [7]

$$Z_p = \frac{0,24 \cdot 6000 \cdot K \cdot \alpha \cdot U \cdot I \cdot a}{s \cdot v \cdot \lambda} \text{ [mm]} \quad (1.6)$$

kde: K – koeficient využitia tepla elektrického oblúku [-],
 α – koeficient lineárnej tepelnej rozťažnosti [K^{-1}],
 a – súčiniteľ tepelnej vodivosti [$m^2 \cdot s^{-1}$],
 λ – tepelná vodivosť [$W \cdot m^2 \cdot K^{-1}$].

Týmto vzťahom je možné vypočítať veľkosť zmrštenia pre jednotlivé vrstvy zvaru za predpokladu, že každá vrstva zvarového kovu je pri kladení nasledujúcej vrstvy prehriata až k vrstve koreňovej.



Obr. 12 Závislosť zmrštenia na hrúbke plechu a závislosť zmrštenia na celkovej ploche zvaru [1]

Z obr. 13 vyplýva, že priečne deformácie narastajú s uhlom rozovretia zvaru a najmenšie deformácie nastávajú u zvarov typu X. Na obr. 13 v pravo je zobrazená aj závislosť priečného zmrštenia na hrúbke plechu. [1]

2 ZNIŽOVANIE VNÚTRNÝCH NAPÄTÍ A DEFORMÁCIÍ

Z doteraz uvedených poznatkov vyplýva, že medzi deformáciami a vnútornými napätiami je závislosť. Zmeny napätí v zvarovom ovplyvnia zvarové deformácie a zmeny v deformáciách zase ovplyvnia vnútorné napätia. Ak by po zvarení nedošlo k žiadnej deformácii zvaru, tak v jeho vnútri nájdeme vnútorné napätia. Existuje celá rada praktických spôsobov na zníženie napätí a deformácií už v priebehu procesu zvárania. Nie vždy sú tieto metódy vhodné, prípadne sa nedajú vôbec realizovať. V takom prípade musíme použiť metódy, ktoré slúžia na zníženie napätí a deformácií až po zvarení konštrukcie.[1,5,7]

2.1 Spôsoby minimalizácie vzniku napätí a deformácií v zvaracom procese

Už pri konštrukčnom návrhu by mal konštruktér spolupracovať s technologom a prispôbiť tvar a časti výrobku vzhľadom na technológiu zvárania. Musí byť vhodne zvolený polotovár, počet a veľkosť zvarov. Musí sa zabezpečiť dobrý prístup k zvarom, použiť vhodné zvaracie parametre, druh upnutia a pod. Treba počítať s tým, že zmena jedného parametru môže znížiť napr. veľkosť priečnej deformácie, ale zároveň môže zvýšiť deformáciu v pozdĺžnom smere. Vzhľadom k tomuto faktoru je dôležité voliť tieto parametre s prihliadnutím na funkciu daného výrobku. [5,7]

2.1.1 Materiál

Pri zváraní zaručene zvariteľných ocelí je spravidla dostatočná zásoba plasticity, a preto sa netreba obávať vzniku prasklín. Dôraz sa kladie predovšetkým na zmenšenie deformácií, a tým zníženie nákladov na obrábanie respektíve rovinanie konštrukcie. Z tohto dôvodu sa konštrukcie často zvarujú v tuho upnutých prípravkoch. V konštrukcii tak nedôjde k deformáciám, ale v zvarových spojoch vznikajú vnútorné napätia na úrovni medze klzu zvarového materiálu. U ocelí s horšou zveriteľnosťou sa aplikuje opačný prístup. V materiáloch náchylných na zakalenie zvarového spoja je snaha o čo najmenšie vnútorné napätia, aby nedošlo k vzniku trhlín.

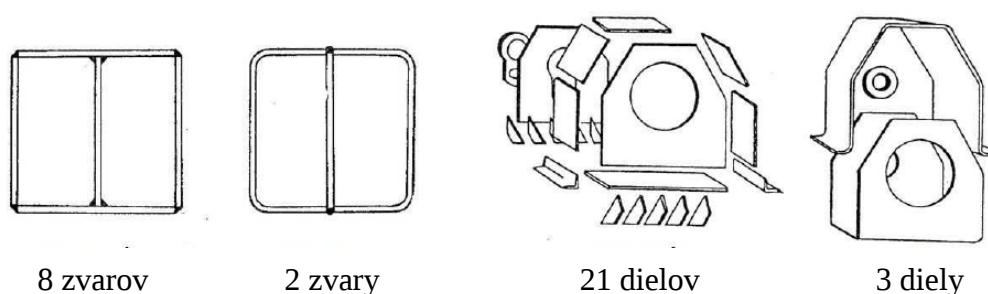
Medzi ďalšie vlastnosti materiálov, ktoré výrazne ovplyvňujú veľkosť napätí a deformácií, patrí tepelná vodivosť λ a tuhosť.

Tepelná vodivosť ovplyvňuje množstvo tepla, ktoré sa odvedie z miesta zvaru. Platí, že čím je λ väčšia, tým je odvod tepla rýchlejší a jeho napäťovo-deformačný účinok menší. Z toho vyplýva, že pre vytvorenie zvarového kúpeľa s dostatočným prievarom je nutné použiť koncentrovanejší zdroj tepla alebo predohrev zváraných častí. Predohrevom sa zníži rýchlosť odvodu tepla zo zvaru. U materiálov s nižšou λ je niekedy naopak nutné materiál v okolí zvaru chladiť vodou, alebo vzduchom. [5]

Tuhosť spoja pri zváraní predstavuje odpor proti pôsobeniu zmršťujúcich síl. Závisí od súčiniteľa dĺžkovej tepelnej rozťažnosti α , modulu pružnosti E , medze klzu R_e a medze pevnosti R_m a konštrukčného riešenia zvarenca. S narastajúcou teplotou sa znižuje medza klzu a tým aj veľkosť oblasti plastickej deformácie. Pri ochladzovaní vzniká tým vyššia úroveň zvyškového napätia alebo deformácie, čím má materiál väčšiu tepelnú rozťažnosť. U materiálov s vyššími hodnotami mechanických vlastností E , R_e a R_m je väčšia schopnosť nahromaďovania napätí pod medzou klzu a lepšia schopnosť menej sa deformovať. Tieto materiály majú väčšinou nižšiu zásobu plasticity, a preto môžu v miestach koncentrácií napätí vznikáť trhliny. Je nutné zvoliť vhodný technologický postup, ktorý obmedzí mieru vzniku miest s vysokou koncentráciou napätí (napr. vznik krehkých štruktúr v TOO). [5,7]

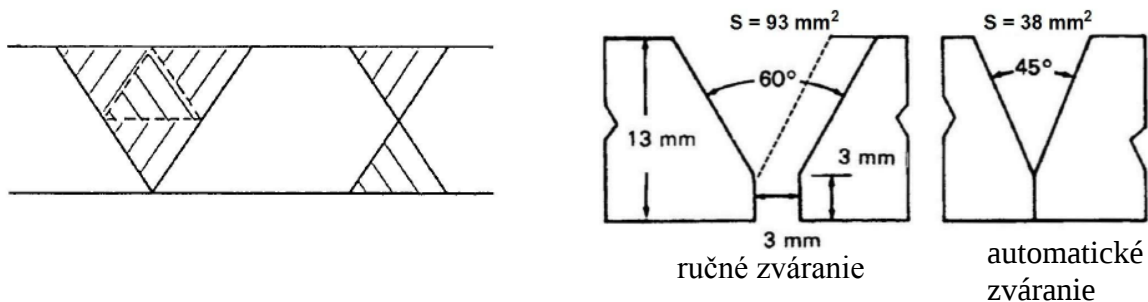
2.1.2 Konštrukcia

Z hľadiska konštrukcie je najlepším spôsobom na zníženie negatívnych účinkov zvaracieho procesu minimalizácia samotného zvarovania. To znamená obmedziť počet a veľkosť zvarov. Tento cieľ môžeme dosiahnuť prispôbením konštrukčného návrhu technológii zvarovania. Tento postup sa nazýva technologickosť konštrukcie. Efektívny je aj z dôvodu ekonomického hľadiska, lebo zvar a odstraňovanie zvyškových napätí a deformácií sú finančne aj časovo náročné. Na základe toho je vhodné, aby sa konštrukcia skladala z menšieho počtu častí a tým aj zvarov. V prípadoch kde je to možné a efektívne treba použiť ohnuté plechy, výkovky a odliatky. Na obr. 14 je zobrazená konštrukcia, ktorá sa skladá z 5 dielov za použitia 8 zvarov. Hneď vedľa je upravený variant, kde sa počet dielov zmenšil na 3 použitím ohnutých plechov a na zostavenie postačia 2 zvary. Druhým príkladom je stavba domčeku ložiska (obr. 14), kde sa prvý variant skladá iba z plochých dielov a druhý s využitím výliskov. Počet dielov sa tak zníži z 21 na 3 kusy. Pri riešení umiestnenia zvarov je vhodné ich umiestniť mimo pôsobísk s koncentráciou napätí. [5,12]



Obr. 13 Zníženie počtov zvarov vhodnou konštrukciou [5]

Ďalším konštrukčným parametrom je hrúbka materiálu. S jej veľkosťou narastá aj veľkosť zvaru, spotreba prídavného materiálu, energií, práce a množstvo vneseného tepla. So zvýšením vneseného tepla narastajú aj jeho negatívne účinky na vznik napätia. S hrúbkou sa zvyšuje aj rýchlosť odvodu tepla, ktorá ešte navyšuje potrebné vnesené teplo. Preto musia byť konštrukcie zhotovené z valcovaných plechov, trubiek, profilov o tenkých hrúbkach steny za využitia ich celkových pevnostných rozsahov. Na druhej strane umožňuje kombinovať materiály rôznych pevností a zvyšovanie tuhosti zostavou do uzavretých komorových konštrukcií. Pre zmenšenie veľkosti zvaru by mal byť pri konštrukcii prítomný technolog, lebo veľkosť závisí od druhu dostupnej technológie zvarovania a prípadnej možnosti použitia automatizácie. U návrhu tupého zvaru ovplyvňuje druh technológie hĺbku a šírku závaru, možnosť zvarovania z oboch strán a pri jednostrannom zvare možnosť použitia podložky. Nepodložený koreň zvaru je kritické miesto, pretože rozmedzie tepelného príkonu medzi neprevarením a pretavením je veľmi úzke. V prípade, že nestačí jednovrstvový tupý spoj, použije sa zvar do úkosu. Je veľmi výhodné použiť obojstranný zvar, objem zvaru je tak polovičný oproti zvaru jednostrannému (obr. 15). Pri použití automatizovanej technológie sa zredukuje množstvo prídavného kovu a vneseného tepla odstránením medzery v koreni (Obr. 15). [5,7]



Obr. 14 Zmenšenie objemu zvaru použitím obojstranného zvaru a automatického zvárania [5]

Na zváranie hrubých plechov je vhodné použiť úkos typu U, ktorý výrazne zmenší plochu zvaru. Jeho príprava je náročnejšia. Najčastejším používaným druhom zvaru je zvar kútový, ktorý nemá vymedzený rozmer a väčšinou nehrozí pretavenie, a preto býva často predimenzovaný. S jeho zbytočnou veľkosťou klesá jeho efektivita. Kútový zvar je výhodný pre ručné zváranie, pretože nevyžaduje vysokú presnosť vedenia a umožňuje použitie vysokého tavného výkonu. [5]

Konštrukčné zásady pre zníženie vzniku napätí a deformácií: [1,7]

- konštrukciu navrhovať s ohľadom na zváranie
- voliť zaručene zvariteľnú oceľ s najnižšou možnou hrúbkou
- voliť minimálny počet zvarov s čo najmenšími prierezmi
- navrhnuť optimálny tvar zvarových plôch s dobrým prístupom k zváraniu
- umiestňovať zvarové spoje do miest, kde nebudú extrémne namáhané (ideálne do neutrálnej osi)
- zvary umiestňovať symetricky a nehromadiť ich v jednom mieste
- používať tupé zvarové spoje, u hrubších materiálov symetrické U, K, X, UU s minimálnym uhlom rozovretia
- pri zváraní konštrukcií zložitých tvarov, rozdeliť ich do podskupín
- predbežná pružná, alebo plastická uhlová deformácia zvarovanej časti v opačnom smere ako je deformácia od zvárania

Konštrukčné zásady pre zníženie pozdĺžnych deformácií: [1,7]

- väčšie konštrukcie zväť v podskupinách v prípade, že pevnostne vyhovuje menší zvar ako je technologicky prípustné,
- používať prerušované kútové zvary
- pri použití prerušovaných zvarov sú vhodnejšie zvary protiľahlé ako zvary striedavé, z dôvodu väčšieho prekrytia splastizovaných oblastí a následnými menšími deformáciami (obr. 16)
- voliť malý prierez zvaru a malý uhol rozovretia úkosu



Obr. 15 Schéma protiľahlého a striedavého zvaru [5]

Konštrukčné zásady pre zníženie priečných deformácií: [1,7]

- voliť malý uhol rozovretia zvarového úkosu
- minimalizovať zváranie
- voliť materiály s čo najmenšou hrúbkou

Konštrukčné zásady pre zníženie uhlových deformácií: [1,7]

- voliť zvary I, U alebo zvary obojstranne symetrické
- minimalizovať zváranie

2.1.3 Voľba technológie

Z technologického hľadiska sa na veľkosti napätí a deformácií najviac podieľa intenzita procesu, teda koncentrácia tepelného zdroja. S narastajúcou intenzitou sa zvyšuje príkon energie na menšiu plochu zvaru. Zmenší sa veľkosť rozovretia zvarových plôch a zmenší sa aj potreba viacvrstvého zvaru, lebo sa dosiahne väčšieho prievaru. Vyším výkonom sa materiál lepšie prehreje a tým sa zníži nutnosť predohrevu a navýši sa rýchlosť zvárania, čím sa stane proces produktívnejší. Pôsobenie menšieho vneseného tepla na jednotku dĺžky zvaru prináša nižšie napätia a deformácie. Pri zváraní elektrickým oblúkom narastá mohutnosť tepelného zdroja s intenzitou zvaracieho prúdu, čo sa prejaví na vyššom odtavení elektródy a výhodnejšom type prenosu zvarového kovu do zvarového kúpeľa. Hustota elektrického prúdu narastá s klesajúcim priemerom elektródy, priemerom drôtu, ale zároveň s tým klesá aj maximálna hodnota prúdu, ktorú je schopná preniesť. Optimálna veľkosť priemeru drôtu pre tieto protikladné podmienky je 1 - 1,2 mm. Metóda MIG/MAG prináša vyššiu intenzitu prúdu kombináciou zdroja, drôtu a ochrannej atmosféry, ktorá zlepšuje tvar zvaru a druh prenosu kovu. Omnoho väčšie koncentrácie zdroja umožňujú novšie technológie ako: zváranie laserom, plazmou a elektrónovým lúčom. Ručné zváranie výrazne obmedzuje výhody zintenzívnenia procesu a výsledok závisí od zručnosti zvárača, preto sa zvýšenie koncentrácie tepelného zdroja uplatní najmä u automatického zvárania. [5]

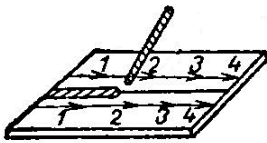
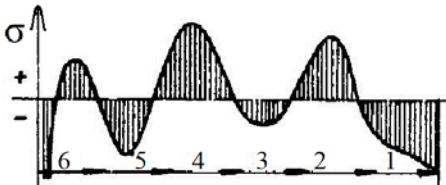
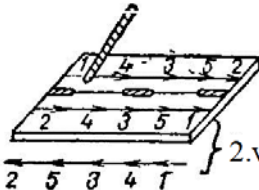
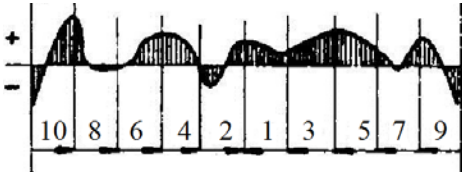
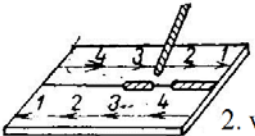
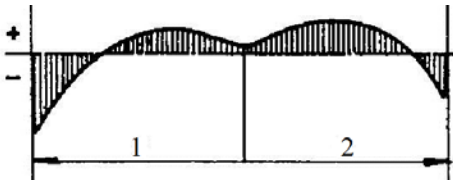
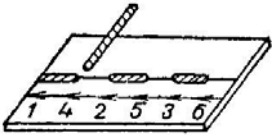
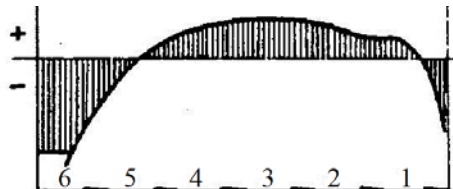
Stehovanie je potrebné navrhovať s ohľadom na skutočnosť že stehy spôsobujú svojím počtom a veľkosťou priečne zmrštenia. S prihliadnutím na tento fakt by mal byť ich počet a dĺžka čo najmenšia a mali by byť rozmiestnené rovnomerne po celej dĺžke zvarku. Musia byť dostatočné na zabezpečenie primeranej medzery v koreni v priebehu celého zvárania prvej húsenice. [5,7]

Doporučená rozteč stehov závisí od hrúbky materiálu:

$$l = 25 \cdot s \text{ [mm]} \quad (2.1)$$

Ako prvé sa stehujú konce plechov a potom stred, pričom smer stehovania je od okrajov do stredu.

Postup kladenia zvarových húseníc má tiež vplyv na veľkosť napätia a deformácií. Pri kladení húseníc jedným ťahom je veľkosť deformácií veľká a napätia môžu byť malé. Pri kladení striedavom je veľkosť deformácií aj napätí stredná. Zváraním vratným krokom pri striedavom kladení sa dosahujú veľmi malé deformácie a napätia môžu dosiahnuť až medze klzu. S toho dôvodu je potrebné voliť spôsob kladenia húseníc podľa toho, či chceme zmenšiť deformácie alebo napätia. Vplyv kladenia húseníc na veľkosti napätí a deformácií je zobrazený na obr. 17. [5,7]

Postup zvarania	Veľkosť napätí	Veľkosť deformácií	Priebeh napätí
Zváranie jedným ťahom 	veľmi malé	veľké	
Zváranie striedavé 	stredné	stredné	
Zváranie vratným krokom 	stredné	Malé	
Zváranie striedavým vratným krokom 	veľké	veľmi malé	

Obr. 16 Vplyv kladenia húseníc na veľkosti napätí a deformácií [5,7]

Technologické zásady znižovania napätí: [1,7]

- zváranie voľných, neupnutých dielov znižuje priečne napätia
- zváranie s vyššou intenzitou procesu na jednotku dĺžky zvaru znižuje pozdĺžne napätia
- miestny predohrev alebo predpätie
- zvarať jedným ťahom

Technologické zásady potlačenia deformácií: [1,7]

- vnášať čo najmenšie teplo s vysokou koncentráciou
- zvarať vysokou rýchlosťou a malou intenzitou zvaracieho prúdu
- používať zvary s čo najmenším počtom vrstiev

- obojstranné zvary zvärať súčasne, v prípade, kedy to nie je možné, zvärať viacvrstvé zvary striedavo z oboch strán, aby sa vyrovnali deformácie
- zvärať od geometrického stredu alebo neutrálnej osi

znižovanie priečných deformácií: [1,7]

- vonkajšie tuhé upnutie
- zmenšenie prierezu zvaru
- zníženie intenzity procesu na jednotku dĺžky zvaru
- vhodné stehovanie
- zvärať vratným krokom
- zvärať vysokou rýchlosťou a malou intenzitou zväracieho prúdu
- používať automatizované spôsoby zvárania
- používať čo najmenší počet vrstiev zvaru

znižovanie pozdĺžnych deformácií: [1,7]

- zvarenec čo najmenej tepelne ovplyvňovať, zvärať s malou intenzitou prúdu a vysokou rýchlosťou
- kladenie väčšieho počtu kratších zvarových húseníc
- zváranie s malým závarom
- vhodný spôsob vyplňovania úkosu (prestávky medzi zvarmi)
- zvärať vratným alebo striedavo vratným krokom
- zvärať a stehovať smerom od stredu zvarenca k okrajom
- obojstranné zvary zvärať súčasne

znižovanie uhlových deformácií: [1,7]

- tuhé upnutie
- menší počet zvarových húseníc
- vhodná úprava zvarových plôch
- vhodná voľba zväracieho režimu
- predbežná pružná alebo plastická deformácia zvárannej časti v opačnom smere ako je deformácia od zvárania
- zvärať automatizovaným spôsobom
- zvärať vysokou rýchlosťou a malou intenzitou prúdu
- zvärať vratným krokom

Pri voľbe vhodnej konštrukcie a technológie treba brať do úvahy aj to, aký druh deformácie je pre danú súčasť najviac nežiaduci. Zatiaľ čo zmena jedného parametru zníži deformácie priečne môže naopak zvýšiť deformácie uhlové a naopak.

2.2 Znižovanie napätí vzniknutých zvaracím procesom

Napätia v zvaroch sa dajú znížiť aj po zvarení. Metódy na zníženie zvyškových napätí môžeme rozdeliť na: [1]

- **tepelné** – žiňaním na zníženie vnútorných napätí
- **mechanické** – prekovaním, vibráciami, mechanickým zaťažením

2.2.1 Žiňaním

Pri žiňaní na zníženie vnútorných napätí sa zvarok pomaly ohrieva v peci pod eutektoidnú teplotu A1 v obvyklom rozmedzí 530 až 650 °C. Následkom zníženia medze klzu sa pružné deformácie uvoľňujú miestnou plastickou deformáciou počas zotrvania na tejto teplote. Doba výdrže závisí od teploty žiňania, druhu materiálu, veľkosti a hrúbky stien. Zvyčajne sa pohybuje v rozmedzí 1 až 2 hodiny. Zvyšovaním teploty sa skráti doba zotrvania. U mikrolegovaných ocelí môže dôjsť ale k zhrubnutiu karbidu, čo má za následok zníženie pevnosti v klze a degradácie priaznivých krehko lomových vlastností. Ohrev aj ochladzovanie by mali byť pozvoľné, aby nedochádzalo k vzniku nových napätí. U konštrukcií s veľkým rozdielom hrúbok stien musí byť proces ešte pomalší. Ochladzovanie prebieha buď v peci, alebo na vzduchu. V prípade potreby je možné žiňanie vykonávať v peci s ochrannou atmosférou, aby nemohlo dôjsť k oxidácii povrchu. Na obr. 18 je vozová žiňacia pec pre veľké diely a konštrukcie. Pri žiňaní komorových konštrukcií a uzavretých zvarov je potrebné zaistiť uvoľnenie uzavretého vzduchu napr. ponechaním otvoru alebo nedovarením konštrukcie, aby mohol vzduch unikať. Stlačený vzduch by za vysokej teploty mohol spôsobiť vydutie stien. Tenké steny by mali byť vystužené, aby nedošlo k ich zboreniu. Správne vykonané žiňanie zlepšuje rozmerovú stabilitu, zníži tvrdosť v tepelne ovplyvnenej oblasti a zníži náchylnosť ku krehkému lomu. Z ekonomického hľadiska je žiňanie veľmi nákladné, z dôvodov veľkej spotreby energie na ohrev a časovej náročnosti. [1,5]



Obr. 17 Vozová žiňacia pec [16]

2.2.2 Vibráciami

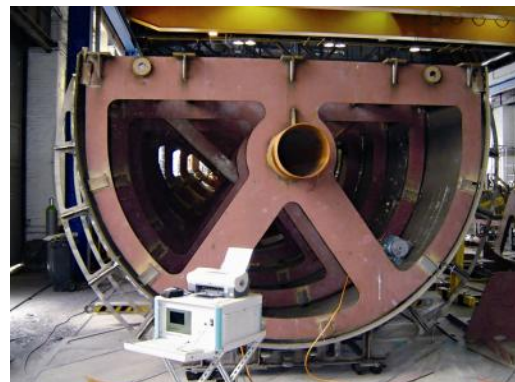
Vnútorné napätie je možné znížiť aj pomocou vibrácií, princípom plastického pretvorenia ocele (odstránením špičiek napätia). Uvoľnenie napätia pomocou vibrácií sa dosiahne uvedením zvarenej konštrukcie do jedného alebo viacerých rezonančných stavov (prípadne subrezonančných stavov), použitím vibrátorov. Rezonancia vyvolá miestne plastické pretvorenia a prerozdelí vnútorné napätia po zvaraní. Uvoľnenie prebieha interakciou dislokácií, elementárnymi sklzmi v zrnách, za vzniku mikropplastických deformácií v ťahu aj tlaku. U rezonančného vibrovania sa zvarenec pružne uloží na gumové podložky a vibrátor sa pevne uchyť na čo najhmotnejšiu časť zvarenca, čo najďalej od neho sa uchyť snímač kmitov, pomocou ktorého sa hľadajú rezonančné frekvencie telesa (obr. 19). Vibrovanie prebieha pri niekoľkých rezonančných frekvenciách (najmenej troch). Následne sa vykonáva rezonančné



Obr. 18 Vibračné zariadenie [14]

vibrovanie po dobu niekoľkých minút. Rezonančné vibrátory používajú nízkofrekvenčné (20 až 100 Hz) kmitanie s vysokou amplitúdou. Vyhľadanie rezonančných frekvencií trvá približne dve minúty a vlastné vibrovanie 10 až 30 minút podľa hmotnosti zvaru. [1,5,13]

Využitie vibračných metód má niekoľko výhod oproti žíhaniu. Vzhľadom na tento fakt v súčasnosti narastá počet vibračných zariadení, ktoré nahrádzajú žíhanie. Na rozdiel od žíhania nedochádza k zmene štruktúry v TOO a zníženiu mechanických vlastností. Pri žíhaní klesne medza pevnosti a klzu približne o 10%. Výrazná je aj úspora nákladov na zariadenie a jeho prevádzku. Zariadenie má dlhú životnosť a je nenáročné na údržbu. Spotreba energie je v porovnaní so žíhaním len 5%. Nižšie sú aj náklady na obsluhu a manipuláciu so zvarcami. Konštrukcie sa nemusia prevážať a zníženie napätia sa môže vykonať priamo vo zvarovni (obr. 20). Rovnako dôjde aj k úspore výrobných časov a pracnosti. V peci musí stráviť výrobok niekoľko hodín u, ale vibrovania klesne tento čas na minúty. Na výrobku nedochádza k vzniku okují a zachováva si rozmerovú stálosť. Z hľadiska hmotnosti výrobku je metód vhodná najmä pre výrobky ťažšie ako 100 kg. Z hľadiska materiálu pre rôzne druhy liatin, ocelí s malým obsahom uhlíku, austenitických ocelí, z kaliteľných ocelí v žíhanom alebo inak tepelne spracovanom stave a pre zliatiny ktoré nemôžeme tepelne spracovať. [5,15,20]



Obr. 19 Proces odstraňovania vnútorných napätí u nosnej konštrukcie [20]

3 EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

Pre overenie výpočtu priecnej deformácie a porovnanie jeho výsledku s reálnymi hodnotami bol zhotovený zvarový spoj dvoch plechov, na ktorom boli merané priecne deformácie. Z takto zhotoveného zvaru bola odobraná vzorka na metalografický výbrus, z ktorého boli získané hodnoty potrebné pre výpočet.

3.1 Základný materiál

Materiál ČSN 11 373 je nelegovaná konštrukčná oceľ obvyklých vlastností, vhodná k zváraniu oceľových konštrukcií namáhaných staticky aj dynamicky a menej namáhaných zvarovaných potrubí. Podľa normy EN 10027-1 odpovedá materiálu S235JRG1. Požiadavky na chemické zloženie, vlastnosti ocele a hodnoty mechanických vlastností stanovuje norma ČSN 41 1373. [3]

Tab. 3.1 Chemické zloženie ocele [3]

Materiál	C [hm.%]	P [hm.%]	S [hm.%]	N [hm.%]
11 373	max. 0,17	max. 0,045	max. 0,045	max. 0,007

Mechanické vlastnosti pre hrubé plechy valcované za tepla pre hrúbky 3 až 16 mm súuvedené v tab. 3.2

Tab. 3.2 Mechanické vlastnosti ocele 11 373 [3]

R _{eH} [MPa]	R _m [MPa]	A ₅ [%]	KV [J]	E [GPa]
min 235	340-470	min 24	min. 27	206

Fyzikálne vlastnosti pre oceľ 11 373 sú uvedené v tab. 3.3.

Tab. 3.3 Fyzikálne vlastnosti ocele 11 373 [3]

Hustota ρ [kg.m ⁻³]	Súčiniteľ tep. rozťažnosti α [K ⁻¹]	Tepelná vodivosť λ [W.m ⁻¹ K ⁻¹]
7850	11,1.10 ⁻⁶	54,5

3.2 Príprava a zvar vzorku

V rámci experimentu bol zhotovený zvarový spoj dvoch oceľových plechov z materiálu 11 373 o hrúbke $S = 3$ mm. Oceľ 11 373 má predpísané maximálne množstvo uhlíku 0,17%, preto je zaručene zvariteľná. Na začiatku boli plechy zostehované ručne tromi stehmi na krajoch a v strede plechov, z dôvodu zaistenia medzery v koreni zvaru. V priečnom smere boli zhotovené tri čiary, podľa ktorých sa merala šírka vzorku. Takto prichystané plechy boli upevnené pomocou svoriek na pracovný stôl (obr. 21). Zvar bol



Obr. 20 Upevnenie plechu

zhotovený v celej dĺžke plechu metódou MIG s veľkosťou prúdu $I = 108 \text{ [A]}$ a strojným posuvom horáku so zväracou rýchlosťou $v = 55 \text{ [cm} \cdot \text{min}^{-1}\text{]}$. Veľkosť napätia U si nastavuje zdroj sám. Postupne boli navarené tri húsenice a po každej zmeraná šírka plechu na vyznačených miestach. Parametre zvárania sú uvedené v tab. 3.4. [3]

Tab. 3.4 Parametre zvárania

Zdroj: TransPuls Synergic 4000

Použitý prúd: $I = 108 \text{ A}$

Napätie: -

Priemer drôtu: $\phi = 0,8 \text{ mm}$

Zväracia rýchlosť: $v = 55 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$



Obr. 21 Zdroj [11]

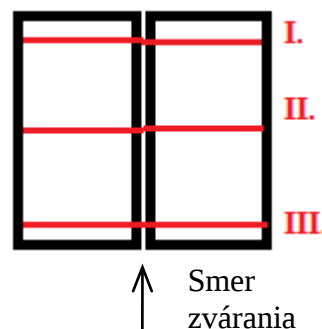
Na obr. 23 je zobrazený výsledný zvar plechov po navarení 3 húseníc. Šírky vzorku boli merané digitálnym posuvným meradlom značky Sylvac s rozsahom 200 mm a rozlíšiteľnosťou 0,01 mm. Namerané hodnoty sú uvedené v tab. 3.5 spolu so schémou merania (obr. 24). Posledný riadok tabuľky obsahuje výsledné priečne deformácie získané rozdielom počiatočných rozmerov a rozmerov nameraných po vychladnutí zvaru. [11]



Obr. 22 Zvar

Tab. 3.5 Nameraná hodnoty

	I. [mm]	II. [mm]	III. [mm]
Rozmer po zostehovaní	154,31	155,18	156,2
1. húsenica	154,1	155,04	156,15
2. húsenica	154,02	154,95	154,24
3. húsenica	153,86	154,37	155,37
Priečna deformácia	0,5	0,81	0,83



Obr. 23 Schéma merania

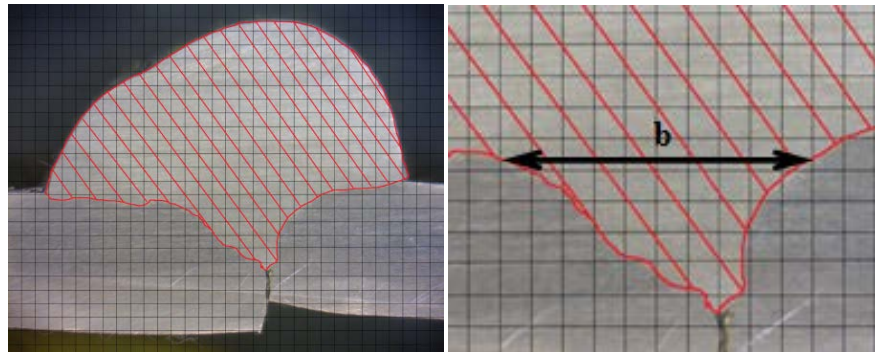
Pre výpočet pričného zmrštenia zvarového vzorku bolo nutné vytvoriť metalografický výbrus (obr. 25) a určiť veľkosť plochy zvaru. Vzorka výbrusu pochádza z oblasti medzi meranými hodnotami I. a II. Plocha zvaru bola spočítaná grafickou metódou za vytvorenia pomocnej mriežky. Plocha jedného štvorčeku v mriežke je rovná $0,09 \text{ mm}^2$. Celková plocha sa skladá približne z 355 štvorčekov. Jej veľkosť predstavuje $31,95 \text{ mm}^2$ a je zobrazená šrafovaná na obr. 26. Zvar sa ale skladá z troch húseníc, preto bola vo výpočtoch bola použitá iba $1/3$ z celkovej plochy, čo predstavuje $10,65 \text{ mm}^2$. Veľkosť pričnej deformácie bola vypočítaná vzorcom 1.3.



Obr. 24 Metalografický výbrus

$$Z_p = 0,1716 \cdot \frac{S_{sv}}{s} + 0,0121 \cdot b_s = 0,1716 \cdot \frac{10,65}{3} + 0,0121 \cdot 3 = 0,645 \text{ mm}$$

Výsledná vypočítaná pričná deformácia je rovná $0,645 \text{ mm}$.



Obr. 25 Plocha a stredná šírka zvaru

Pri porovnaní hodnôt odmeraných a vypočítaných deformácií je zrejmé, že vypočítaná deformácia sa nachádza v rozmedzí deformácií odmeraných. Tieto výsledky sú len orientačné. Už z obr. 25 je zrejmé, že nedošlo k prevareniu v celej šírke plechu, čo má pravdepodobne aj vplyv na výsledné hodnoty. Dôvodom neprevareného koreňa mohla byť napríklad nízka intenzita zvaracieho prúdu. [9]

4 VPLYV ZMENY PARAMETROV

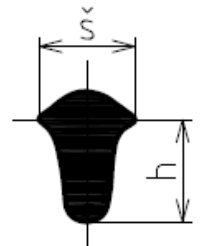
V rámci experimentu bola vyhodnotená priečna deformácia na základe plochy priečného prierezu zvaru. Hlavný vplyv na rozmery a formu zvaru má množstvo tepla uvoľneného v elektrickom oblúku, ktoré je funkciou zvaracieho napätia, prúdu a rýchlosti zvarovania. Parametre ovplyvňujúce veľkosť a formu zvaru môžeme rozdeliť na: [9]

Hlavné parametre: – zvarací prúd I [A],
– napätie na oblúku U [V],
– rýchlosť zvarovania v [$m \cdot h^{-1}$]

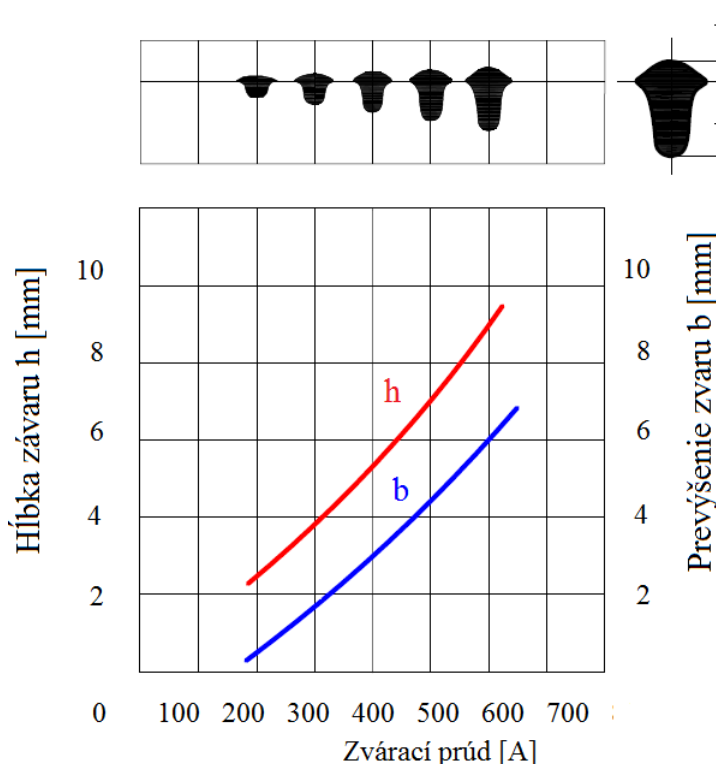
Vedľajšie parametre: – priemer zvaracieho drôtu [mm],
– sklon elektródy [$^{\circ}$],
– sklon základného materiálu [$^{\circ}$],
– vyloženie elektródy a vzdialenosť horáku plynovej dýzy od povrchu zvarovaného materiálu [mm],
– druh a prietokové množstvo ochranného plynu,
– charakter zvaracieho prúdu a jeho polarita

4.1 Zvarací prúd

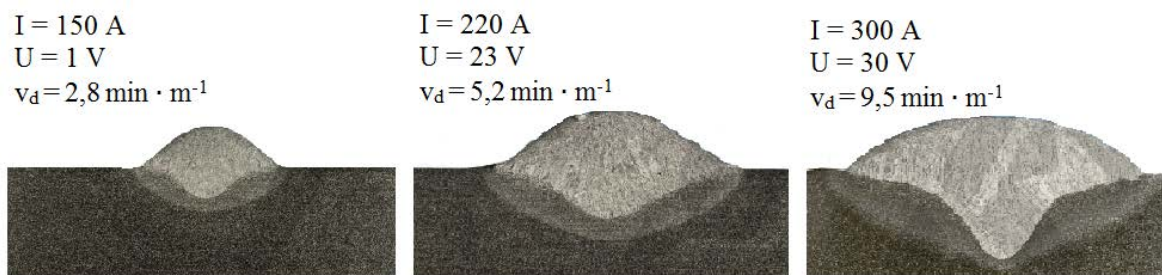
Množstvo nataveného kovu je priamo úmerné intenzite zvaracieho prúdu. S nárastom prúdu dôjde k hlbšiemu prievaru do základného materiálu a zmenší sa súčiniteľ formy zvaru ϕ , ktorý je vyjadrený pomerom šírky zvaru ($\tilde{s}$) k hĺbke prevarenia (h) vid obr. 27. So zmenou zvaracieho prúdu dochádza aj k zmene rýchlosti podávania drôtu. Vplyv zvaracieho prúdu na hĺbku a výšku prevýšenia zvarovej húsenice za konštantného napätia je znázornený na obr. 28. [9]



Obr. 26 Tvar zvaru [9]



Obr. 27 Závislosť hĺbky závaru a prevýšenia zvaru od zvaracieho prúdu [9]



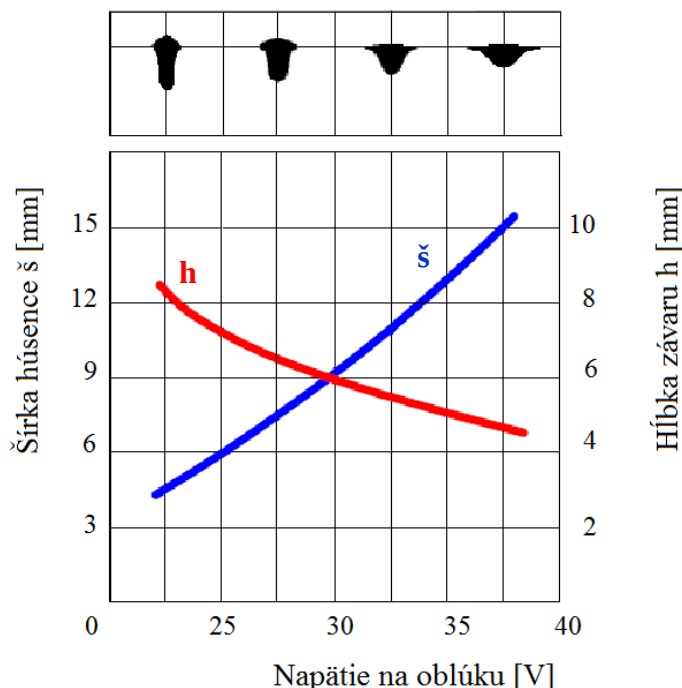
Obr. 28 Vplyv zvaracieho prúdu na tvar zvarovej húsenice [9]

Na obr. 29 sú zobrazené tri priečne rezy zvarových húseníc. Každá z nich je navarená rozdielnou veľkosťou zvaracieho prúdu. Ochranný plyn, priemer drôtu a rýchlosť zvarovania sú vo všetkých troch prípadoch rovnaké. Zmena v napätí a rýchlosti podávania drôtu je spôsobená zmenou prúdu, pretože veličiny sú na sebe závislé a automaticky regulované.

Pre zmenšenie priečných deformácií je vhodné aby bol prierez zvarovania čo najmenší. Pri vzrastajúcom prúde však narastá hĺbka a prevýšenie zvaru a tým aj jeho celková plocha. Z toho dôvodu je vhodnejšie zvarovať menšou intenzitou prúdu a používať plechy s čo najmenšou prípustnou hrúbkou plechu, aby aj pri nízkom prúde došlo k prevareniu koreňa. [1,7,9]

4.2 Napätie

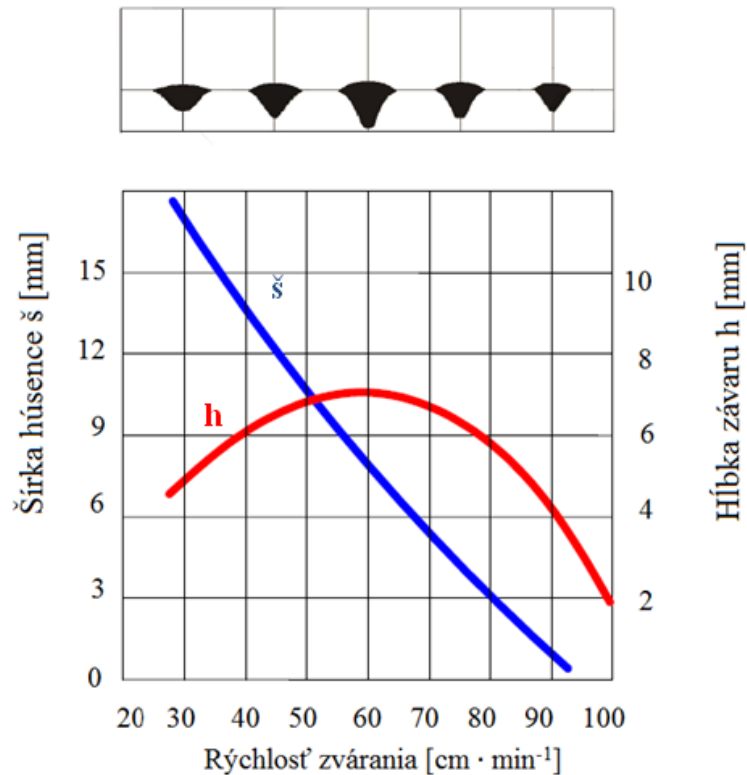
Veľkosť napätia nemá taký výrazný vplyv na výkon odtavenia ako zvarací prúd, ale predovšetkým ovplyvňuje šírku zvarovej húsenice a prenos kovu v oblúku. Zo vzrastajúcim napätím pôsobí vzniknuté teplo na väčšiu plochu základného materiálu, preto sa hĺbka pretavenia znižuje a šírka zvarovej húsenice zväčšuje (obr. 30). Veľkosť napätia ovplyvňuje aj druh ochranného plynu. Pri ochrannej atmosfére CO_2 je napätie o 2 až 3 V väčšie ako pri zmesných plynch na báze argónu. Pri moderných zdrojoch sa napätie nastavuje automaticky podľa veľkosti prúdu, druhu a priemeru drôtu taviacej sa elektródy a druhu použitého ochranného plynu. Nadmerné napätie spôsobuje zvýšenie rozstreku a pórovitosť zvaru. Pri nedostatočne vysokom napätí dochádza k vysokému prevýšeniu zvaru a zvyšuje sa riziko neprievarov. [9]



Obr. 29 Vplyv napätia na oblúku na šírku húsenice a hĺbku závaru [9]

4.3 Rýchlosť zvarania

S konštantným napätím na oblúku a so zvaracím prúdom sa spolu so zmenou rýchlosti zvarania mení množstvo tepla, generovaného v elektrickom oblúku, na jednotku dĺžky zvaru. Šírka zvarovej húsenice s narastajúcou rýchlosťou výrazne klesá. Hĺbka závaru najskôr narastá, ale po dosiahnutí maxima začne prudko klesať (obr. 31). Pri ručnom zvaraní sa rýchlosť pohybuje v rozsahu 10 až $60 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ a pri strojovom môže dosiahnuť až $120 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$. Pri ručnom zvaraní je rýchlosť významným parametrom. Zvárač ňou ovplyvňuje formovanie zvarovej húsenice a zabezpečuje tak jej predpísaný rozmer, tvar a kresbu. [9]

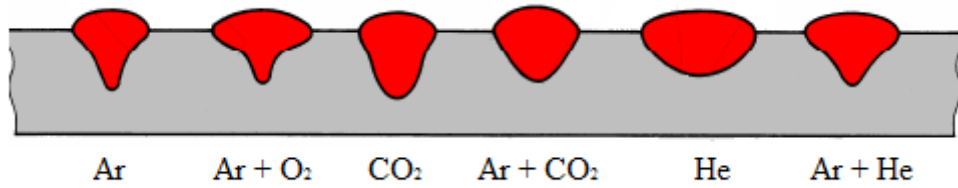


Obr. 30 Vplyv rýchlosti zvarania na hĺbku závaru a šírku [9]

Pre obmedzenie priečných deformácií je teda najvhodnejšie používať vyššie rýchlosti zvarania, ale treba dávať pozor na dostatočnú hĺbku závaru. Vyššia rýchlosť prináša menšie vnesené teplo na jednotku dĺžky zvaru a tým dôjde k zníženiu napätí aj deformácií. [1,7,9]

4.4 Ochranný plyn

Pri zvaraní metódami MIG/MAG sa používajú buď inertné, alebo aktívne plyny, prípadne ich zmesi. Ochranný plyn chráni zvar pred nečistotami z atmosféry, vytvára dobré ionizačné prostredie pre štart a horenie oblúka a pomáha odvodu spalín. Druh zvoleného plynu má vplyv na tvar a rozmer kvapiek z nataveného konca elektródy a na ich prenos v oblúku. Vplýva aj na výsledný tvar a rozmery zvaru (obr. 32) a kvalitu jeho povrchu. [9]



Obr. 31 Tvar prierezu zvaru v závislosti na druhu použitého ochranného plynu [9]

Z hľadiska prierezu zvaru je pre zníženie priečných deformácií najvhodnejší úzky tvar zvaru s dostatočným prievarom. Z obr. 32 by sa dali za najvhodnejšie použiť ochranné plyny Ar a CO_2 . Avšak druh ochranného plynu nemá na deformácie až tak významný vplyv, ako doposiaľ uvedené parametre. [1,7,9]

ZÁVERY

V bakalárskej práci boli zhrnuté teoretické poznatky vzniku napätí a deformácií a ich rozdelenie. V teoretickej časti boli uvedené postupy na stanovenie veľkosti priečných deformácií výpočtovou metódou v závislosti na rozličných parametroch zvarovania.

Práca popisuje technologicko konštrukčné možnosti a postupy, ktorými je možné ovplyvniť veľkosť vznikajúcich napätí a deformácií v procese zvarovania. Bližšie charakterizuje najpoužívanéjšie metódy a ich princípy na znižovanie vnútorných napätí už zhotovených zvarkov.

V experimentálnej časti bol zhotovený tupý zvarový spoj dvoch plechov z ocele 11 373. Zváranie bolo prevedené taviacou sa elektródou v ochrannom plyne s automatickým posuvom horáku. Zvar pozostával s troch postupne kladených zvarových húseníc. Po navarení každej húsenice bola zmeraná zmena rozmeru v smere kolmom na os zvaru. Rozdielom počiatočných rozmerov a rozmerov plechu po zvarení boli určené deformácie v troch meraných miestach. Deformácie získané meraním mali veľkosti 0,5 mm v I. mieste merania, 0,81 mm v II. a 0,83 mm v III. mieste merania.

Zo zhotoveného zvarku bola odobratá vzorka na metalografický výbrus. Vzorka pochádzala z oblasti medzi I. a II. meraným miestom. Výbrus slúžil na zmeranie veľkosti plochy zvaru, ktorá bola potrebná pre výpočet priečnej deformácie. Veľkosť deformácie získanej výpočtovou metódou bola 0,645 mm. Táto hodnota je orientačná, z dôvodu neprevarenia koreňa na vzorke.

Pre adekvátne porovnanie výpočtovej metódy s nameranými hodnotami, by bolo potrebné vykonať experiment na viacerých vzorkách.

ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

1. BARTÁK, Jiří. *Výroba a aplikované inženýrství ve svařování: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 1. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2000, 213 s. ISBN 80-857-7172-1.
2. BMW X7: Confirmed, And Will Likely Be Their Largest SAV/Crossover Yet. *IMotor Times* [online]. [cit. 2015-05-12]. Dostupné z: <http://www.imotortimes.com/bmw-x7-confirmed-and-will-likely-be-their-largest-savcrossover-yet-report-26970>
3. ČSN 41 1373. *Ocel 11 373*. Praha: Český normalizační institut, 1.4.1994.
4. GRUTKA, Emil a Ján ZVIRINSKÝ. *Teória zvarania: Návod na cvičenia*. Bratislava: Alfa, 1986.
5. HUDEC, Zdeněk. *Deformace a napětí při svařování*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita, 1998, 76 s. ISBN 80-708-3313-0.
6. KANDUS, Bohumil a Jaroslav KUBÍČEK. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 1. vyd. Ostrava: Zeross, 2001, 395 s. Svařování. ISBN 80-857-7181-0.
7. KUČERA, Jan. *Teorie svařování - část 2*. Ostrava: VŠB, 1994, 207-402 s.
8. KUNCIPÁL, Josef et al. *Teorie svařování*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1986, 272 s. 04-211-86.
9. MARÔNEK Milan, BÁRTA Jozef. *Multimediálny sprievodca technológiou zvarania*. Slovenská technická univerzita, Materiálovotechnologická fakulta v Trnave, 2007. 343 s. ISBN 978-80-8096-066-7
10. MESSLER, Robert W. *Principles of Welding: Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy* [online]. New York: John Wiley, 1999, 662 s. [cit. 2015-03-18]. ISBN 04-712-5376-6. Dostupné z: <http://www.greatnorthernprepper.com/wp-content/uploads/2013/01/Principles-of-Welding-Processes-Physics-Chemistry-Metallurgy-Messler-1999.pdf>
11. MIG/MAG: TransPuls Synergic 4000. *FRONIUS INTERNATIONAL* [online]. [cit. 2015-04-12]. Dostupné z: http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/fronius_international/hs.xsl/79_4644_ENG_HTML.htm
12. Napätia a deformácie zo zvarania. [Http://www.histproject.no/](http://www.histproject.no/) [online]. [cit. 2015-03-24]. Dostupné z: http://www.histproject.no/sites/histproject.no/files/Kap3_STRESSES_and_deformations.pdf
13. PILOUS, Václav. *Tepelné zpracování konstrukcí svařených z normalizačně žíhaných a normalizačně válcovaných ocelí S235 a S355 ve shodě s ČSN EN ISO 17663* [online]. 2012 [cit. 2015-04-14]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/tepelne-zpracovani-konstrukci-svarenych-z-normalizacne-zihanych-a-normalizacne-valcovanych-oceli-s235-a-s355-ve-shode-s-csn-en-iso-17663/>
14. VIBRAČNÉ SPRACOVÁVANIE. *Výskumný ústav zvaračský - Priemyselný inštitút SR* [online]. [cit. 2015-05-03]. Dostupné z: <http://www.vuz.sk/inzinierske-sluzby/Vibracne-spracovavanie/>

15. VIBROVÁNÍ. *Petr Arpáš s.r.o.* [online]. [cit. 2015-04-27]. Dostupné z: <http://www.petrarpassro.cz/vibrovani/>
16. Výrobky: Vozové žíhací pece. *E-therm TZ s.r.o.* [online]. [cit. 2015-05-03]. Dostupné z: <http://www.ethermtz.cz/vyrobky/vozove-zihaci-pece/>
17. Výukové materiály pro svářečské školy. *DOM - ZO 13, s.r.o.* [online]. [cit. 2015-03-03]. Dostupné z: <http://www.domzo13.cz/zkouseni/vyukove-materialy.html>
18. WEST END MACHINE & WELDING, INC. *Welding* [online]. [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: <http://westendmachine.com/welding/>
19. What is weld distortion? *KOBE STEEL, LTD.* [online]. [cit. 2015-03-05]. Dostupné z: http://www.kobelco-welding.jp/education-center/abc/ABC_2006-03.html
20. ZIMMER, Wolfgang. *Vibrace odstraňují vnitřní napětí v materiálech* [online]. 2010, [cit. 2015-04-27]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/vibrace-odstranuji-vnitri-napeti-v-materiallech.html>

Zoznam Použitých Symbolov a Skratiek

Skratka	Popis	Jednotka
A ₁	Teplota eutektoidnej premeny v systéme Fe-C	[°C]
MAG	Metal Active Gas – zváranie v aktívnej ochrannnej atmosfére taviacou sa elektródou	[-]
MIG	Metal Inert Gas – zváranie v inertnej ochrannnej atmosfére taviacou sa elektródou	[-]
TOO	Tepelne ovplyvnená oblasť	[-]

Označenie	Legenda	Jednotka
A	Ťažnosť	[%]
a	Súčiniteľ tepelnej vodivosti	[m ² · s ⁻¹]
b _s	Stredná šírka zvaru	[mm]
E	Modul pružnosti v ťahu pri izbovej teplote	[GPa]
h	Hĺbka prevarenia	[mm]
I	Prúd	[A]
K	Koeficient využitia tepla elektrického oblúku	[-]
KV	Nárazová práca	[J]
k	Koeficient podľa metódy zvárania	[-]
L	Počiatková dĺžka	[mm]
L ₀	počiatočná dĺžka	[mm]
L ₁	Veľkosť ubitej oblasti	[mm]
q	Mohutnosť zdroja tepla	[cal · cm ⁻¹]
Re	Medza sklzu	[MPa]
Rm	Medza pevnosti	[MPa]
Rp 0,2	Zmluvná medza sklzu	[MPa]
S _{sv}	Plocha priečneho prierezu zvaru	[mm ²]
s	Hrúbka zváraných dosiek	[mm]
š	Šírka zvaru	[mm]
T	Teplota	[°C]
U	Napätie	[V]
v	Rýchlosť zvárania	[cm · min ⁻¹]
Z _p	Priečna deformácia	[mm]

ΔL	Veľkosť lineárnej teplotnej rozťažnosti	[m]
ΔT	Zmena teploty	[K]
α	Koeficient lineárnej tepelnej rozťažnosti	[K ⁻¹]
λ	Tepelná vodivosť	[W · m ⁻¹ · K ⁻¹]
λ ₁	Koeficient	[-]
λ ₂	Koeficient	[-]
φ	Priemer drôtu	[mm]
η	koeficient vplyvu tepla oblúka na vývin deformácií	[-]
ε	Pomerné predĺženie	[-]
σ	Napätie	[MPa]

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 1 Zváranie [2,18]	- 9 -
Obr. 2 Závislosť mechanických vlastností ocele na zmene teploty [4]	- 10 -
Obr. 3 Zmena medze klzu s nárastom teploty [4]	- 11 -
Obr. 5 Jednostranné upnutie s dorazom [17]	- 12 -
Obr. 4 Jednostranné upnutie [17]	- 12 -
Obr. 7 Tupý zvar plechov [1]	- 13 -
Obr. 6 Upnutie z oboch strán [17]	- 13 -
Obr. 8 Priebeh napätí pri zvarení dosiek a vplyv šírky zváraných dosiek na priebeh pozdlžných napätí v smere osi zvaru [1]	- 14 -
Obr. 9 Priebeh priečných napätí [j]	- 14 -
Obr. 10 Uhlová, pozdlžna a priečna deformácia [4]	- 15 -
Obr. 11 Stredná šírka zvaru [1]	- 16 -
Obr. 13 Závislosť zmrštenia na hrúbke plechu a závislosť zmrštenia na celkovej ploche zvaru [1]	- 17 -
Obr. 14 Zníženie počtov zvarov vhodnou konštrukciou [5]	- 19 -
Obr. 15 Zmenšenie objemu zvaru použitím obojstranného zvaru a automatického zvárania [5]	- 20 -
Obr. 16 Schéma protiľahlého a striedavého zvaru [5]	- 20 -
Obr. 17 Vplyv kladenia húseníc na veľkosti napätí a deformácií [5,7]	- 22 -
Obr. 18 Vozová žihacia pec [16]	- 24 -
Obr. 19 Vibračné zariadenie [14]	- 24 -
Obr. 20 Proces odstraňovania vnútorných napätí u nosnej konštrukcie [20]	- 25 -
Obr. 21 Upevnenie plechu	- 26 -
Obr. 22 Zdroj [11]	- 27 -
Obr. 24 Schéma merania	- 27 -
Obr. 23 Zvar	- 27 -
Obr. 26 Plocha a stredná šírka zvaru	- 28 -
Obr. 25 Metalografický výbrus	- 28 -
Obr. 28 Závislosť hĺbky závaru a prevýšenia zvaru od zvaracieho prúdu [9]	- 29 -
Obr. 27 Tvar zvaru [9]	- 29 -
Obr. 29 Vplyv zvaracieho prúdu na tvar zvarovej húsenice [9]	- 30 -
Obr. 30 Vplyv napätia na oblúku na šírku húsenice a hĺbku závaru [9]	- 30 -
Obr. 31 Vplyv rýchlosti zvárania na hĺbku závaru a šírku [9]	- 31 -
Obr. 32 Tvar prierezu zvaru v závislosti na druhu použitého ochranného plynu [9]	- 32 -

ZOZNAM TABULIEK

Tab. 3.1 Chemické zloženie ocele [3]	- 26 -
Tab. 3.2 Mechanické vlastnosti ocele 11 373 [3]	- 26 -
Tab. 3.3 Fyzikálne vlastnosti ocele 11 373 [3]	- 26 -
Tab. 3.4 Parametre zvárania	- 27 -
Tab. 3.5 Namerané hodnoty	- 27 -