

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

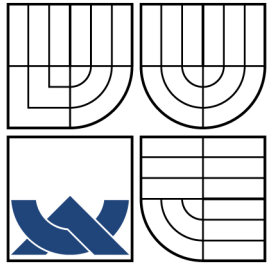
NOVÉ MATERIÁLY VE SVAŘOVÁNÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

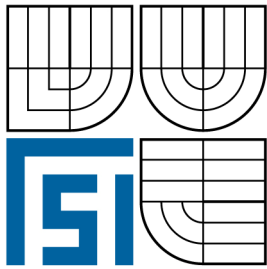
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

STANISLAV KŘÍŽEK

BRNO 2008



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

NOVÉ MATERIÁLY VE SVAŘOVÁNÍ NEW MATERIALS IN WELDING TECHNOLOGY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

STANISLAV KŘÍŽEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. LADISLAV DANĚK, CSc.

BRNO 2008

ANOTACE

Bakalářská práce zpracovaná v rámci studia oboru B2339 se zabývá svařitelností nových typů ocelí, zejména ocelí vysokopevnostních. Jde o literární studii zahrnující problémy svařitelnosti, tj. na vliv tepelně deformačního cyklu na tvorbu defektů ve svarovém spoji.

ANNOTATION

The bachelor work elaborated in frame of studies branch B2339 deals with weldability of new kinds of steel especially about high-strength steel. This is a literary pursuit that includes problems with weldability, that means standing heat deformation cycle on defect activity in welding connection.

KLÍČOVÁ SLOVA

Svařitelnost, teplo, deformace, vady

KEY WORDS

weldability, heat, deformation, defects

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KŘÍŽEK, S. *Nové materiály ve svařování*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 27 s. Vedoucí bakalářské 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 Brně dne 20.5.2008

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu doc. Ing. Ladislavu Daňkovi, CSc. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce.

OBSAH

1. ÚVOD.....	5
2. PROBLEMATIKA TAVNÉHO SVAŘOVÁNÍ.....	6
2.1. Základní rozdělení metod svařování.....	6
2.2. Fyzikální zásady procesů tavného svařování.....	6
3. TEPELNĚ DEFORMAČNÍ CYKLUS TAVNÉHO SVAŘOVÁNÍ... 6	6
3.1. Šíření tepla ve svarovém spoji.....	6
3.2. Teplotní pole.....	7
3.2.1 Trojrozměrné kvazistacionární teplotní pole.....	8
3.2.2 Dvojměrné kvazistacionární teplotní pole.....	9
3.3 Teplotní cykly.....	10
3.4 Rychlosti a chladnutí svarů ocelí.....	11
3.5 Výpočty rychlostí chladnutí svarů ocelí.....	12
3.6 Napěťové a deformační pole.....	12
3.7 Možnosti snížení vlivu napětí.....	15
3.8 Degradace vlastností teplem ovlivněné oblasti.....	15
3.8.1 Nepřípustný pokles houževnatosti.....	16
3.8.2 Snížení korozní odolnosti.....	17
3.9 Defekty ve svarovém kovu.....	17
3.9.1 Defekty ve formě bublin a vměstků.....	17
3.9.2 Defekty ve formě trhlin.....	18
3.9.2.1 Trhliny za horka.....	18
3.9.2.2 Studené trhliny.....	18
3.9.2.3 Lamelární trhliny.....	19
3.9.2.4 Žíhací trhliny.....	19
4. SVAŘITELNOST OCELÍ.....	20
4.1 Svařitelnost.....	20
4.2 Kritéria a ukazatele svařitelnosti.....	20
4.3 Uhlíkový ekvivalent.....	21
4.4 Podmínky svařitelnosti.....	21
4.5 Hodnocení svařitelnosti.....	22
5. SVAŘITELNOST VYSOKOPEVNÝCH OCELÍ.....	23
5.1 Stanovení teploty předehřevu na základě parametru praskavosti P_c	23
6. VŠEOBECNÁ DOPORUČENÍ PRO SVAŘOVÁNÍ VP OCELÍ.....	24
7. ZÁVĚR.....	25
Seznam použitých zdrojů.....	26
Seznam použitých symbolů a zkratk.....	27

1. ÚVOD

Jemnozrnné vysokopevnostní materiály s mezí kluzu 690 MPa jsou v dnešní době standartní konstrukční materiály, ať již termomechanicky zpracované, nebo zušlechtěné. Problematika svařování těchto materiálů je dostatečně zpracována a popsána. Vývoj materiálů se ale posouvá k ocelím s ještě vyšší pevností (kolem 1100MPa). Nároky na svařování a dodržení technologické kázně během svařování jsou u těchto ocelí proto přísnější, aby výsledný svarový spoj byl vyhovující. Oceli kalené a popouštěné, jakožto vysokopevnostní se osvědčují již po mnoho roků v nejrůznějších průmyslových oborech. Vysokopevnostní oceli mají velké využití v automobilním průmyslu jak ve využití vysoce namáhaných částí automobilu, tak v užití pro stavební stroje, kde je nutná otěruvzdornost materiálu. Na trhu jsou již velice kvalitní vysocepevnostní otěruvzdorné materiály, a to zejména zachováním žádoucí svařitelnosti, při dosažení daného vysokého pevnostního stupně. Díky materiálům které mají vyšší pevnostní stupeň se dosahuje snižování nákladů na vstupní materiály, a to snižováním hmotnosti svařenců používaných menších flouštek použitých vysokopevnostních plechů.

2. PROBLEMATIKA TAVNÉHO SVAŘOVÁNÍ

2.1. Základní rozdělení metod svařování

Všechny běžné metody svařování lze rozdělit na dvě velké skupiny a to metody tavného svařování a metody tlakového svařování. Tlakové metody svařování jsou založeny na působení mechanické energie, která formou deformace přiblíží spojované povrchy na vzdálenost působení meziatomových sil, přičemž vznikne vlastní spoj.

U tavného svařování je vytvoření spoje dosaženo přívodem tepelné energie do oblasti svaru a krystalizací roztaveného svarového kovu. Mezi tavné svařování patří například svařování elektrickým obloukem, plamenové svařování, laserové svařování, svařování slévárenské a další.

2.2. Fyzikální zásady procesů tavného svařování

[1]

Tavné svařování je definováno jako proces spojování materiálů, pro který je charakteristické vytvoření tavné lázně, tj. tekutého svarového kovu spoje, který v dalším průběhu tuhne a zajistí vlastní spojení. Pro svařování musí být proto k dispozici dostatečně intenzivní zdroj tepla, schopný v krátkém čase roztavit potřebné množství kovu a vytvořit tavnou lázeň požadovaného tvaru a rozměru.

Jednotlivé metody tavného svařování se od sebe odlišují především fyzikální podstatou zdrojů tepla, způsobem přenosu tepla a koncentrací energie. Důležitou roli hrají takové faktory jako přenos kovu a rozsah metalurgického ovlivnění svařovaného materiálu, které v mnoha případech rozhodují nejen o kvalitě spoje, ale také o rozsahu a perspektivě použití dané metody, o produktivitě, o možnosti automatizace a mechanizace

3. TEPELNĚ DEFORMAČNÍ CYKLUS TAVNÉHO SVAŘOVÁNÍ

3.1. Šíření tepla ve svarovém spoji

[1]

Teplo dodané ze zdroje do svarového spoje se šíří do základního materiálu a zvyšuje teplotu v okolí tavné lázně, kde se vytváří takzvané teplotní pole s rozložením teplot závislým na vlastnostech svařovaného materiálu a na podmínkách svařování. Zdroje tepla mohou být například mžítkové (pulzní), což znamená, že veškeré teplo se dodá během relativně krátkého času, nebo má zdroj konstantní výkon a pohybuje se podél osy svaru konstantní rychlostí. Tímto způsobem zdroje tepla vznikne nestacionární pole, tj. teplota libovolného bodu tohoto pole je funkcí polohy a času.

Jestliže se vynesou pro určitý bod pole závislosti teploty na čase, získá se teplotní cyklus. Teplota sledovaného bodu nejprve rychle vzrůstá, až dosáhne určitého maxima a pak opět klesá na teplotu původní. Jedním z důsledků teplotního cyklu jsou změny struktury a vlastností, které mohou za určitých okolností nepříznivě ovlivnit kvalitu svarového spoje teplem ovlivněné oblasti, tj. v oblasti zasažené teplotním polem.

Rozsah těchto změn a šířka oblasti, kde ke strukturálním změnám dochází, souvisí s výchozím strukturálním stavem materiálu, s geometrií teplotního pole a s průběhem teplotního cyklu. Pokud je znám výchozí strukturální stav, je možno strukturální změny předvídat, posoudit riziko s nimi spojené a v řadě případů zabránit vzniku defektů vhodnou úpravou podmínek svařování, což je praktickým přínosem teoretického studia šíření tepla.

Rozložení teplot teplotního pole nebo jejich časový průběh se dá stanovit experimentálně, např. pomocí termočlánků a registrace teplot, termovizní apod., tento postup je ovšem nákladný a pracný. Proto již léta byla zaměřena pozornost na fyzikální model pohybu tepla, který by umožnil dostatečně přesně matematicky popsat teplotní pole a početně stanovit průběh teplotního cyklu i bez experimentů. Základní práci z této oblasti publikoval v roce 1951 N.N.Rykalin, u nás v roce 1960 A. Havalda a později řada dalších, kteří výpočty rozšířili a zdokonalili. Plné uplatnění však nalézá fyzikální model teprve dnes, kdy moderní výpočetní technika nejen zrychlila všechny složité výpočty, ale současně umožnila i grafické znázornění jak teplotních polí, tak teplotních cyklů.

3.2. Teplotní pole

[1]

Teplotní pole vzniká v důsledku šíření tepla z místa působení zdroje tepla do okolního základního materiálu. Geometrie teplotního pole závisí na vlastním zdroji tepla, tj. na výkonu, charakteristických vlastnostech přenosu tepla a rychlosti pohybu, tj. na podmínkách přívodu tepla a dále závisí na podmínkách odvodu tepla ovlivněných rozměry a fyzikálními vlastnostmi svařovaného materiálu, jeho měrnou hmotností, specifickým teplem, tepelnou vodivostí a v nemalé míře také tloušťkou. Obecně platí, že teplotní pole je tím širší, čím větší je hodnota specifického vneseného tepla Q_s a vyšší teplotní vodivost.

Matematický popis teplotního pole je možný jen za řady zjednodušujících předpokladů. Především materiál musí být homogenní, izotropní a v tuhém stavu. Zdroj tepla je buď bodový, tj. z bodu na povrchu plechu se teplo šíří ve směru tří os, nebo může být zdroj tepla čárový (pronikající celou tloušťkou plechu) a teplo se z něho šíří ve směru dvou os.

Pro běžnou praxi má zásadní význam především teplotní pole, které se vytváří kolem zdroje o konstantním výkonu, pohybujícího se konstantní rychlostí svařování

v_s [dm·s⁻¹] podél osy svaru. Teplotní pole se v tomto případě označuje jako kvazistacionární, neboť v dostatečné vzdálenosti od začátku svaru nastává ustálený stav a teplotní pole nemění svůj tvar vzhledem k místu přívodu tepla. Jestliže zvolíme toto místo za střed souřadného systému, není rozložení teplot funkcí času a získá se poměrně jednoduchý vzorec pro výpočet teploty pole.

Rozložení teplot kolem jakéhokoliv zdroje popisuje obecná diferenciální rovnice vyjadřující šíření tepla :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \frac{c \cdot \rho}{\lambda} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (3.1) \quad [1]$$

kde: T - [°C] - rozdíl mezi teplotou okamžitou a počáteční T_0

x, y, z - [cm] - souřadnice bodů teplotního pole

c - [J·g⁻¹·K⁻¹] - měrné teplo svařovaného materiálu

ρ - [g·cm⁻³] - měrná hmotnost materiálu

λ - [W·cm⁻¹·K⁻¹] - tepelná vodivost

t - [s] - čas

Tato obecná rovnice není bezprostředně použitelná pro výpočet teplotního pole v okolí svaru, protože nezahrnuje specifické vlastnosti různých zdrojů tepla, například jejich výkon, energii, rychlost pohybu, hloubku závarů, ani geometrické vlivy, např. tloušťku svařovaného materiálu. Také ztráty energie sdílením nebo vyzařováním tepla do okolního prostředí nelze v některých případech opominout.

Řešení této diferenciální rovnice ve tvaru použitelném v běžné technické praxi předložil v roce 1951 N.N. Rykalin, ovšem za cenu dalších zjednodušujících předpokladů:

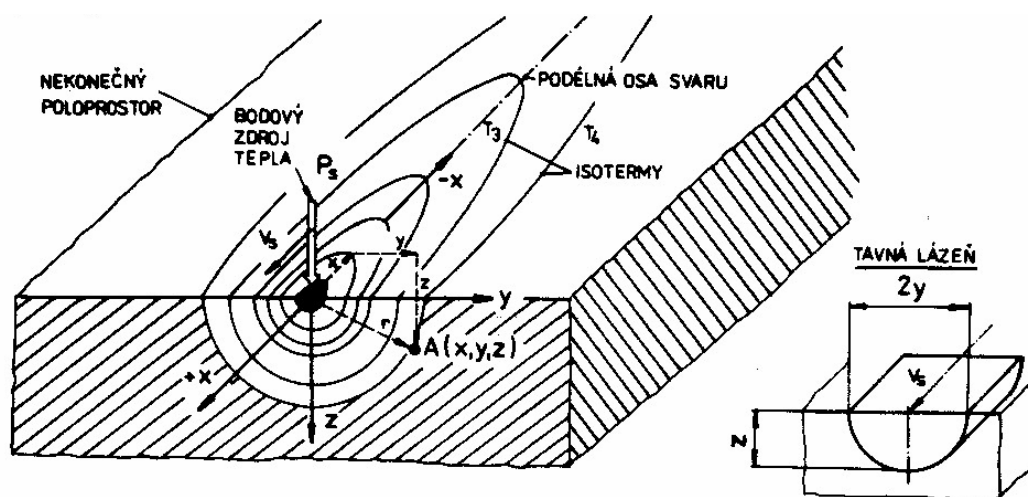
- fyzikální veličiny λ , ρ , c jsou konstantní v celém intervalu teplot
- neuvažuje se vliv polymorních přeměn
- zdroj tepla je buď čistě bodový a působí na povrchu materiálu, nebo čistě přímkový a prostupuje přes celou tloušťku plechu

I když skutečnost je odlišná, je přesto možno podle těchto rovnic počítat teploty pole s postačující aproximací a hlavně, k výpočtům lze použít i běžný kapesní kalkulátor. Osobní počítač s grafikou poskytne samozřejmě více možností.

3.2.1 Trojrozměrné kvazistacionární teplotní pole

[1]

Při matematickém popisu trojrozměrného pole se předpokládá, že bodový zdroj tepla o efektivním výkonu P_s [W] působí na povrchu tlustého plechu ve středu souřadného systému (x, y, z) a pohybuje se konstantní rychlostí v_s [cm·s⁻¹] ve směru osy $(+x)$. Teplo vybavené v místě působení zdroje difunduje do poloprostoru ohraničeného povrchem plechu. Tok tepla do základního materiálu je převažující a je možno zanedbat tepelné ztráty radiací a konvekcí do ovzduší. V praxi se trojrozměrnému poli nejvíce blíží případ, kdy se na tlustý plech navařuje housenka tenkou elektrodou a nízkým proudem, tj. tavná lázeň je relativně malá a mělká (viz obr. 1), zdroj je možno považovat za bodový a tlustý plech představuje nekonečný poloprostor.



Obr. 1: Trojrozměrné teplotní pole [1]

Teplotu $A(x, y, z)$, ležícího v tomto trojrozměrném kvazistacionárním poli, je možno stanovit dosazením příslušných hodnot do vzorce (3.2), který je partikulárním řešením obecné rovnice (3.1)

$$T_{x,y,z} = \frac{P_s}{2\pi\lambda} \cdot \frac{1}{r} \cdot e^{-\frac{v_s}{2a}} \quad (3.2) \quad [1]$$

kde: T - [°C] - zvýšení teploty bodu A nad teplotu počáteční T_0

x, y, z - [cm] - kartézské souřadnice bodu A

$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ - [cm] - kartézské souřadnice bodu A

λ - [W.cm⁻¹.K⁻¹] - střední tepelná vodivost materiálu v intervalu $T - T_0$

$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}$ - [cm².s] - teplotní vodivost materiálu

$P_s = \eta \cdot P$ - [W] - efektivní výkon zdroje, η = účinnost přenosu tepla

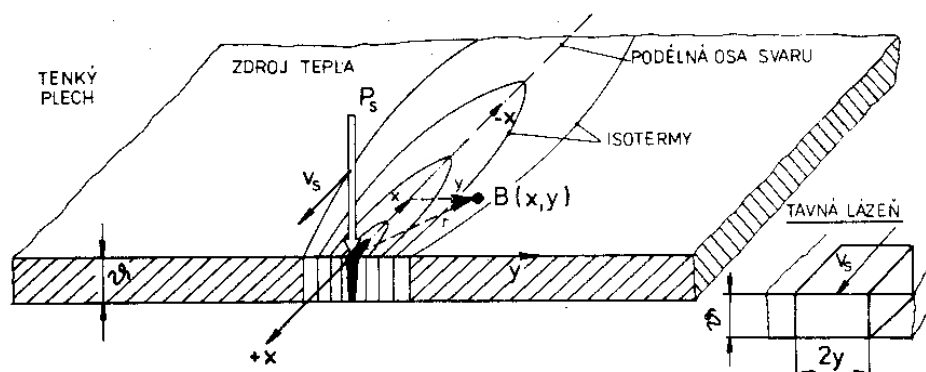
v_s - [cm.s⁻¹] - rychlost pohybu zdroje ve směru osy +x

Při výpočtech je nutné vstupní údaje převést do správných fyzikálních rozměrů (kW na W, mm na cm atd.) Dále nutno dbát na to, že většinou se zajímáme o teploty za zdrojem tepla, tj. ve směru osy -x. Přes řadu zjednodušení jsou vypočtené teploty ve vyhovujícím souladu s experimentálním měřením.

Zdrojem nepřesností je především značná teplotní závislost tepelné vodivosti i měrného tepla. Tyto veličiny se u polymorfních přeměn. U slitin chybí přesnější údaje a zanedbává se to, že poměrně malé množství přísad může mít značný vliv na hodnotu λ .

3.2.2 Dvojměrné kvazistacionární teplotní pole [1]

Jestliže se svařuje relativně tenký plech zdrojem o vysoké plošné hustotě energie, je závar hluboký a tavná lázeň prostupuje přes celou tloušťku plechu. Pohyb tepla ve směru osy (z) lze zanedbat a teplo se šíří jen ve směru osy (x, y). V praxi se tomuto modelu nejvíce blíží svařování svazkem elektronů, laserem vysokého výkonu, respektive plasmovým obloukem. Dobrý soulad je i při svařování obloukem vysokého výkonu a nižší rychlosti svařování.



Obr. 2: Dvojměrné teplotní pole v nekonečném plechu [1]

Rovnice popisující dvojrozměrné teplotní pole (3.3) je podstatně složitější než v případě předchozím, neboť při malé tloušťce plechu nelze již zanedbat ztrátu tepla radiací a konvekcí do vnějšího prostředí. Ve vzorci se proto vyskytuje také tloušťka plechu a součinitel přestupu tepla. Při řešení základní diferenciální rovnice byly použity složité transformace, a proto výsledný vzorec zahrnuje kromě jednoduché exponenciální funkce ještě tzv. Besselovu funkci $K_0(U)$, jejíž hodnota bývá pro jednotlivé argumenty "U" uváděna v tabelární formě.

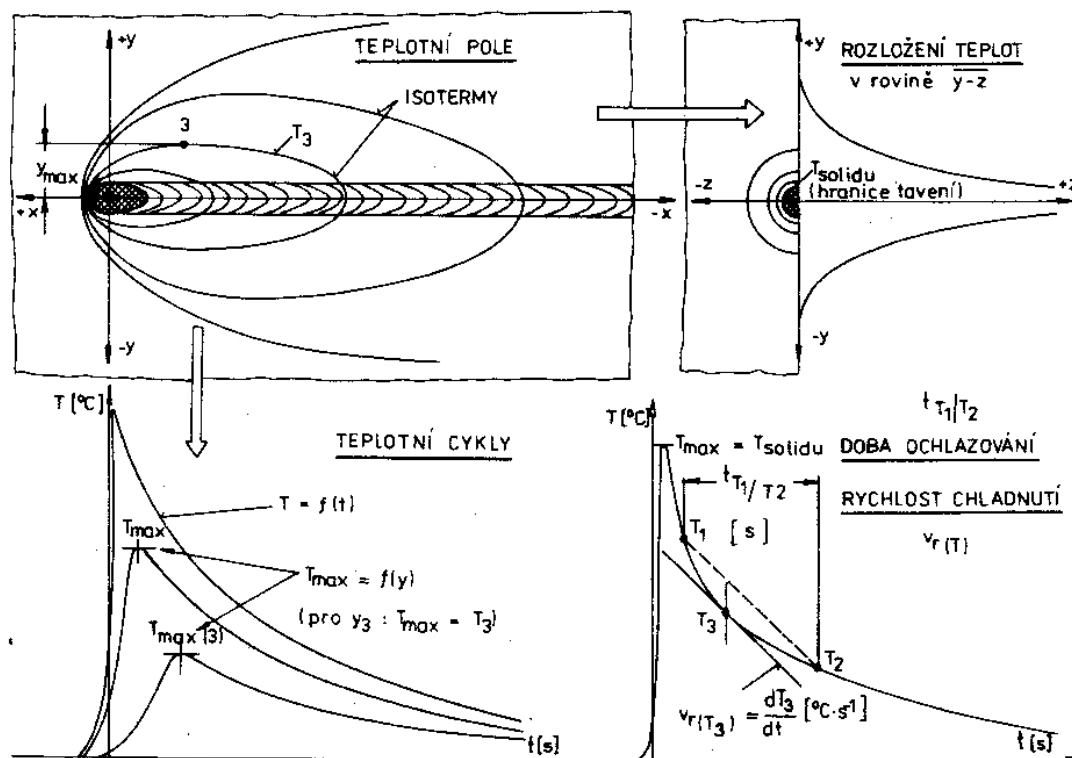
$$T_{x,y,z} = \frac{1}{2\pi\lambda} \cdot \frac{P_s}{v} \cdot e^{-\frac{v_s \cdot x'}{2a}} \cdot K_0(U) \quad [^\circ\text{C}] \quad (3.3) \quad [1]$$

3.3 Teplotní cykly

[1]

Až na některé výjimky, například bodové svařování, se při tavném svařování zdroj tepla pohybuje konstantní rychlostí svařování v_s a s ním celé kvazistacionární pole. Jestliže se registruje časový průběh teplot libovolného bodu a to například na povrchu plechu, vzdáleného y (cm) od osy svaru, získá se křivka teplotního cyklu $T_y = f(t)$. Při konstantní rychlosti svařování $x' = v_s \cdot t$, a proto také: $T_y = f(x)$, neboli křivka teplotního cyklu, je současně řezem topograficky znázorněného teplotního pole dle obr. 3.

Z obrázku je zřejmé, že jednotlivé izotermy jsou uzavřené křivky a dosahují jen do určité maximální vzdálenosti y_{\max} od osy svaru. V tomto bodě má také křivka teplotního cyklu své maximum, tj. teplota dosáhne teploty dané izotermě T_3 .



Obr. 3 Teplotní pole, teplotní cykly, doby a rychlosti chladnutí [1]

Z hlediska metalurgického je nejvýznamnější průběh toho teplotního cyklu, jehož maximální teplota dosáhla teploty solidu. Zajímá nás především celková délka cyklu, respektive doba setrvání na teplotě vyšší než kritické, např. teplota rekrytalizační, teplota, kdy se začínají rozpouštět pevné částice apod.

3.4 Rychlosti a chladnutí svarů ocelí

[1]

U ocelí je dále důležitá rychlost chladnutí, na níž závisí výsledná struktura svarového spoje. Rychlost chladnutí se udává jako doba ochlazování v určitém intervalu teplot. Například t_{T_1/T_2} (s) je doba chladnutí z teploty T_1 na T_2 viz obr. 3. Průměrné rychlosti ochlazování z T_1 na T_2 odpovídá tečna křivky chladnutí v bodě T_3 . Z obr. 3 je však zřejmé, že teplota T_3 nemůže být střední hodnotou teplot T_1 na T_2 . Průběh cyklu a jeho délka závisí na faktorech, které nelze ovlivnit (např. fyzikální vlastnosti a tloušťka svařovaného materiálu), současně však také na faktorech, které může technolog změnit (např. parametry svařování U , I , v_s a teplotou přehřevu T_0). Aby rozhodnutí technologa byla přesnější a objektivní, byly vypracovány dvě metody umožňující stanovit početně rychlost ochlazování kritických teplotních cyklů. Při výpočtech se vycházelo ze základních diferenciálních rovnic popisujících šíření tepla a po úpravách se získaly tyto základní vzorce pro výpočet rychlosti a doby chladnutí.

Rychlost chladnutí $v_{r(T)}$ (Rosenthal 1941, Adams 1958):

Rychlost chladnutí v trojrozměrném poli (3D) za teploty T ($^{\circ}\text{C}$)

$$v_{r(T)} = 2\pi\lambda \frac{(T - T_0)^2}{Q_s} \quad [^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}] \quad (3.4) \quad [1]$$

Rychlost chladnutí v dvojrozměrném poli (2D) za teploty T ($^{\circ}\text{C}$)

$$v_{r(T)} = 2\pi\lambda\rho \frac{v^2}{Q_s^2} (T - T_0)^3 \quad [^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}] \quad (3.5) \quad [1]$$

Doba ochlazování t_{T_1/T_2} (Kas, van Adrichen, 1969)

Doba chladnutí v trojrozměrném poli (3D)

$$t_{T_1/T_2} = \frac{1}{2\pi\lambda} \cdot Q_s \left(\frac{1}{T_2 - T_0} - \frac{1}{T_1 - T_0} \right) \quad [\text{s}] \quad (3.6) \quad [1]$$

Doba chladnutí v dvojrozměrném poli (3D)

$$t_{T_1/T_2} = \frac{1}{4\pi\lambda c\rho} \cdot \frac{Q_s^2}{v^2} \left[\left(\frac{1}{T_2 - T_0} \right)^2 - \left(\frac{1}{T_1 - T_0} \right)^2 \right] \quad [\text{s}] \quad (3.7) \quad [1]$$

Vzorce mají obecnou platnost, je nutno pouze dosadit pro daný materiál příslušné fyzikální veličiny (λ , c , ρ), tloušťku svařovaného plechu v [cm], teplotu přehřevu T_0 a technologické parametry $Q_s = \eta \cdot \frac{UI}{v_s}$ [$\text{J}\cdot\text{cm}^{-1}$].

(3.8) [1]

3.5 Výpočty rychlostí chladnutí svarů ocelí

[1]

Problematice stanovit početně rychlost chladnutí bez pracných a nákladných experimentů se již věnovala řada pracovišť. Zakrátko se však zjistily difference mezi hodnotami vypočtenými a změřenými, které mají tento původ:

-Teplotní pole je trojrozměrné jen v případě velmi tlustého plechu a bodového zdroje tepla, kde hloubka průvaru je rovna přibližně polovině šířky tavné lázně. Čistě dvojrozměrné pole existuje pouze při svařování svazkem elektronů, pokud svazek proniká celou tloušťkou plechu. Blízké dvojrozměrnému poli je svařování relativně tenkých plechů technologií, která zajistí hluboký průvar. V praxi však bývá teplotní pole v mnoha případech na hranici mezi dvoj- a trojrozměrným polem (což se někdy označuje jako 2,5-rozměrné), kde základní vzorce nedávají výsledek souhlasící s měřením.

-Geometrie reálných svarů se většinou liší od teoretického předpokladu, kterému se blíží pouze navařování malé housenky na povrch tlustého plechu, nebo svařování svazkem elektronů. Teplo se ve skutečnosti odvádí do většího nebo menšího objemu kovu, než předpokládá základní vzorec, a tím se ovlivní rychlost chladnutí.

-Fyzikální vlastnosti svařitelných ocelí jsou silně teplotně závislé a není snadné odhadnout, jaká hodnota se má do vzorců dosadit. Často to bývá průměrná hodnota pro celý interval T_0 - T_{tav} , ovšem důležitější jsou hodnoty, které má materiál ve sledovaném intervalu teplot a v oblasti kam teplo difunduje. Dalším zdrojem nepřesností mohou být rozdíly v tepelné vodivosti vlivem přísad u mírně legovaných ocelí (u vysoce legovaných ocelí je to samozřejmostí).

3.6 Napět'ové a deformační pole

[1]

Místní ohřev svařovaného materiálu je příčinou vzniku nejen teplotního, ale současně i napět'ového a deformačního pole. Tím, že chladný základní materiál nedovoluje, aby oblast svarového spoje volně dilatovala, vytváří se jak v teplem zasazené oblasti, tak i v jejím okolí složitý napět'ový stav provázený elastickými i plastickými deformacemi.

Přibližný výpočet velikosti tepelného pnutí vychází ze zjednodušujícího předpokladu, že teplem ovlivněná oblast délky „l“ se rovnoměrně ohřeje na teplotu o ΔT vyšší než je teplota okolí, a tím i dilatuje. Vlivem tuhého upnutí vznikne v materiálu napětí, které vyvolá deformaci opačného smyslu, tj. $\Delta l_T + \Delta l_\sigma = 0$. Pro velikost teplotní dilatace Δl_T platí: $\Delta l_T = \alpha \Delta T$, „ α “ je součinitel teplotní roztažnosti [K^{-1}]. V mezích Hookova zákona platí známý vztah, $\sigma = E \cdot \varepsilon$, a protože, $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \alpha \Delta T$ dosazením obdržíme vzorec pro výpočet tepelného pnutí: $\sigma_T = -\alpha E \Delta T$ [MPa], kde E je modul pružnosti v tahu. Záporné znaménko vyjadřuje, že kladná změna teploty vyvolává záporná (tlaková) pnutí. U většiny svařovaných materiálů vyvolá i poměrně malý rozdíl teplot vysoká pnutí, jak ukazuje příklad na nízkouhlíkové oceli:

Ocel 11 373 ($\alpha = 12 \cdot 10^{-6} [K^{-1}]$, $E = 2,1 \cdot 10^5$ [MPa]) je lokálně ohřátá o $100^\circ C$ nad teplotu okolí ($\Delta T = 100^\circ C$), tím vznikne tlakové pnutí $\sigma_T = -12 \cdot 10^{-6} \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 100 \approx -250$ MPa.

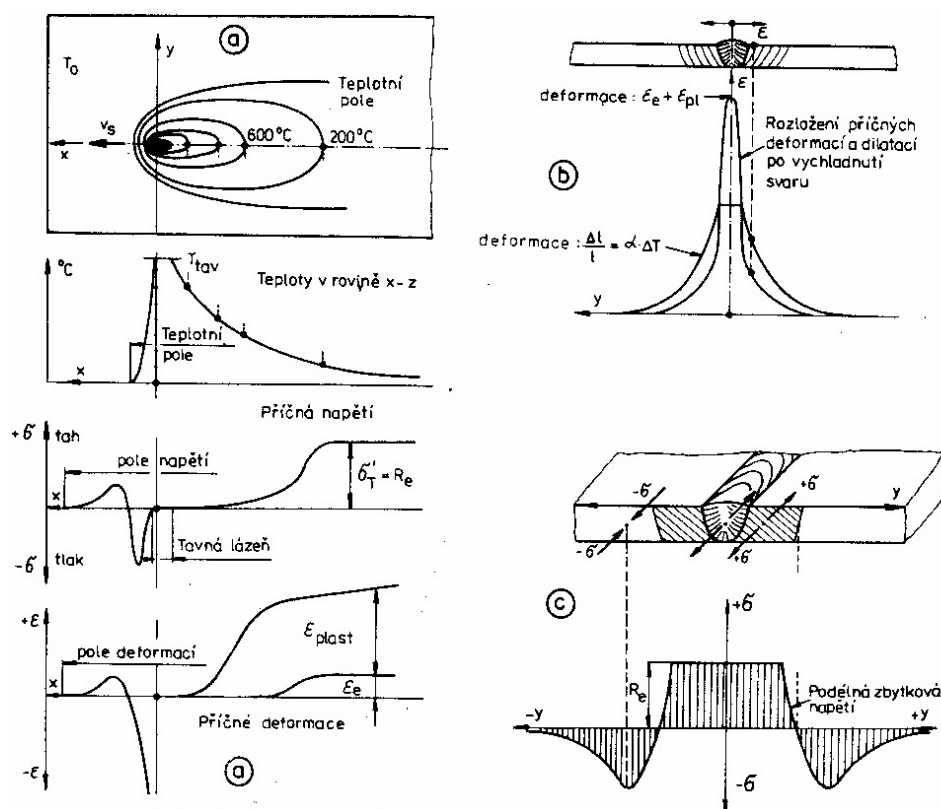
Vypočítaná hodnota σ_T přesahuje mez kluzu dané oceli ($R_e=210$ až 240 MPa), a proto část deformace bude elastická a část plastická. Čím vyšší bude hodnota ΔT , tím vyšší podíl bude tvořit plastická deformace. Zásadní nepřesnost výpočtu tepelného pnutí vyplývá z toho, že ΔT není konstantní a dále α , E, R_e jsou veličiny teplotně závislé.

Ve fázi ohřevu teplota ovlivněné oblasti spojitě vzrůstá až na teplotu tavení. S růstem teploty současně klesá mez kluzu materiálu, a proto klesají i tepelná pnutí. Ohřátý materiál se proto snadno pěchuje i účinkem relativně nízkých napětí. Při ochlazování, kdy se teplota pole vyrovná na teplotu základního materiálu, probíhají pochody opačného směru. Protože s poklesem teploty vzrůstá mez kluzu, tahové deformace vyžadují stále vyšší napětí. V materiálu, u kterého probíhá v místě ohraničené oblasti teplotní cyklus, narůstají postupně tahová pnutí a v konečné fázi dosahují napětí až mez kluzu.

Napěťové pole je nesrovnatelně složitější než teplotní pole, a to z více důvodů. Jednak je mez kluzu silně závislá na teplotě a kromě toho se napětí přenášejí i do oblasti teplotním polem vůbec nezasážené. Dále v každém místě vzniká vícerozličný stav napjatosti, kde podélná a příčná napětí mohou mít rozdílné hodnoty. Z těchto důvodů se nedá napěťové pole analyticky popsat. Určité možnosti výpočtu dává jen metoda konečných prvků.

Rozložení deformací v oblasti svaru je stejně komplikované, nebožeh ohledu na místní dilatace a plastické deformace, které převažují, koncentrují hlavně do oblastí, kde má materiál nejvyšší teplotu, a tedy nejnižší přetvárný odpor.

Kritický stav nastává tehdy, když v libovolném intervalu teplot má materiál nedostačující plasticitu, nebo když napětí v kterémkoliv místě je vyšší než kohezní pevnost hranic zrn. V obou případech dochází ke vzniku trhlin. Nejčastěji jsou to tzv. „trhliny horka“, které se tvoří za teplot blízkých teplotě solidu.



Obr. 4 Teplotní, napěťové a deformační pole [1]

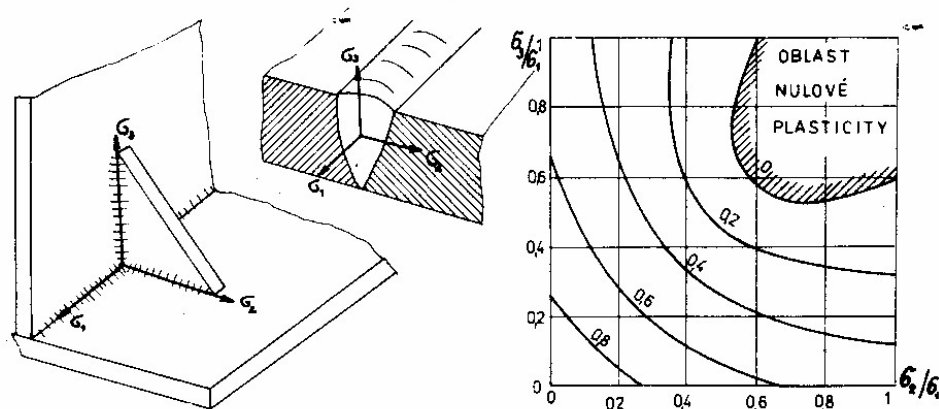
- a) průběh teplot příčných napětí a deformací
- b) rozložení příčných dilatací a deformací
- c) rozložení podélných zbytkových napětí

Schematicky je znázorněno na obr. 4 a) rozložení příčných napětí a deformací v podélné ose svaru. Z obrázku je zřejmé, že napětí i deformační pole zasahují dál než teplotní pole. Napětí i deformace před tavnou lázní zřetelně vykazují inverzi. Průběh napětí za tavnou lázní je především ovlivněn teplotní závislostí meze kluzu, dále tím, že teplotní pole se postupně rozšiřuje a dilatace vzdálenějších oblastí částečně kompenzují smršťování chladnoucích oblastí přiléhajících ke svarovému kovu. Obdobnou příčinu má i opožděný nástup deformací.

Rozložení příčných deformací a příčných dilatací na řezu vychladlým svarem je znázorněno na obr. 4 b), z něhož vyplývá, že příčná deformace ($\epsilon_e + \epsilon_{pl}$) v ose svaru, která zůstává nejdéle teplá, je podstatně větší, než odpovídá teplotní dilataci. Proto se právem vyžaduje od svarového kovu spoje vysoká plasticita.

Na obr. 4 c) je znázorněno rozložení podélných zbytkových napětí ve vychladlém svaru. Také zde dochází k inverzi napětí. Svarový kov a přilehlá, teplem ovlivněná oblast, kde při ohřevu došlo k podstatnému poklesu meze kluzu a tlakem se plasticky deformovala jen elasticky, má po vychladnutí a smrštění svarového kovu zbytkové napětí tlakové.

Z uvedeného rozboru je patrné, že ve svarovém kovu a jeho blízkém okolí jsou zbytková pnutí ve směru obou os kladná (tj. tahová) a pokud se neprovedou zvláštní opatření, dosahují meze kluzu. Současně se do těchto míst koncentrují i plastické deformace. U tlustých plechů nebo v případě nevhodného křížení svarů zde může vzniknout prostorový stav napjatosti, tj. trojosý tah, který je příčinou poklesu plasticity, která nemá souvislost s fyzikálně metalurgickými vlastnostmi materiálu, ale výhradně se stavem napjatosti, jak ukazuje obr. 5.



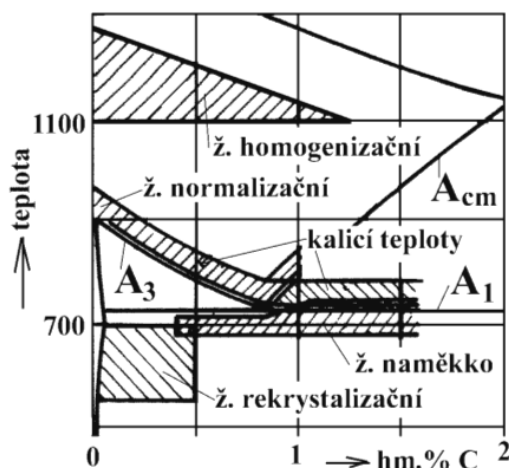
Obr. 5 Vliv trojosého napětí v tahu na plasticitu materiálu (podle Rugeho). [1]

Znázorněn je zde pokles plasticity vyjádřený podílem původní plasticity, zjištěné při zkoušce jednoosým tahem. Šrafovaná plocha je oblast nulové plasticity.

3.7 Možnosti snížení vlivu napětí

U tavného svařování existují dva způsoby odstranění napětí vzniklé teplem působením. Při svařování dochází následkem nerovnoměrného ohřevu ke vzniku vnitřního napětí a tím k deformacím. Napětí a deformace spolu úzce souvisí. Tím že budeme považovat deformaci u svařovaného předmětu za irelevantní, tedy že deformace v materiálu bude značná, vnitřní napětí bude naopak malé. Může však nastat i ta situace že deformaci za nepodstatnou považovat nemůžeme. V tomto případě se velké pnutí odstraňuje teplem zpracováním a to žíháním.

Žíhání je tepelné zpracování, při kterém se dílce po skončení výdrže na žíhací teplotě ochlazují pomalu na klidném vzduchu nebo v nevytápěné peci. Pro náš případ se nejčastěji jedná o použití žíhání ke snížení vnitřního napětí. Toto žíhání má snížit na minimum pnutí vytvořená v dílci při předchozím tepelném zpracování, mechanickém opracování, svařování nebo ztuhnutí odlitku ve formě. Žíhací teplota se volí co nejbližší teplotě A_1 viz obr. 6, neboť zbylá pnutí jsou tím menší, čím je vyšší teplota. Ohřev na teplotu výdrže a ochlazování z ní musí být pomalé, aby v důsledku tepleného spádu v materiálu nevznikala další pnutí.



Obr. 6 Žíhací a kalící teploty [1]

Poslední možností snížení vlivu napětí je Vibrování na snížení zbytkových napětí svařenců. Princip snížení zbytkových napětí vibrováním spočívá v tom, že jsou atomy kovu při zvýšeném napětí vychýlené ze svých rovnovážných poloh. Při dodání vibrační energie mechanickým vibrátorem se atomy posunou do svých rovnovážných poloh.

3.8 Degradace vlastností teplem ovlivněné oblasti

[1]

Účinkem teplotně deformačního cyklu mohou nastat v zasažené oblasti strukturní nebo substrukturní změny provázené nepřijatelným zhoršením těch vlastností, které jsou z hlediska bezpečné funkce zařízení nezbytné. Patří k nim hlavně pokles houževnatosti a snížení korozní odolnosti.

3.8.1 Nepřípustný pokles houževnatosti

[1]

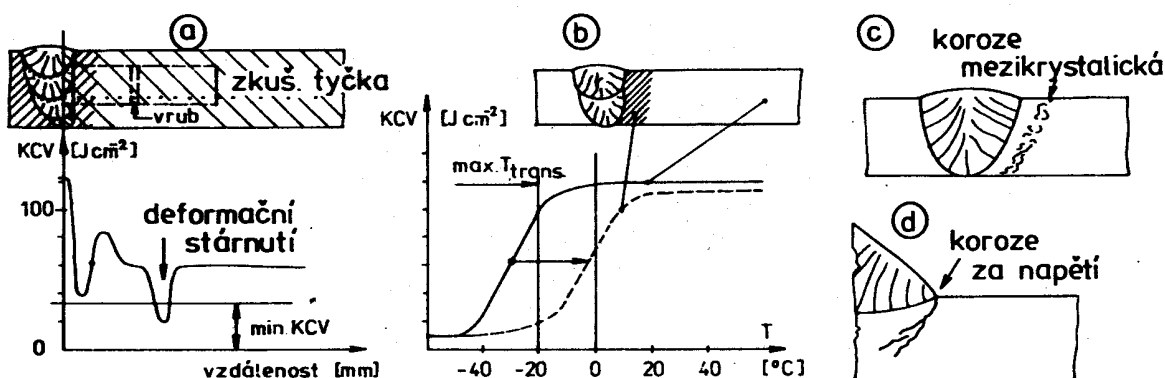
Křehké porušení svařovaných konstrukcí vychází bez výjimky z defektů ve svařovém spoji, které měly nadkritickou velikost a za určitých okolností (napětí, teploty) přerostly v rychle se šířící trhlinu. Příčinou nestabilního růstu trhliny bývá hlavně nížení plasticity materiálu účinkem teplotně deformačního cyklu. Klesne-li pod určitou mez, není materiál schopen šířící se trhlínu zastavit.

O tom, zda se v daném materiálu trhlína zastaví, rozhoduje lomová houževnatost materiálu, stav napjatosti a teplota.

Příčiny poklesu lomové houževnatosti může být:

- zhrubnutí zrna v blízkosti hranice tavení
- dispersní nebo precipitační zpevnění matrice
- nepříznivá morfologie překrytalizované struktury
- deformační stárnutí

Všechny tyto strukturální změny jsou vždy podmíněny určitým teplotním cyklem a omezeny proto na určitou zónu teplem ovlivněné oblasti. Deformační stárnutí může zasáhnout oblast značně vzdálenou od osy svaru obr. 7.



Obr. 7 Poškození vlastností v ovlivněné oblasti svařového spoje: [1]

- zkřehnutí vlivem deformačního stárnutí
- zvýšení transitu teploty
- ztráta korozní odolnosti
- vznik trhlín vlivem koroze za napětí

Častým jevem je posun transitní teploty tj. přechodu mezi tvárným a křehkým porušením v teplem ovlivněné oblasti směrem k vyšším teplotám, aniž se podstatně změnila hodnota vrubové houževnatosti za normální teploty 20°C . Tato změna je nebezpečná pro všechna zařízení, která potenciálně mohou být vystavena nízkým teplotám jako například mosty, dopravní prostředky aj.

3.8.2 Snížení korozní odolnosti

[1]

Řada svařovaných výrobků pracuje ve více nebo méně korozivním prostředí a jejich životnost závisí na rychlosti tohoto poškozování. Svařováním se může snížit korozní odolnost pod přípustnou mez a vlivem toho dojde k selhání nebo destrukci zařízení. Nejčastější příčinou bývá:

- Mizikrystalická koroze zaviněná precipitačními pochody, tj. vylučováním cizorodých částic nejčastěji po hranicích zrn původně homogenního materiálu a tím jsou vytvořeny podmínky pro elektrochemickou korozi.

-Korozní praskání zasahuje oblasti s vyšší hladinou zbytkových tepelných pnutí. Trhliny se šíří výhradně kolmo na směr nejvyššího tahového napětí, typicky se zvětší (obr. 7 d) a často jich postupuje víc souběžně. Svým charakterem připomínají opožděné trhliny vycházející z vrubu, jsou však mnohem rozsáhlejší. Někdy se korozního praskání využívá k důkazu přítomnosti zbytkových napětí a ke studiu jejich rozložení.

Korozní zkoušky svarů se neliší od běžných korozních zkoušek základního materiálu. Z dalších degradačních pochodů je nutno se zmínit o snížení odolnosti spoje proti únavovému poškození tj. klesá mez únavy, únavová trhlinka se při dané amplitudě napětí rychleji šíří. Spolupůsobí v tomto případě nejen strukturní změny, ale také stav napjatosti.

3.9 Defekty ve svarovém kovu

[3]

3.9.1 Defekty ve formě bublin a vměstků

Defekty ve formě bublin jakožto první z těchto základních defektů vzniká při svařování a to metalurgickými reakcemi jako je reakční a oxidační pochody. Tyto reakce zásadně ovlivňují jak tvar i povrch svarové housenky tak i přechod svarové housenky do základního materiálu a vnitřní čistotu svaru. Na rozsah reakcí má značný vliv kyslík. Vzniklé kapky svarového kovu dosahující vysokých teplot jsou obohaceny kyslíkem při přechodu do tavné lázně. Reakcemi se tvoří bubliny, které jsou za určitých podmínek příčinou pórovitosti a bublinatosti svarů.

Dalším nezanedbatelným defektem je tvorba vměstků. V městky se mohou ve svarovém kovu vyskytnout například při svařování obalovanou elektrodou, kdy při nesprávném náklonu elektrody by struska předbíhala elektrický oblouk a tím by ve svarovém kovu vznikly takzvané struskové vměstky. Jde tedy o koncentrace nežádoucího prvku v materiálu svaru. Mezi nežádoucí prvky patří například síra a kyslík. Síra vytváří samostatné fáze a tvoří různé tvary ve struktuře. Kyslík vytváří vměstky tak, že se vždy váže na některé z nežádoucích prvků.

3.9.2 Defekty ve formě trhlin

Trhliny ve svarovém kovu se dají považovat za nejnebezpečnější defekty.

3.9.2.1 Trhliny za horka

Trhliny za horka vznikají jak ve svarovém kovu, tak v teplem ovlivněné oblasti, při ochlazování svarových spojů za vysokých teplot. Lze je rozdělit na krystalizační trhliny, které vznikají ve svarovém kovu v průběhu tuhnutí, likvidační trhliny vznikají ve vysokoohřátém podhousenkovém pásmu teplem ovlivněné oblasti základního materiálu, nebo ve svarovém kovu při několikavrstvém svařování. Polygonizační trhliny, označené též jako trhliny z poklesu tažnosti, mohou vznikat v tepelně ovlivněné oblasti základního materiálu. Polygonizační trhliny jsou charakteristické pro vysokolegované austenitické oceli a slitiny niklu.

K zamezení vzniku horkých trhlin je nutné:

- snížení měrného příkonu svařování
- používat přídatné materiály vysoké čistoty,
- omezit deformace a napětí použitím vhodných technik svařování, tvaru svarového spoje předehřevu,
- nepoužívat housenky s malým tvarovým koeficientem svaru a malým průřezem zejména v kořenové oblasti

3.9.2.2 Studené trhliny

Studené trhliny, trhliny indukované vodíkem a zbrzděné lomy jsou defekty, které vznikají při nízkých teplotách asi pod 200°C. Vyskytují se nejčastěji v podhousenkové oblasti svarových spojů ocelí. Mohou se ale vyskytovat i v kořenové oblasti, koncových oblastech spoje, tak i ve svarovém kovu. Orientací mohou být podélné, příčné, přes všechny oblasti svarového spoje. Studené trhliny jsou transkrystalického charakteru, povrch je lesklý, neoxidovaný, na rozdíl od trhlin vzniklých za horka. Hlavní příčinou vzniku studených trhlin je působení tří faktorů a to:

- přítomnost vodíku ve svarovém spoji
- přítomnost struktury citlivé na účinek vodíku
- přítomnost tahových zbytkových napětí

Zdrojem vodíku ve svaru je nejčastěji atmosférická vlhkost, vlhkost z obalu elektrod, případně tavidel, svařovací dráty po povrchové úpravě. Rozpustnost a rozložení vodíku ve svarovém kovu závisí na teplotě, koncentraci a typu vměstků. Vodík difunduje v souladu s deformačními procesy ve svaru a přeměnou intersticiálního tuhého roztoku v železe $\gamma \rightarrow \alpha$. Náchylnost ocelí na vznik studených trhlin úzce souvisí s prokalitelností. Souhrnný vliv chemického složení na náchylnost ocelí na zakalení v tepelně ovlivněné oblasti lze vyjádřit uhlíkovým ekvivalentem. Tento je popsán v kapitole 3.3.

K zamezení vzniku trhlin za studena je nutné:

- používat nízkovodíkové technologie svařování,
- pečlivě provádět sušení přídavných materiálů před použitím,
- zabránit navlhnutí přídavných materiálů v průběhu skladování a manipulace,
- aplikovat předehřev, dohřev a používat vyšší měrný příkon svařování,
- minimalizovat vzniky zbytkových napětí po svařování volbou vhodné techniky svařování,
- vyvarovat se ostrých vad zejména v kořenové oblasti jako jsou neprůvary, studené spoje, apod.

3.9.2.3 Lamelární trhliny

Lamelární trhliny vznikají v základním materiálu nebo v tepelně ovlivněné oblasti v důsledku namáhání ve směru tloušťky plechu. Mají kaskádovitý stupňovitý tvar zpravidla rovnoběžný s povrchem plechu. Hlavní činitelé, které ovlivňují vznik lamelárních trhlin jsou.

- přítomnost velkého počtu plochých rozválcovaných plastických vměstků
- plastické vlastnosti oceli ve směru tloušťky,
- způsob svařování a svařovací parametry,
- konstrukce svařovaného uzlu,
- obsah difuzního vodíku.

Lamelární trhliny řadíme mezi defekty typu studených trhlin, přestože jejich vznik může souviset s ději v předehřáté oblasti v tepelně ovlivněné oblasti. Vznik těchto defektů probíhá nejčastěji v oblastech řádkový shluků nekovových vměstků.

K omezení vzniku lamelárních trhlin je nutné:

- používat vhodné základní materiály
- zlepšení čistoty oceli, snížení obsahu difuzního vodíku,
- přesměrovat působení tahových napětí změnou tvaru spoje
- používat techniky svařování, které minimalizují napětí od svařování.

3.9.2.4 Žíhací trhliny

Žíhací trhliny vznikají při tepelném zpracování svarových spojů, případně při mnohavrstevném svařování. Trhliny vznikají za nízkých teplot v důsledku vysoké rychlosti ohřevu na žíhací teploty, při které je velký rozdíl teplot mezi povrchem a jádrem svaru. Termální napětí mohou spolupůsobit s napětími strukturními, které vznikají při rozpadu přesycených tuhých roztoků, jakými je například martenzit. Martenzitická struktura je velice tvrdá a křehká, a proto může být u svarových kovů nežádoucí.

Omezení možnosti vzniku žíhacích trhlin souvisí s úpravou a kontrolou žíhacích režimů. Snížením rychlostí ohřevů a ochlazování, zvláště v prvních stadiích do 250°C. Dalším doporučením je žíhat z mezioperační teploty. V případě že zkouškami zjistíme náchylnost na žíhací trhliny např. 580 až 650°C, je možné použít dvojestupňové žíhání. Kde je doba setrvání dostatečně dlouhá pro relaxaci zbytkových napětí.

4. SVAŘITELNOST

[2]

4.1 Svařitelnost

Svařitelnost kovů je komplexní charakteristika vyjadřující vhodnost kovu na zhotovení svarků s požadovaným účelem, při určitých technologických možnostech svařování a konstrukční spolehlivosti svarového spoje.

Vhodnost na svařování je nový pojem, který zavedla ČSN 05 1309-90 na místo dosud používaných stupňů svařitelnosti „zaručená“ (1a), „zaručená podmíněčně“ (1b), „dobrá“ (2) a „obtížná“ (3). Vhodnost kovu na svařování je charakteristika, která vyjadřuje změnu jeho vlastností v důsledku svařování. Obecně lze svařitelnost také interpretovat jako reakci materiálu na tepelně deformační cyklus svařování, jejímž výsledkem jsou strukturní změny, deformace a zbytková pnutí.

Vhodnost svařování je dána:

- chemickým složením
- metalurgickým způsobem výroby
- způsobem lití a tváření
- teplným zpracováním

Technologická možnost svařování kovu je charakteristika, která vyjadřuje vliv použitého druhu svařování na vlastnosti svarového spoje určité konstrukční spolehlivosti, vyrobeného z kovu s určitou vhodností na svařování

Vliv technologických podmínek na možnost svařování je jedním z rozhodujících činitelů, neboť technologie výroby podstatně ovlivňuje možnost svařování uvažovaného materiálu a ovlivňuje možnost svařování uvažovaného materiálu a ovlivňuje mechanické a fyzikální vlastnosti svarového spoje, ale i úroveň pnutí, deformací a náchylnost ke vzniku defektů.

Konstrukční spolehlivost svarového spoje se zabezpečuje zejména tloušťkou materiálu, tvarem spoje, tvarem a přípravou svarových ploch, tuhostí spoje ve svarku a rozložení svarových spojů v závislosti na namáhání. Z hlediska konstrukční spolehlivosti svarového spoje je nutno zohlednit hlavní zásady navrhování a provádění technologičnosti svařovaných konstrukcí, neboť provedení a umístění svarových spojů je určujícím činitelem tuhosti a má vliv na velikost vrubových účinků a napěťová pole vznikající v oblasti spoje, která je třeba posuzovat v kontextu spoje v celém svarku.

4.2 Kritéria a ukazatele svařitelnosti

Vhodnost materiálu na svařování je vyjadřována pojmem svařitelnost. Pro hodnocení svařitelnosti kovů se podle ČSN 05 1309 používají:

- ukazatele celistvosti svarových spojů, charakterizující odolnost svarových spojů ke vzniku trhlin a jiných nepřijatelných vad
- ukazatel vlastností svarových spojů, charakterizující změny jednotlivých vlastností kovů v oblasti svarového spoje v důsledku svařování

Hodnocením svažitelnosti se určuje jednak vhodnost materiálu na svařování za určitých technologických, popřípadě konstrukčních podmínek, a jednak technologické podmínky svařování určitého materiálu pro dosažení funkčně vyhovujícího spoje.

Mezi ukazatele svažitelnosti patří k nejrozšířenějším technologiím tavné obloukové svařování ocelí. Pro zkoušení a hodnocení svažitelnosti ocelí pro obloukové svařování platí norma ČSN 05 1311. Podle této normy se vhodnost celí na svařování hodnotí dle tloušťky materiálů do 25mm, v rozmezí 25 až 60mm a nad 60mm

4.3 Uhlíkový ekvivalent

Pro nelegované, nízkolegované a středně legované oceli tvářené a oceli na odlitky je základní charakteristika vhodnosti na svařování vyjádřena uhlíkovým ekvivalentem C_e .

$$C_e = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad [-] \quad (4.1) \quad [2]$$

Ve vztahu uhlíkového ekvivalentu (8) jsou použity pro výpočet značky prvků které jsou obsaženy v oceli, kde za značky prvků jsou dosazeny hmotnostní procenta obsahu prvku v hodnocené oceli. Jako orientační kritérium vhodnosti na svařování je $C_e \leq 0,45$. A dále při $C_e > 0,45$ je vhodnost na svařování vázána na tepelný příkon, popřípadě předehřev.

Pro současné konstrukční oceli třídy 11 až 16 a nízkolegované oceli bezperlitických nebo s redukováným obsahem perlitu jsou uhlíkové ekvivalenty modifikované a mají tedy jiný tvar v závislosti na prvcích které hodnocená ocel obsahuje. U vysokolegovaných ocelí dosud není znám, obdobně jako pro níže legované oceli, obecně platný vztah pro základní charakteristiku vhodnosti na svařování.

4.4 Podmínky svažitelnosti

Vhodnost ocelí nelegovaných, nízkolegovaných a střednělegovaných na svařování je vázána na měrný tepelný příkon svařování Q_p a popřípadě také předehřev. Většinou je potřebné na zabezpečení svažitelnosti použít předehřev, pokud je současně obsah $C > 0,18\%$, ekvivalentní obsah $C_e > 0,42$ při tloušťce svařovaného materiálu nad 25 mm. Teplota předehřevu, popř. doporučený tepelný příkon pro svařování, by měl být uveden v materiálových normách. Měrný tepelný příkon svařování Q_p , popřípadě zpětně vhodné parametry svařování pro zabezpečení podmínek svažitelnosti se stanoví podle vztahu:

$$Q_p = \frac{U \cdot I}{10^3 \cdot v} \quad (4.2) \quad [2]$$

kde: U - [V] - napětí oblouku
 I - [A] - svařovací proud
 v - [$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$] - rychlost svařování

Teplota předehřevu T_p pro nelegované, nízkolegované a střednělegované oceli, charakterizované uhlíkovým ekvivalentem a tloušťky do 60mm se stanoví dle ČSN 05 1311. Teplota předehřevu je směrodatná pro ruční obloukové svařování kořenové vrstvy.

4.5 Hodnocení svařitelnosti

Na zkoušení a hodnocení vhodnosti ocelí na svařování se používá soubor ukazatelů celistvosti a mechanických vlastností svarových spojů. Ukazatele celistvosti hodnotí oceli z hlediska odolnosti proti vzniku různých typů praskavosti účinkem svařovacího procesu na základní materiál a jeho degradačním vlivem, který se projeví v praskavosti svarových spojů za studena, za horka, žíhací praskavostí a lamelární praskavostí. Odolnost svarových spojů proti jednotlivým typům praskavosti se zkouší různými laboratorními a technologickými zkouškami uvedenými v příslušných normách a odolnost je hodnocena stupni odolnosti podle tab. 1 pro jednotlivé ukazatele celistvosti.

Tab. 4.1 Ukazatele celistvosti svarových spojů a jejich hodnocení [2]

Typ porušení svaru	Příslušná ČSN pro hodnocení	Stupeň odolnosti		
		I	II	III
Trhliny za studena	05 1142	bez trhlin 1	výskyt trhlin 2	-
Trhliny za horka	05 1143	1	2	3
Trhliny žíhací	05 1144	1 $Z > 20$	2 $Z > 10$ až 20	3 $Z < 10$
Trhliny lamelární	-	1 $Z \geq 35$	2 $Z \geq 25$	3 $Z \geq 15$

Z – [%] – koncentrace

I – vysoký (vyhovující bez podmínek), II – střední (vyhovující s podmínkami nebo nevyhovující), III – nízký (nevyhovující)

U ocelí označených v materiálové normě jako vhodné na svařování je výskyt trhlin ve svarových spojích nepřijatelný a odolnost je hodnocena stupněm I. U střední odolnosti označené stupněm II bývají nutná pro dosažení svarových spojů bez trhlin určitá technologická, popř. i konstrukční opatření. Použití ocelí s nízkou odolností proti vzniku trhlin hodnocenou stupněm III bývá problematické a přináší řadu komplikací.

Ukazatelem mechanických vlastností svarových spojů vyjadřují degradační vlivy tepelně deformačního cyklu svařování na materiál a kritériem jsou hodnoty mechanických vlastností v oblasti svarového spoje v porovnání s odpovídajícími hodnotami základního materiálu.

Pevnost v tahu svarového spoje je mírou jeho únosnosti. Zkouší se podle ČSN 05 1112 Při aplikaci vhodného přídavného materiálu a odpovídajícího měrného tepelného příkonu Q_p nebývá pevnost svarových spojů problematická.

Nárazová práce (vrubová houževnatost) tepelně ovlivněné oblasti svarového spoje se zkouší podle ČSN 05 1125. Vrubová houževnatost velmi citlivě reaguje na proces svařování a změny jím v materiálu vyvolané a to jak v oblasti ohřáté těsně pod A_1 , tak i v oblastech ohřátých na teploty vyšší až po hranici natavení.

5. SVAŘITELNOST VYSOKOPEVNÝCH OCELÍ

[2]

Problematika svařování vysokopevnostních ocelí je dána celistvostí svarových spojů, zejména vznikem trhlin za studena, popřípadě zbrzděných lomů v tepelně ovlivněné oblasti svarového spoje. Dále je to otázka vlastností svarového spoje, a to nejen mechanických. Každá vysokopevnostní ocel vyžaduje při svařování jiný přístup, dokonce je u ocelí s mezí kluzu nad 800MPa propracováno svařování bez předehřevu a následného tepelného zpracování. Při volbě přídatného materiálu je nutno brát v úvahu chemické složení oceli a provozní podmínky svarových spojů, požadavky na pevnost svarového spoje. Dominantní je opět hledisko celistvosti svarového spoje. Zatímco při svařování vysokopevnostních ocelí jsou k dispozici přídatné materiály odpovídající pevnostní třídy, je nutno i z hlediska celistvosti volit pro oceli přídatné materiály austenitické, popřípadě austeniticko-martenzitické.

5.1 Stanovení teploty předehřevu na základě parametru praskavosti P_c

[1]

Vysokopevnostní svařitelné oceli s mezí kluzu přes 360MPa vyžadují jiný postup při určování teploty předehřevu než normalizačně žíhané. Příčinou je vysoká mez kluzu a s ní spojená vysoká hodnota tepelných pnutí a nižší plasticita materiálu. Hodnota maximální podhousenkové tvrdosti se jako kritérium praskavosti u těchto ocelí neosvědčila.

Výsledky rozsáhlých experimentálních prací založených na zkoušce svařitelnosti metodou TEKKEN (zkouška založena na dilataci svařovaných plechů pro stanovení svařovacích parametrů), vedly k výpočtu T_0 , jejímž základem je takzvaný parametr praskavosti P_c , jehož hodnota je součtem tří členů, vyjadřujících vliv materiálu, tuhosti a vodíku:

$$P_c = P_{cm} + P_k + P_H \quad (5.1) \quad [1]$$

kde P_{cm} - je obdoba uhlíkového ekvivalentu, obsah prvků se dosazuje v procentech

$$P_{cm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn + Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad (5.2) \quad [1]$$

P_k - parametr tuhosti $P_k = \frac{K}{40000}$, kde $K = 70 \cdot t \dots \dots$ pro krátké svary

$K = 40 \cdot t \dots \dots$ pro dlouhé svary (t = tloušťka [mm])

limitní hodnota je $K \leq 2800$

P_H - parametru vodíku $P_H = A \cdot \log H_D$ (5.3) [1]

A - koeficient vyjadřující interakci vodíku a pnutí, $A = (K-600) \cdot 7,5 \cdot 10^{-5}$

H_D - obsah vodíku ve svaru [$\text{cm}^3/100\text{g}$]

Uvedený postup výpočtu teploty předehřevu byl sice ověřen rozsáhlými experimenty, autoři však doporučují experimentální ověření v případech, kdy se tuhost blíží nebo přesáhne horní hranici ($K = 2800$) a kdy vypočtená teplota předehřevu se blíží nebo překračuje 200°C . Specifické vnesené teplo Q_s se ve vzorci pro výpočet praskavosti nevyskytuje, neboť se musí optimalizovat nejen s ohledem na praskavost, ale také s ohledem na zhoršení vrubové houževnatosti. Nejnižší hodnotu Q_s je možno stanovit z mezní rychlosti ochlazování, při které se tvoří v tepelně ovlivněné oblasti převážně martenzit, nejvyšší hodnotu přípustnou pro danou značku oceli nutno ověřit experimentálně. Obvykle se při svařování plechů tloušťky 10 – 15mm pohybuje hodnota Q_s mezi 10 až $25\text{kJ}\cdot\text{cm}^{-1}$. Popsaný postup výpočtu T_0 z parametru praskavosti P_c je vhodný především pro stanovení teploty předehřátí ocelí mikrolegovaných, a ocelí s molybdenem.

6. VŠEOBECNÁ DOPORUČENÍ PRO SVAŘOVÁNÍ VP OCELÍ [3]

Na výrobu svařovaných ocelových konstrukcí se používají oceli podle ČSN EN 10027-1 třídy S 235, S275, S 355, S 420 a S 460. Jakostní stupeň JR, JO, J2, K2 představuje zkušební teplotu +20 až -20°C, při které je zaručená vrubová houževnatost (nárazová práce) KV větší nebo rovná 27J, případně KV větší nebo rovná 40J. Ve svarovém spoji se vyžaduje stejná houževnatost, jako je tomu u oceli. Přitom svarový kov z přídavných materiálů musí mít stejné hodnoty R_e a R_m , jako je tomu u základního materiálu, jmenovitě v oblasti vysokodeformační únavy. Svarové spoje se svařují bez přehřevu a po svařování se do tloušťky 50mm nežíhají. Tloušťky nad 50mm se svařují s přehřevem 150°C a vyžaduje se relaxační žíhání (600-650°C-žíhání na snížení zbytkového napětí).

Svařované konstrukce silničních a železničních mostů, jeřábů, stožárů, velkostrojů, potrubních systémů a ocelové konstrukce pro dynamické únavové namáhání (dopravní zařízení) se vyrábějí z konstrukčních a vysocepevných ocelí vhodných pro svařování a schopných vytvořit svarový spoj požadovaných mechanických, fyzikálních a chemických vlastností. Pro vhodnost oceli ke svařování velkých tlouštěk je rozhodující způsob desoxidace oceli, doplňkové mikrolegování Al, Nb, Ti nebo V a případně tepelné zpracování. Využívá se též technologie řízeného válcování a ochlazování (termomechanické zpracování ocelí).

Požadovaná nosnost svařované konstrukce ve spojení s optimální hmotností je zpravidla určující pro volbu oceli podle pevnostních hodnot. U velkých svařovaných nosníků mostů je vhodná kombinace pásnic (přírub) z vysoce pevných ocelí a stojiny namáhané na vzpěr z oceli o nižší pevnosti. Velkou pozornost vyžadují svařované konstrukce namáhané dynamicky a konstrukce namáhané na únavu, například dopravní zařízení, u nichž je nutné uvažovat hodnotu meze únavy. Přitom únavové hodnoty se nezvyšují úměrně se statickou pevností svařovaného spoje. Potom je nutné svarové spoje umístit do méně namáhané části svařované konstrukce, případně povrch svarového spoje z důvodu potlačení vlivu vrubového účinku přebrousit ve směru namáhání a přechod na povrchu zpevnit prokováním s cílem vnesení tlakového stavu napjatosti do jeho povrchové vrstvy.

Při volbě vysocepevné oceli pro konstrukce o velkých tloušťkách stěn je nutné použít ocel dostatečně odolnou proti křehkému porušení včetně jejího svarového spoje. Potom přídavné materiály musí zaručit s výjimkou chemického složení a mechanických vlastností též požadované nadstavbové hodnoty lomové houževnatosti v závislosti na podmínkách namáhání.

7. ZÁVĚR

Cílem mé bakalářské práce bylo popsat a zhodnotit problematiku týkající se nových materiálů ve svařování, zejména materiálů vysocepevných, které mají v dnešní době značné využití. To je dáno jejich vysokou pevností, při použití malých tloušťek. V důsledku malých tloušťek má svařovaná konstrukce výhodu menší hmotností, čímž se snižují náklady na vstupní materiál. V práci byly doporučeny zásady pro svařování těchto ocelí. Jedna z nejdůležitějších zásad je, že je třeba svařovat tak, aby došlo k co nejmenším degradacím vlastností v tepelně ovlivněné oblasti, jako jsou například trhliny za horka, vznik defektů ve formě bublin, pokles houževnatosti, apod., aby nebylo nutno zvyšovat rozměrů svarů. Dále jsem se v práci zabýval šířením tepla ve svarovém spoji, rychlostí chladnutí a jejich vlivem na napětí ve svarovém spoji, případně snížením vlivu napětí. Závěrečná část práce je zaměřena na kritéria, hodnocení a ukazatele a svařitelnosti kovů a všeobecná doporučení pro svařování vysocepevných ocelí.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ŽÁK, J. a NOVÁK, M. *Teorie tvárnosti*. 1. vyd. Brno: VUT Brno. 1988. 142s.
- [2] KŘÍŽ, R. a VÁVRA, P. *Strojírenská příručka*. 1. vyd. Praha: SCIENTIA s.r.o. 1998. 253 s. ISBN 80-7183-054-2
- [3] Kolektiv autorů. *Materiály a jejich svařitelnost* 1.vyd. Ostrava: Zeross. 2001. 296 s. ISBN 80-85771-85-3

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
A	Koeficient interakce vodíku	[-]
a	Teplotní vodivost materiálu	[cm ² ·s]
C _e	Uhlíkový ekvivalent	[-]
c	Měrné teplo svařovaného materiálu	[J·g ⁻¹ ·K ⁻¹]
E	Modul pružnosti v tahu	[MPa]
H _D	Obsah vodíku ve svaru	[-]
I	Svařovací proud	[A]
K	Koeficient délky svaru	[-]
K ₀ (U)	Besselova funkce	[-]
Δl _T	Teplotní dilatace	[mm]
Δσ	Napěťová dilatace	[mm]
P _c	Parametr praskavosti	[-]
P _{cm}	Parametr materiálu	[-]
P _H	Parametr vodíku	[-]
P _k	Parametr tuhosti	[-]
P _s	Efektivní výkon zdroje	[W]
R _e	Mez kluzu materiálu	[MPa]
Q _p	Tepelný příkon svařování	[J]
Q _s	Specifické vnesené teplo	[J·cm ⁻¹]
r	Kartézské souřadnice bodu	[cm]
T	Rozdíl požáteční a okamžité teploty	[°C]
ΔT	Teplotní rozdíl	[°C]
T _p	Teplota přehřevu	[°C]
T _{x,y,z}	Zvýšení teploty určitého bodu	[°C]
U	Svařovací napětí	[V]
v	Rychlost svařování	[mm·s ⁻¹]
v _s	Rychlost pohybu zdroje ve směru osy +x	[cm·s ⁻¹]
x, y, z	Souřadnice bodů teplotního pole	[cm]
x'	Rychlost svařování	[cm·s ⁻¹]
Z	Koncentrace	[%]
λ	Střední tepelná vodivost materiálu v intervalu T - T ₀	[W·cm ⁻¹ ·K ⁻¹]
α	Součinitel teplotní roztažnosti	[K ⁻¹]
ε	Poměrné přetvoření	[-]
η	Účinnost přenosu tepla	[%]
ρ	Měrná hmotnost materiálu	[g·cm ⁻³]
σ	Napětí v tahu	[MPa]
σ _T	Tepelné pnutí	[MPa]