ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav strojírenské technologie

Svařování a jeho modelování v simulačním softwaru

Welding and its simulation in software

Bakalářská práce

Praha 2017

Studijní program: B 2343 VÝROBA A EKONOMIKA VE STROJÍRENSTVÍ

Studijní obor: 2303R014 Technologie, materiály a ekonomika ve strojírenství

Autor: Marek Langr

Vedoucí práce: Ing. Petr Vondrouš, Ph.D., IWE

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Langr** Jméno: **Marek** Osobní číslo: **438609**

Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**

Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**

Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**

Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Svařování a jeho modelování v simulačním softwaru

Název bakalářské práce anglicky:

Welding and its simulation in software

Pokyny pro vypracování:

1. Přehled fyzikální jevů při tavném svařování elektrickým obloukem
2. Simulační software Visual-Weld a Simufact Welding a jejich možnosti
3. Vytvoření jednoduché simulace svařování
4. Ověření výsledků simulace experimentem
5. Závěrečné zhodnocení

Seznam doporučené literatury:

dle pokynu vedoucího

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Petr Vondrouš Ph.D., ústav strojírenské technologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **25.04.2017** Termín odevzdání bakalářské práce: **10.08.2017**

Platnost zadání bakalářské práce: **10.08.2017**

Podpis vedoucí(ho) práce	Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry	Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

4. 5. 2017	Langr
Datum převzetí zadání	Podpis studenta

© ČVUT v Praze, Design: ČVUT v Praze, VIC

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem: „**Svařování a jeho modelování v simulačním softwaru**“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Petra Vondrouše, Ph.D., IWE s použitím literatury uvedené v seznamu použité literatury.

V Praze …… Marek Langr

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Petru Vondroušovi, Ph.D., IWE za rady, připomínky a odborné vedení bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Karlu Kovandovi, Ph.D., IWE za pomoc s experimentem. Panu Josefovi Veverkovi z firmy MSC.Software s.r.o. za rady ohledně simulačního softwaru Simufact.

V neposlední řadě bych rád vyjádřil díky mé rodině za podporu a pochopení při psaní této bakalářské práce.

Anotace

Tématem, kterým se zabývá tato bakalářská práce, je simulace svařování a její přesnosti. Obsah práce je složen z teoretické a praktické části. Teoretická část se zabývá fyzikálními jevy při svařování a také je zde podrobně vysvětleno, jak simulační softwary svařování pracují a jaká potřebují vstupní data. Praktická část obsahuje popis dvou rozdílných simulací koutového svaru v programu Simufact.welding, které jsou následně porovnány s experimentem, jenž byl proveden v laboratořích strojní fakulty Českého vysokého učení technického v Praze. Byla sledována teplota a deformace. Z experimentu byly získány uspokojivé výsledky.

Abstract

The topic of this bachelor thesis is the simulation of welding and its precision. The content of the thesis is composed of theoretical and practical part. The theoretical part deals with the physical phenomena of welding and also explains in detail how simulation welding software works and what input data are needed. The practical part contains a description of two different simulations welding in the Simufact.welding program, which are then compared with the experiment, which was carried out in the laboratories of the Faculty of Mechanical Engineering of the Czech Technical University in Prague. Temperature and deformation were monitored. Satisfactory results were obtained from the experiment.

Klíčová slova

Svařování, simulace svařování, simufact.welding

Keywords

Welding, welding simulation, simufact.welding

Obsah

1 Úvod 8
2 Simulace svařování 9
2.1 Rovnice vedení tepla 9
2.1.1 Podmínky pro řešení rovnice vedení tepla 10
2.2 Metoda konečných prvků při simulaci svařování 11
2.2.1 Teplotně-metalurgická analýza 12
2.2.2 Mechanická analýza 13
2.3 Vstupní data 14
2.3.1 Materiálová data pro teplotně-metalurgickou analýzu 15
2.3.2 Materiálová data pro mechanickou analýzu 15
2.3.3 Definice a popis tvaru tepelného zdroje 16
2.3.4 Prostorový model 22
3 Experiment 23
3.1 Nasimulování vzorků 24
3.1.1 Upnutý model 24
3.1.2 Neupnutý model 25
3.2 Reálné svaření vzorků 25
3.2.1 Upnutý svařenec 26
3.2.2 Neupnutý svařenec 27
3.3 Porovnání výsledků 28
3.3.1 Teplota 28
3.3.2 Deformace 30
4 Závěrečné zhodnocení experimentu 33
5 Seznam použité literatury 34

Seznam obrázků:

Obrázek 1 – Průběh tahových zkoušek pro materiál s nevýraznou mezí kluzu za různých teplot [6] 16
Obrázek 2 – Goldakův dvojitý elipsoid [4] 17
Obrázek 3- Statická rovnováha sil v momentě oddělení kapky materiálu [8] 18
Obrázek 4- Působení elektromagnetických sil [9] 20
Obrázek 5 - Průchod proudu kapkou elektrody [9] 20
Obrázek 6 - Možné směry působení elektromagnetické síly Fe [9] 21
Obrázek 7 - Porovnání směru působení síly při svařování v argonu (vlevo) a oxidu uhličitého (vpravo) [8] 21
Obrázek 8 – Příklad prostorového modelu koutového svaru pro metodu konečných prvků [10] 23
Obrázek 9 - Rozměry desek 23
Obrázek 10 - Upnutý model experimentu 24
Obrázek 11 - Neupnutý model experimentu 25
Obrázek 12 - Přehled pracoviště pro experiment 1 26
Obrázek 14 - Upnutý svařenec 27
Obrázek 15 - Neupnutý svařenec 27
Obrázek 16 - Celkové deformace upnutého svařence s řešenými body 30
Obrázek 17 - Celkové deformace neupnutého svařence s řešenými body 31

Seznam tabulek a grafů:

Graf 1 – Termočlánky upnutého modelu 28
Graf 2 - Průběh teplot v bodech termočlánků u upnutého modelu 28
Graf 3 - Termočlánky neupnutého svařence 29
Graf 4 – Průběh teplot v bodech termočlánků u neupnutého modelu 29
Graf 5 - Průběh deformací v ose x 30
Graf 6 - Průběh deformací v ose z 31
Graf 7 - Průběh deformací v ose x 32
Graf 8 - Průběh deformací v ose z 32

1 Úvod

Procesem svařování se vytváří nerozebíratelné spoje dvou a více materiálů, které se spojí až při dodání určitého množství energie do místa svaru. Pro proces svařování je možné vybrat z několika druhů technologií (např.: svařování elektrickým obloukem, laserem, elektrickým odporem, ultrazvukem) a způsobů (MIG, MAG, WIG, SAW), které danému typu svaru nejvíce vyhovují.

Svařování probíhá za působení tepla, tlaku nebo jejich kombinací. V této práci budeme pracovat s tavným svařováním. Při tavném svařování dochází k lokálnímu natavení základních materiálů. Obvykle je použit i přídavný materiál. Roztavená část materiálu tvoří tavnou lázeň. Jelikož dochází k velmi prudkému ohřátí v místě svaru, nastává změna krystalické mřížky a tedy i změny mechanických vlastností. Dále dochází ke vzniku vnitřních pnutí, případně i vnitřních vad, proto je pro realizaci svaru potřeba kvalifikovaných pracovníků. V této práci se dále bude pracovat pouze s metodou MAG – svařování elektrickým obloukem tavící se elektrodou v ochranném aktivním plynu. Dnes tato metoda patří mezi nejčastěji používané druhy svařování i vzhledem k její snadné automatizaci.

Stejně jako v jiných technologických odvětvích je i ve svařování snaha předpovědět, jak bude po procesu výrobek vypadat, jaké bude mít vlastnosti a vady. Proto se stále častěji využívají simulace procesů, jelikož umožňují vyhnout se metodě pokus omyl, která je u tvarově složitějších výrobků velmi nákladná a také časově náročná. Mimo jiné dovolují nejdříve vyzkoušet více konstrukčních řešení, a následně vybrat nejlepší variantu.

Aby simulace mohly docílit co nejpřesnějšího výsledku, musí správně nasimulovat fyzikální děje, které při procesu svařování nastanou. Hlavními představiteli jsou přenos hmoty, přenos tepla. Tyto děje jsou následně popsány v teoretické části této práce. Simulace by mohly nasimulovat téměř celý děj svařování (od proudění ochranné atmosféry přes proudění taveniny, změnu krystalické mřížky až po chladnutí), ale to je pro případy, kdy nás zajímají změny svařence jako celku, zbytečné, jelikož jsou v tomto případě některé děje zanedbatelné.

Cílem této práce je porovnat simulaci svařování MAG s reálně naměřeným experimentem. Tedy zjistit, jestli je možné simulaci považovat za odpovídající. V praktické části bakalářské práce bude provedena simulace jednoho plně upnutého a jednoho neupnutého koutového svaru za stejných podmínek. A po následném reálném svaření těchto dvou vzorků bude porovnáno, nakolik simulace reálnému experimentu odpovídá. Během experimentu budou sledovány deformace a teploty.

2 Simulace svařování

V současném průmyslu je snaha co nejvíce zrychlit reakci na poptávky. Pro úspěch je nutné vyrábět kvalitně, ale zároveň levně, při neustálém tlaku na zrychlení vývoje výrobků a také zkrácení lhůty dodání zboží na trh. Jedním způsobem, jak vyřešit tento problém je použití počítačových simulací, které nám sníží potřebu vytváření experimentů a prototypů. Simulace technologických procesů, jako je lití, tváření nebo svařování je již celkem častým pomocníkem při řešení těchto problémů [1].

Simulační softwary pracují především s metodou konečných prvků. Tato metoda je vhodná pro simulace s tepelným zpracováním, při nichž dochází k fázovým přeměnám. Většina simulačních softwarů umožňuje vypočet teplotních polí, deformací, zbytkových pnutí, fázových přeměn a dalších veličin. Dále je zde možné simulovat různé druhy svařování (od elektrického oblouku, laseru až po elektronový paprsek). [1]

Při simulaci svařování dochází nejprve k vypočtení teplotně-metalurgické analýzy a až poté k dopočítání analýzy mechanické. Proto je pro přesnost simulací teplotně-metalurgická analýza velmi důležitá.

2.1 Rovnice vedení tepla

Během svařování dochází k třem druhům transferu tepla (kondukcí, radiací a prouděním). Francis ve své publikaci popisuje tepelný proces svařování třemi následujícími charakteristikami [2]:

- teploty dosahují vysokých hodnot
- vysoký teplotní gradient v oblasti svařování
- rychlá změna teploty

Během stacionárního sdílení tepla dochází v základním materiálu ke vzniku teplotního pole.

$$T = f(x, y, z)$$

kde: T [K] – teplota

Jelikož se tepelný zdroj při svařování pohybuje, je teplota funkcí souřadnic bodu a funkcí času. Tepelné pole je při svařování nestacionární.

Průběh šíření tepla v okolí svaru a charakter teplotního pole popisuje základní diferenciální Fourierova rovnice (2.1.1) [3]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c \cdot p} \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) = \alpha \nabla^2 T \qquad (2.1.1)$$

Fourierova rovnice lze také napsat jako (2.1.2) [3]:

$$q = -\lambda \cdot \left(\vec{\imath}\frac{\partial T}{\partial x} + \vec{\jmath}\frac{\partial T}{\partial y} + \vec{k}\frac{\partial T}{\partial z}\right) = -\lambda \nabla T \qquad (2.1.2)$$

kde: q [W] – intenzita

λ [$W.m^{-1}.K^{-1}$] – měrná tepelná vodivost

c [$J.kg^{-1}.K^{-1}$] – měrné teplo

ρ [$kg.m^{-3}$] – hustota

α [$m^2.s^{-1}$] – koeficient tepelné vodivosti

Ze vzorce je patrné, že intenzita přestupu tepla je kolmá k izotermickému povrchu. Při přepsání rovnice do kartézských souřadnic se získají tyto rovnice (2.1.3) [3]:

$$q_x = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}$$

$$q_y = -\lambda \frac{\partial T}{\partial y}$$

$$q_z = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \qquad (2.1.3)$$

kdy každá z nich k sobě vztahuje intenzitu přestupu tepla přes povrch a teplotní gradient, který je kolmý k povrchu, což lze zapsat jako (2.1.4) [3]:

$$q_n = \frac{\partial T}{\partial n} \qquad (2.1.4)$$

kde: q_n – intenzita přestupu tepla ve směru *n*, normálovém na izotermu.

Při použití energetické rovnice odvozené z prvního zákona termodynamiky o zachování energie je vliv napětí vůči teplotnímu vlivu zanedbatelný (2.1.5) [2].

$$\rho c(T) \frac{\partial T}{\partial t} = Q - \frac{\partial g_N}{\partial N} \qquad (2.1.5)$$

kde: c – měrné teplo

Q – určená funkce generování tepla na jednotku objemu Q = Q (x,y,z,t)

N – poloha x,y,z

Pokud se do výrazu 3.1.5 dosadí vztah 3.1.4, získá se tím rovnice pro vedení tepla (2.1.6) [2]:

$$\rho c(T) \frac{\partial T}{\partial t} = Q - \frac{\partial T}{\partial N}\left(-\lambda \frac{\partial T}{\partial N}\right) \qquad (2.1.6)$$

2.1.1 Podmínky pro řešení rovnice vedení tepla

Pro matematické řešení reálných fyzikálních podmínek jsou nezbytné počáteční a okrajové podmínky. Určením a vyřešením těchto podmínek je získáno několik konstant, jež jsou nezbytné pro řešení diferenciální rovnice vedení tepla [2].

Běžná počáteční podmínka pro řešení přenosu tepla v případě, kdy se teplotní pole v materiálu mění v závislosti na čase lze matematicky vyjádřit jako (2.1.1.1) [3]:

$$T(x, y, z, 0) = T_0(x, y, z) \qquad (2.1.1.1)$$

kde: T_0 – je funkcí pouze prostorových souřadnic

Okrajové podmínky se uplatňují při řešení rovnic pro stacionární a nestacionární pole. Obvykle se využívá pět různých okrajových podmínek.

a) Předepsaná teplota povrchu

Používá se, zejména když je nutné předepsat počáteční teplotu povrchu. Je možné ji vyjádřit tímto matematickým vztahem (2.1.1.2) [2]:

$$T(x,y,z)|_{x,y,z(S_0)} = T_s(x,y,z) \tag{2.1.1.2}$$

kde: x,y,z(S_0) – jsou souřadnice místa na povrchu tělesa
T_s [K] – teplota povrchu tělesa v místě x,y,z(S_0)

b) Předepsaná intenzita přestupu tepla q_s (t)

Během svařování na strukturu povrchu působí silný zdroj tepla nebo chlazení. Jestliže je považována jednotka K_I za normálovou vůči povrchu S_0 a umístění bude dáno souřadnicemi x,y,z(S_0), pak rovnici pro předepsanou intenzitu přestupu tepla je možné zapsat jako (2.1.1.3) [2]:

$$K_I \frac{\partial T}{\partial N}\Big|_{N(S_0)} = q_s[N(S_0)]/\lambda \tag{2.1.1.3}$$

kde: q_s [W] – intenzita přestupu tepla kolmá k povrchu S_0

c) Adiabatický povrch

Pokud nastane případ, že přestup tepla přes povrch je roven nule, Fourierova rovnice se mění na (2.1.1.4) [2]:

$$K_I \frac{\partial T}{\partial N}\Big|_{N(S_0)} = 0 \tag{2.1.1.4}$$

d) Konvenční okrajové podmínky

Svařování většinou probíhá za přítomnosti plynů nebo kapaliny, během něho nastává ke konvenčnímu přestupu tepla mezi povrchem svařence a okolním prostředím. Za předpokladu, že intenzita tepla přes povrch tělesa S_0 je stejná jako intenzita přestupu tepla do tekutiny ve styku s povrchem S_0, nedochází k nahromadění tepla na přechodu mezi nimi, poté je možné konstatovat, že (2.1.1.5) [2]:

$$K_I \frac{\partial T}{\partial N}\Big|_{N(S_0)} = \beta\{T[N(S_0),t] - T_0\} \tag{2.1.1.5}$$

kde: β [W.m^{-2}.K^{-1}] – koeficient přestupu tepla do okolí
T_0 [K] – teplota tekutiny např. vzduchu ve styku s plochou S_0

e) **Přestup tepla zářením**

Podmínku pro přestup tepla radiací lze zapsat (2.1.1.6) [2]:

$$q = \varepsilon\sigma(T^4 - T_E^4) \tag{2.1.1.6}$$

Pokud je intenzita přestupu tepla daná vyzařováním tepelné energie z povrchu tělesa a tepelnou energií dopadajících částic generovaných z jiných povrchů. T je teplota tělesa. T_E je teplota stěn okolního uzavřeného prostředí. Vztah je platný za předpokladu, že okolní stěny mají dokonalou emisivitu a absorbtivitu $\varepsilon = \alpha = 1$.

2.2 Metoda konečných prvků při simulaci svařování

Pro zjištění řešení diferenciální rovnice vedení tepla (3.1.6) se nepoužívá tradiční řešení diferenciálních rovnic. Pro tyto potřeby simulačních softwarů byly vyvinuty numerické metody, které používají jednodušší algebraické výpočty. Metodou konečných prvků se těleso nejdříve rozdělí na konečný počet velmi malých částic – elementů. Následně se

provede výpočet pro každý element, jeho uzlové body a jeho počáteční a okrajové podmínky.

Při hodnocení těchto simulací je nutné brát v potaz, jak přesně jsou schopny určit výsledek ve srovnání se skutečným svarem, tedy jak přesné jsou výpočty teplot, napětí a deformacích ve svařovaném tělese. Určení přesnosti simulace je složité, jelikož dochází ke komplexním změnám teploty, tepelné roztažnosti svařovaného materiálu a materiálových vlastností v závislosti na čase i poloze. Na přesnost výsledné simulace má také vliv, s jakou přesností byl popsán matematický model vstupu tepla a fázových přeměn v materiálu.

Porovnání 2D a 3D elementů

Pro přesnost výpočtu zbytkových pnutí po svařování je důležité, aby simulace průběhu teplot při svařování byla co nejpřesnější. Pro přesné údaje o napětí a deformacích je nutné využít 3D elementy, jejichž síť zajistí lepší výsledky než síť z 2D elementů. Simulace s 2D mřížkou se v porovnání se skutečnými hodnotami velmi rozcházejí. Hlavní důvod těchto nepřesností je, že smykové napětí kolmé na rovinu 2D elementu je zanedbatelné, stejně jako napětí normálové. Použití 3D elementů je přesnější i při pohybujícím se zdroji tepla, který je při většině druhů svařování běžný.

2.2.1 Teplotně-metalurgická analýza

Pro simulace svařování za pomoci metody konečných prvků je možné použít více různých programů jako je Sysweld nebo Simufact.welding, případně je možné si uzpůsobit program ABAQUS. V poslední době se více softwaru snaží obsáhnout byť i jen lehce simulace svařování.

Teplotně-metalurgická analýza dovoluje výpočet nestacionárních polí. Pro zkrácení výpočtového času a zjednodušení výpočtů je provedena zvlášť termální a zvlášť mechanická analýza. Důvodem rozdělení obou analýz je také velikost pracovních souborů, která může pro každou analýzu dosahovat až několika gigabajtů.

Z hlediska fyzikálního se předpokládá, že mechanická analýza neovlivní analýzu teplotní. Přesněji, změny napětí a deformací neovlivní teplotu modelu svařence. Ovšem změna teploty vliv na deformace a napětí má. Spojitost mezi stavem mechanickým a teplotním je jednosměrná. Z tohoto důvodu je nejprve prováděna teplotně-metalurgická analýza a na výsledném teplotním poli počítána mechanická analýza. Podle Francise je teplo přivedené do svařence od svařovacího zdroje mnohonásobně vyšší než teplo vytvořené deformacemi. Tedy je to důvod, proč je možné provádět teplotně-metalurgickou analýzu odděleně.

V experimentu použitém programu Simufact.welding se teplotně-metalurgická analýza skládá jak z teplotní části, tak z metalurgické části. Tyto dvě složky pracují tak, že pro

každou hodnotu teploty je spočítána i hodnota metalurgická, tedy v jaké fázi se transformace kovu nalézá. Cílem této analýzy je určit, jak velké procentuální zastoupení jednotlivých fází se v tepelně ovlivněné oblasti (TOO) nalézá. Tímto se tedy může předpovědět a popsat jednotlivé fázové přeměny, které se při svařování materiálu projeví, tedy: tuhnutí, tavení, austenitické, feritické, bainitické a martenzitické přeměně. Jak materiál změnami fází prochází či neprochází, je nutné si nadefinovat v programu.

Význam metalurgické analýzy [2]:

- Mechanické vlastnosti TOO jsou ovlivňovány mechanickými vlastnostmi jednotlivých fází.
- Fázová přeměna ovlivňuje konečné zbytkové napětí v materiálu kvůli expanzi a kontrakci jednotlivých fází během fázových přeměn, což je zapříčiněno rozdílnými vlastnostmi závislými na teplotě. Teplotní deformace jsou vypočítávány na základě závislosti fází a koeficientů tepelné roztažnosti.
- Při metalurgické analýze se zmenší plastická deformace kvůli pohybu dislokací. Každá fáze disponuje různými mechanickými vlastnostmi.
- Při fázových přeměnách dochází k transformační plasticitě, tedy nevratné plastické deformaci. Je nevratná, jelikož pokus o přeměnu na materiálu na původní fázi by neznamenal zmenšení deformací, ale mohlo by dojít i k jejich zvětšení.

Dle Francise má změna plasticity dopad na velikost a směr zbytkového napětí, které je vyvozeno v přechodové oblasti a TOO a to až do výše několika set MPa. Při výpočtu napětí v materiálech prodělávající fázovou přeměnu je nezbytné zahrnout do simulace i transformační plasticitu.

Výsledkem teplotně-metalurgické analýzy je teplotní pole, množství a rozložení jednotlivých fází v proběhlém svařovacím cyklu, chladnutí i kalkulaci tvrdosti struktury.

2.2.2 Mechanická analýza

Hlavním cílem mechanické analýzy je určení deformací a zbytkových pnutí v materiálu na základě výsledného teplotního pole z teplotně-metalurgické analýzy a materiálových konstant. Je tedy možné tvrdit, že přesnost mechanické analýzy velmi úzce souvisí s přesností teplotně-metalurgické analýzy.

Základní rozdíly elastické a plastické deformace [2]:

- Elastická deformace – lineární vztah mezi napětím a deformací, tj. vratné deformace
- Plastické deformace – nelineární vztah mezi napětím a deformací, tj. nevratná deformace
- Celková deformace – součet elastické a plastické deformace

Z toho tedy vyplývá, že čím je hladina napětí při změně z elastické deformace v plastickou deformaci nižší, tím menší je tendence vzniku poruch ve svařované konstrukci [4].

Kuncipál v *Teorii svařování* uvádí pro výpočet délkové deformace svarových spojů následující vzorec (2.2.2.1) [4]:

$$\Delta l = \alpha \cdot l_0 \cdot \Delta t \qquad (2.2.2.1)$$

kde: Δl [mm] – prodloužení

α [K^{-1}] – koeficient teplotní roztažnosti

l_0 – původní délka svarového spoje

Δt – gradient teploty

Z následujícího vzorce lze vyjádřit příčné smrštění svarových spojů (2.2.2.2) [4]:

$$l_{p\check{r}} = 0{,}1716 \cdot \frac{S_{SV}}{s} + 0{,}0121 \cdot b_s \qquad (2.2.2.2)$$

kde: S_{SV} [mm^2] – plocha příčného průřezu svaru

s [mm] – tloušťka svarových desek

b_s [mm] – střední šířka svaru

Fyzikální děje ve svařování jsou souhrnnější. Uvedené vzorce jsou pro využití na složitých konstrukcích a při různých postupech svařování nedostačující. Mechanická analýza v programu Simufact.welding tudíž k řešení užívá řadu vstupních dat. Výsledkem mechanické analýzy je průběh napětí, deformace v každé teplotě a zbytkové napětí ve svařenci po svařovacím procesu.

2.3 Vstupní data

Bez správných dat k řešení výpočtů by jednotlivé části simulace svařování neposkytovaly pravdivé výsledky. Velmi důležité je tedy stanovit s jakými druhy dat bude teplotně-metalurgická a mechanická analýza pracovat.

Tepelně-metalurgická analýza potřebuje pro výpočet tyto data [5]

- Materiálová data popisující vlastnosti materiálu v závislosti na teplotě
- Popis zdroje a intenzity tepla
- Počáteční a okrajové podmínky pro výpočet rovnice vedení tepla
- Prostorový model pro metodu konečných prvků

Mechanická analýza potřebuje pro výpočet následující data [5]:

- Materiálová data v závislosti na teplotě
- Vstupní data z tepelně-metalurgické analýzy
- Popis a model zdroje tepla
- Prostorový model pro metodu konečných prvků

Vstupními daty (nezávislými proměnnými) jsou materiálová data (popis zdroje tepla, počáteční a okrajové podmínky, prostorový model). Jejich hodnoty nejsou závislé na průběhu žádné simulace. Vstupní data teplotně-metalurgické analýzy lze označit jako závislé proměnné. Jejich hodnoty záleží na správnosti a přesnosti nezávislých vstupních dat. Pro získání co nejpřesnějších výsledků z teplotně-metalurgické analýzy a mechanické analýzy je nutné věnovat velkou pozornost volbě nezávislých vstupních dat pro tyto analýzy.

2.3.1 Materiálová data pro teplotně-metalurgickou analýzu

Popisuje chování materiálu při vnášení tepla ze zdroje.

Teplotně-metalurgická analýza umožňuje [6]:

- Výpočty nestacionárních (generovaných) teplotních polí v prostoru a čase
- Výpočty rozložení fází v průběhu celého svařovacího cyklu
- Výpočty tvrdosti a velikosti austenitického zrna

Nutná materiálová data [7]:

- **Chemické složení materiálu** – vlastnosti materiálu jsou závislé na chemickém složení
- **Měrná tepelná kapacita, c [J.kg^{-1}.K^{-1}]** – je množství tepla potřebného k ohřátí 1 kilogramu látky o 1 teplotní stupeň
- **Hustota, ρ [kg.m^{-3}]** – je závislost hustoty materiálu na teplotě
- **Koeficient přestupu tepla α [W.m^{-2}.K^{-1}]** – vyjadřuje, kolik tepla unikne konstrukcí o ploše 1 m^2 při rozdílu teplot jejích povrchů 1 K (tedy vyjadřuje, jak rychle bude materiál chladnout během svařování i po něm)
- **ARA diagram** – popisují fázové přeměny v materiálech za podmínek svařování

2.3.2 Materiálová data pro mechanickou analýzu

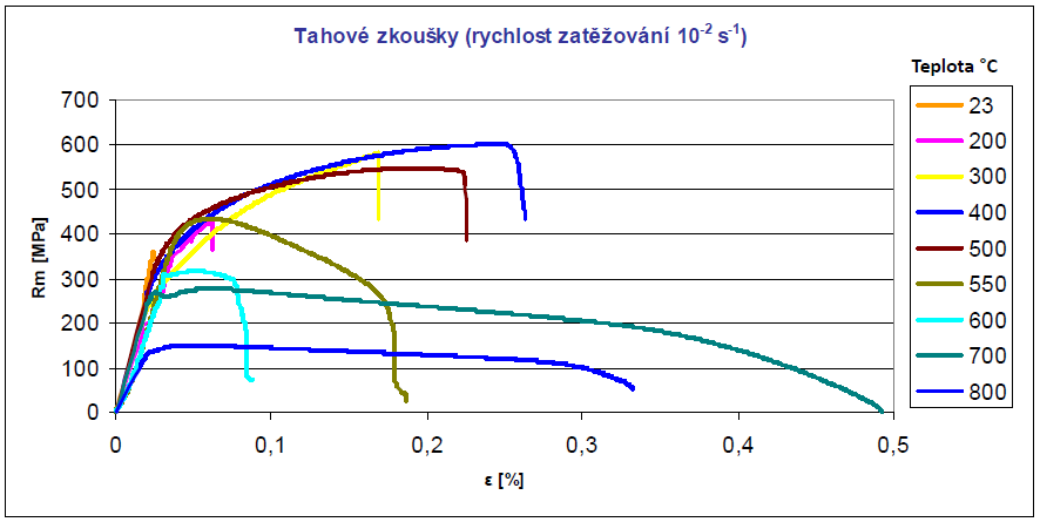
Následuje až po vyřešení teplotně-fázové analýzy a umožňuje [6]:

- Výpočty zbytkových napjatostí a elastických i plastických deformací
- Výpočty jednotlivých složek tenzoru napětí (normálová a smyková napětí)
- Výpočty trojosého stavu napjatosti

Nutná materiálová data [7]:

- **Poissonova konstanta**, **μ** – označuje poměr relativního prodloužení tyče k jejímu relativnímu příčnému zkrácení (zúžení při namáhání tahem)
- **Koeficient teplotní roztažnosti**, **α [K^{-1}]** popisuje jev, při kterém se po dodání/odebrání tepla tělesu (po zahřátí/ochlazení tělesa o určitou teplotu) změní délkové rozměry (objem) tělesa. Většina látek se při zahřívání rozpíná, to znamená, že jejich molekuly se pohybují rychleji a jejich rovnovážné polohy jsou dále od sebe
- **Modul pružnosti, E [MPa]** – je charakteristikou materiálu používanou při studiu pružnosti. Podle způsobu namáhání (zatížení) materiálu se rozlišuje na tři složky, ale pro simulace se používá hlavně modul pružnosti v tahu, tzv. Youngův modul

- **Deformační zpevnění materiálu, H [MPa]** – rozdíl napětí pro určitou hodnotu plastické deformace a mezí kluzu
- **Tahový diagram za různých teplot a fází** – viz obrázek 1 [6]



Obrázek 1 – Průběh tahových zkoušek pro materiál s nevýraznou mezí kluzu za různých teplot [6]

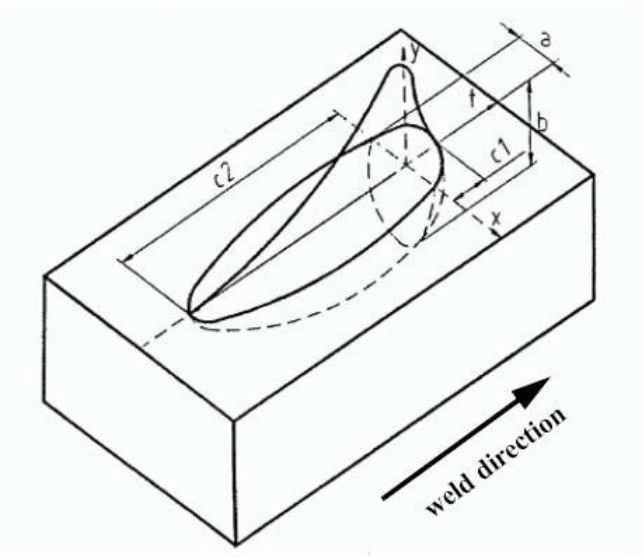
2.3.3 Definice a popis tvaru tepelného zdroje

Pro správný výpočet teplotních polí je důležitá charakteristika tvaru tepelného zdroje, včetně rozložení hustoty tepelného toku uvnitř zdroje. Důležitost správného popisu tepelného zdroje určuje i to, že teplotní pole z teplotně-metalurgické analýzy jsou základem pro další řešení. Charakteristiku zdroje tepla určují jednorozměrné, dvourozměrné a trojrozměrné modely. Nejkvalitnější výsledky dosahují trojrozměrné modely, byť jsou časově náročnější na výpočty.

Obecně se pro popis tepla využívají dva druhy popisu trojrozměrného tepelného pole vhodné pro různé metody svařovacího procesu.

- První možností, jak popsat model tepelného zdroje, je tzv. 3D Gaussián, stavějící na Gaussově rozložení tepla kolem tepelného zdroje [2].
- Druhou možností, jak lze popsat model tepelného zdroje, je Goldakův dvouelipsoidní model [2].

Goldakův model



Obrázek 2 – Goldakův dvojitý elipsoid [4]

Tlustá šipka na obrázku 6 udává směr svařování. Rozměry a, b, c1, c2 jsou charakteristické rozměry elipsoidu [2]. Geometrie Goldakova dvouelipsoidního modelu je taková, aby byla snadno použitelná pro různé druhy svařovacích zdrojů (svařování obloukem, laserem a elektronovým paprskem).

První část elipsoidu (c1) je tvořena jedním kvadrantem elipsoidu, druhá část elipsoidu (c2) je tvořena kvadrantem dalšího elipsoidu. Pro použití Goldakova modelu je nutné znát čtyři rozměry a, b, c1, c2 jež udávají velikost natavené oblasti. Rozměry a, b, c1, c2 jsou zjišťovány z experimentů a makrovýbrusů. Francis dále uvádí, že pokud nelze zjistit velikost rozměru z makrovýbrusu lze jako vzdálenost před zdrojem tepla vzít jednu polovinu šířky svaru a jako vzdálenost za zdrojem tepla dvojnásobek šířky svaru [2]:

Rovnice pro charakteristiku dvouelipsoidního modelu, jež udává hustotu tepelného toku do materiálu v přední a zadní části modelu tepelného zdroje je pro přední část modelu zdroje následující (2.3.3.1.) [2]:

$$q(x,y,z,t) = \frac{6\sqrt{3}f_1 Q}{abc_1\pi\sqrt{\pi}} \cdot e^{-3\frac{x^2}{a^2}} \cdot e^{-3\frac{y^2}{b^2}} \cdot e^{-3\frac{z^2}{c_1^2}} \qquad (2.3.3.1)$$

a pro zadní část modelu (2.3.3.2) [2]:

$$q(x,y,z,t) = \frac{6\sqrt{3}f_2 Q}{abc_1\pi\sqrt{\pi}} \cdot e^{-3\frac{x^2}{a^2}} \cdot e^{-3\frac{y^2}{b^2}} \cdot e^{-3\frac{z^2}{c_2^2}} \qquad (2.3.3.2)$$

kde: q [W.m^{-3}] – hustota tepelného výkonu

$f_{1,2}$ – podíl tepla uloženého v přední a zadní části zdroje s předpokladem, že $f_1+f_2=2$

a,b,c_1,c_2 – charakteristické rozměry dvouelipsoidu

Q [W] – tepelný výkon zdroje, pro který platí $Q = \eta \cdot U \cdot I$

kde: U [V] – napětí elektrického oblouku
I [A] – elektrický proud protékající obloukem
η – účinnost přenosu tepelného výkonu zdroje do základního materiálu

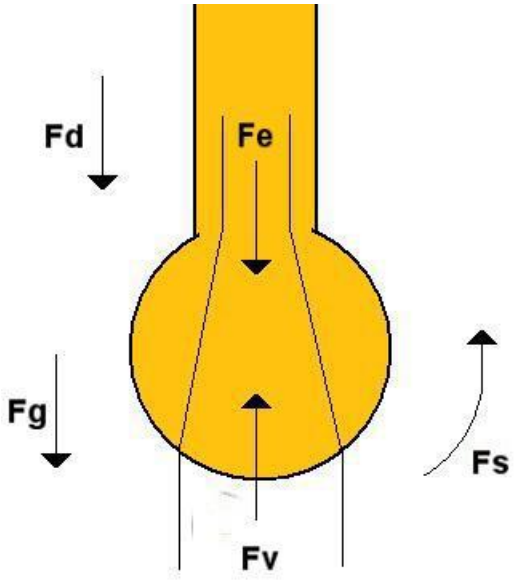
Tento model ovlivňují především nastavení teplotního zdroje, ale také ho reálně ovlivňují fyzikální děje při přenosu svarového kovu do lázně. V tomto procesu se přídavný materiál odtavuje z elektrody ve formě kapek, které jsou ovlivněny působením fyzikálních sil. Přičemž velikost, směr a výslednice sil jsou ovlivněny především tvarem, velikostí a frekvencí kapek materiálu elektrody, proudovou hustotou, polaritou. Tyto síly jsou definovány těmito faktory [1,3]:

- *Fyzikálními vlastnostmi roztaveného kovu* – povrchové napětí, viskozita, teplota tavení, bod varu
- *Technologickými parametry* – proud, napětí, proudová hustota, průměr elektrody a polarita
- *Vlastnosti okolní atmosféry* – teplota, tepelná vodivost, chemické reakce mezi elektrodou a okolní atmosférou [8]

Při svařování nízkými proudy dochází k tvorbě velkých kapek s pomalejší frekvencí oddělování, naopak u vysokých proudů se tvoří kapky malé, ale s rychle oddělujícími se kapkami od elektrody. Síly působící na vytvářející se kapku materiálu jsou při odtržení kapky ve stavu statické rovnováhy (obr.3) a mohou se vyjádřit pomocí rovnice (2.3.3.3) [8]:

$$F_g + F_e + F_d = F_v + F_s \qquad (2.3.3.3)$$

Síly mající příznivý vliv na oddělení kapky od elektrody (působící ve směru oddělení kapky) tvoří levou část rovnice. Tedy síla gravitační F_g, síla hydrodynamická F_d a síla elektromagnetická F_e. V pravé části rovnice jsou pak síly působící proti směru oddělení kapky – síla vyvolaná tlakem kovových par F_v a síla povrchového napětí F_s [8].



Obrázek 3- Statická rovnováha sil v momentě oddělení kapky materiálu [8]

Gravitační síla - Fg

Gravitační síla má pozitivní vliv na odtržení kapky od elektrody. Vliv této síly je malý a nejvíce ovlivňuje kapku při svařování v polohách (nad hlavou nebo při svařování od shora dolu) nebo při svařování nízkými proudy, když jsou elektromagnetické síly minimální. Tuto sílu je možné vyjádřit tímto vztahem (2.3.3.4) [9]:

$$F_g = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot \rho \cdot g \text{ [3]} \quad (2.3.3.4)$$

kde: π [-] – Ludolfovo číslo (3,14159265)

r [m] – poloměr kapky

ρ [kg.m^{-3}] – hustota kapky

g [m.s^{-2}] – gravitační zrychlení

Hydrodynamická síla - Fd

Hydrodynamická síla (někdy též nazývaná síla způsobená tlakem proudící ochranné atmosféry), která se často zanedbává, se objevuje hlavně za vysokých hodnot proudové hustoty (např: sprchový přenos), kdy proud plazmy dosahuje rychlostí až 100m.s-1 a podporuje oddělení i rychlejší pohyb kapky od elektrody do svarové lázně. Pomocí tlaku proudu ochranné atmosféry se zvyšuje/snižuje vliv hydrodynamické síly. Je možné ji vyjádřit touto rovnicí (2.3.3.5) [8]:

$$F_d = 0{,}5 \cdot \pi \cdot v^2 \cdot \rho \cdot r^2 \cdot C_d \quad (2.3.3.5)$$

kde: F_d [N] – hydrodynamická síla

π [-] – Ludolfovo číslo (3,14159265)

V [m.s^{-1}] – rychlost proudění plynu

ρ [kg.m^{-3}] – hustota kapky

r [m] – poloměr kapky

C_d [-] – koeficient zohledňující proudění plynu

Síla vyvolaná tlakem kovových par - Fv

Tato síla vzniká při unikání kovových par z natavené kapky a jejich průnikem do plazmy tvoří reaktivní sílu, která působí proti oddělení kapky od elektrody. Tato síla má velký význam pouze u svařování vysokým proudem a je vyjádřena takto (2.3.3.6) [9]:

$$F_v = \frac{m'}{\rho_v} \cdot I \quad (2.3.3.6)$$

kde: F_v [N] – síla vyvolaná tlakem kovových par

m´ [kg] – celková hmotnost vypařených par za sekundu

ρ_v [kg.m^{-3}] – hustota kovových par

I [A] – svařovací proud

Elektromagnetická síla - Fe

Elektromagnetická síla má pozitivní vliv na směr oddělování kapek od elektrody do základního materiálu. Nejvýznamněji se projeví při sváření v poloze nad hlavou nebo zespodu nahoru. Tvoří ji proud tekoucí mezi elektrodou a základním materiálem, což generuje magnetické pole. Výsledkem magnetického pole je výskyt tzv. Lorentzových sil, které mají radiální i axiální směr. Zmenšování průřezu kapky vzniká působením radiálního tlaku magnetického pole, až vyvolá oddělení kapky svar. materiálu od elektrody. Tento jev se nazývá pinch-efekt. Tlak je dán vztahem (2.3.3.7) [9]:

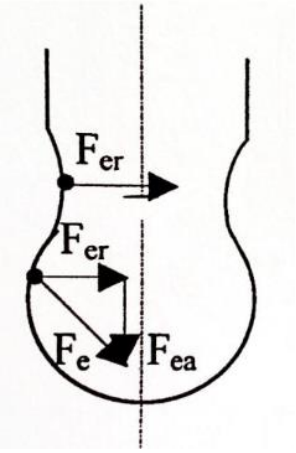
$$p = \frac{I^2 \cdot (x^2 - r)}{100 \cdot \pi \cdot x^2} \qquad (2.3.3.7)$$

kde: p [bar] – velikost tlaku

I [A] – velikost svařovacího proudu

r [m] – poloměr elektrody

x [m] – vzdálenost od osy elektrody

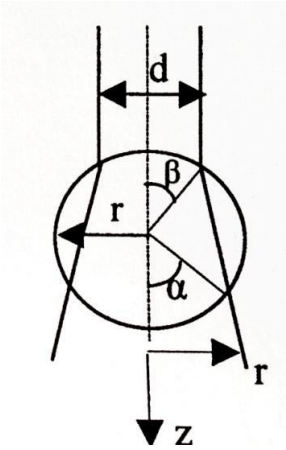


Obrázek 4- Působení elektromagnetických sil [9]

V místě zúžení elektrody se vyskytuje pouze radiální elektromagnetická síla F_{er}, která působí v kolmém směru na osu elektrody. Axiální síla F_{ea} má v tomto místě nulovou hodnotu (obr. 4) [9].

Od zúžení elektrody už není průchod proudu rovnoběžný, proto zde vzniká jak radiální tak axiální složka elektromagnetické síly. Axiální složka se navíc pomáhá při přenosu kapky do svarové lázně [9].

Průměr anodové skvrny (oblast dopadu elektrického proudu na svařovaný povrch) není stejný jako průměr elektrody. Elektrický proud se tedy buď rozšiřuje anebo zužuje. Elektromagnetickou sílu je pak možno vyjádřit vztahem (2.3.3.8) [9]:



Obrázek 5 - Průchod proudu kapkou elektrody [9]

$$\vec{F}_e = \vec{J} \times \vec{B} \text{ [3]} \qquad (2.3.3.8)$$

kde: $\vec{J}$ – vektor proudové hustoty

$\vec{B}$ – vektor magnetické indukce, jenž je uplatňován v rámci celého objemu tekutého kovu.

Vyjádření radiální (F_{er}) a axiální (F_{ez}) složky elektromagnetické síly F_e ve válcovém souřadném systému (r, φ, z) vypadá následovně (2.3.3.9) [9]

$$(f_e)_r = -j_z \cdot B_\varphi$$
$$(f_e)_z = +j_r \cdot B_\varphi \quad \text{[3]} \qquad (2.3.3.9)$$

Pokud se bude předpokládat tvar kapky kulový (sférický) s proudovou hustotou stejnosměrně prostorově uloženou, tak elektromagnetická síla, která působí na kapku, bude integrál hodnoty axiální složky síly z celkového objemu kapky. Tuto axiální složku elektromagnetické síly lze vyjádřit touto rovnicí (2.3.3.10) [9]:

$$F_e = \frac{\mu \cdot I^2}{4\pi} \cdot ln\frac{d_a}{d} \qquad (2.3.3.10)$$

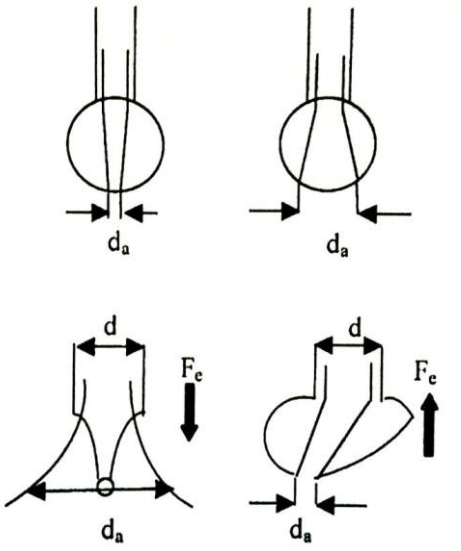
kde: I [A] – svařovací proud

d [m] – průměr elektrody

d_a [m] – průměr sloupce oblouku

μ [N.A^{-2}] – permeabilita

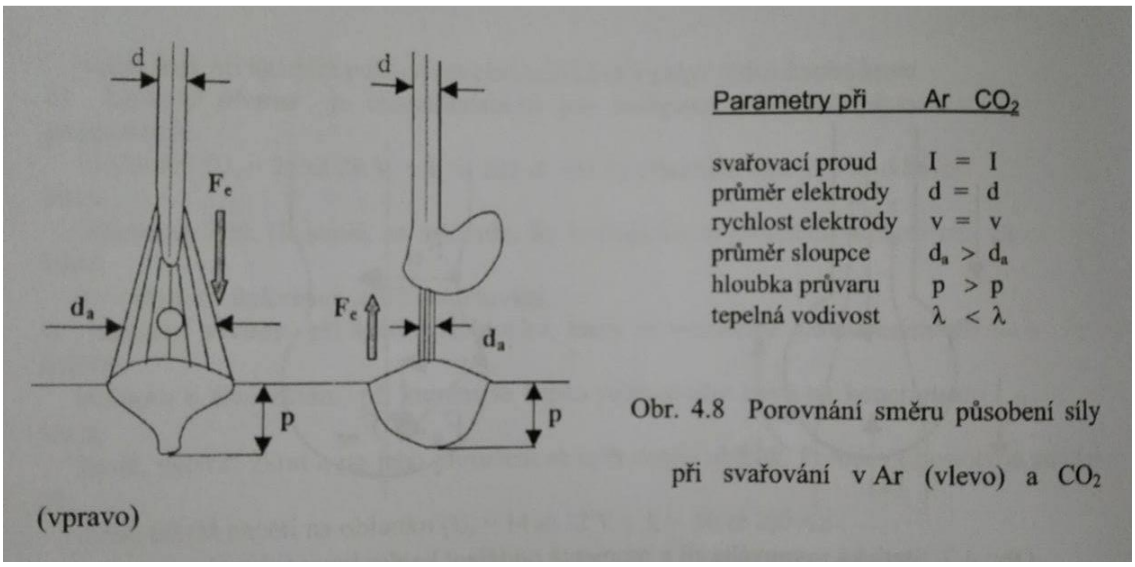
Z této rovnice a z obrázku tedy vyplývá, že Fe může mít zápornou nebo kladnou hodnotu podle poměru Da a d. Při svařování v ochranné atmosféře tvořené CO2 s vysokou tepelnou vodivostí dochází k zúžení průměru sloupce oblouku ($d > d_a$). Elektromagnetická síla působí proti oddělení kapky svar. materiálu a označuje se jako negativní [9].



Obrázek 6 - Možné směry působení elektromagnetické síly Fe [9]

Při svařování v ochranných atmosférách obsahujících argon, dochází kvůli nízké tepelné vodivosti v široký sloupec oblouku ($d < d_a$). Elektromagnetická síla F_e odtrhuje kapku svar. materiálu a označuje se jako pozitivní. Hlavní představitel této situace je sprchový přenos [9].

Na obrázku 7 je vyobrazena změna elektromagnetické síly při použití buď argonu, nebo oxidu uhličitého.



Obrázek 7 - Porovnání směru působení síly při svařování v argonu (vlevo) a oxidu uhličitého (vpravo) [8]

Síla povrchového napětí - Fs

Tato síla formuje kapku svar. materiálu do tvaru koule a dále se jí snaží udržet na konci elektrody, tedy působí proti odtrhnutí kapky. Síla povrchového napětí je celkem vysoká hlavně při užití nízkých proudů, ale s vyššími proudy a teplotou postupně klesá. Pozitivní vliv na sílu povrchového napětí mají i tzv. aktivní prvky obsažené v elektrodě. Jsou to kyslík, síra, selen, uhlík, hliník, dusík a fosfor. Tato síla se vyjadřuje vztahem (2.3.3.11) [9]:

$$F_s = \frac{m \cdot g}{1 - 0{,}4 \cdot \frac{r}{a}} \qquad (2.3.3.11)$$

kde: m [kg] – hmotnost kapky

g [m.s^{-2}] – gravitační zrychlení

r [m] – poloměr elektrody

a – kapilární konstanta = $\left(\frac{2 \cdot \gamma}{\rho_m \cdot g}\right)^{\frac{1}{2}}$

ρ_m [kg.m^{-3}] – hustota tekuté kapky

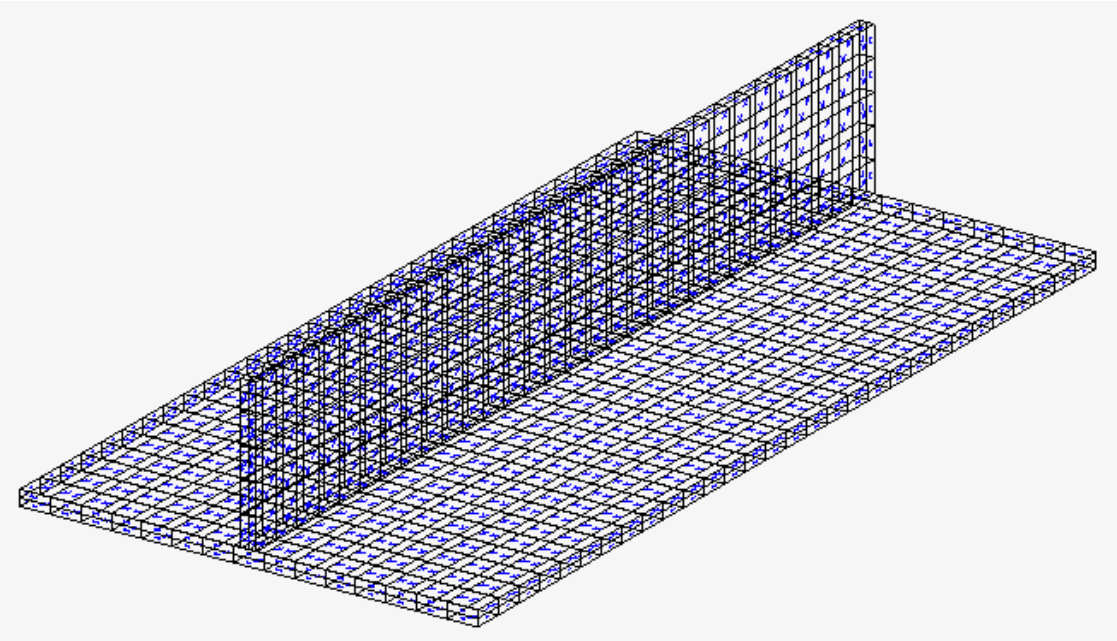
Působením těchto sil dochází k odtržení kapky svar. materiálu z elektrody podle použitých podmínek svařování. Přičemž síla hydrodynamická a elektromagnetická má velký vliv zejména při vysokých hodnotách proudové hustoty a proudů. Síla povrchového napětí je malá a tedy způsobuje oddělování menších kapek. Zatímco za nízkých hodnot proudové hustoty přebírá hlavní význam síla povrchového napětí, která vytváří velké pomalu se oddělující kapky od elektrody. Síly hydrodynamické a elektromagnetické jsou minimální [8].

Simulační software Simufact.welding však fyzikální jevy přenosu hmoty nezahrnuje do svého výpočtu. Jelikož v celkovém pojetí svařence jsou tyto děje zanedbatelné.

2.3.4 Prostorový model

Teplotně-metalurgickou a mechanickou analýzu nelze spustit bez prostorového modelu.

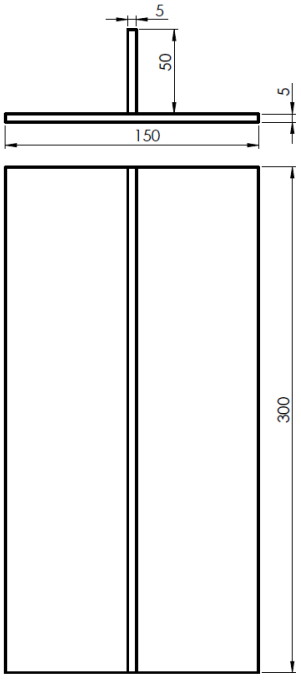
Prostorový model tvoří prostorové a povrchové 3D elementy a uzlové body. Velikost elementů je charakterizována vzdáleností hraničních uzlových bodů. Hustota uzlových bodů je dána zvolenou podrobností jednotlivých částí svařence. Nejdůležitější je oblast svaru a teplotně ovlivněná oblast. Z tohoto důvodu je hustota uzlových bodů v této části nejvyšší a směrem od těchto oblastí se bude hustota snižovat. Celkový výpočet závisí na počtu elementu a uzlových bodů [10].



Obrázek 8 – Příklad prostorového modelu koutového svaru pro metodu konečných prvků [10]

3 Experiment

Následně byl proveden experiment, na kterém si ověříme správnost simulace s reálným experimentem. Pro tento experiment bylo zvoleno, že desky, které se k sobě budou přivařovat, budou mít rozměry podle obrázku 9. Parametry svařovacího zdroje -180 A, 21,5 V, a rychlost svařování 40 cm/min. Počáteční teplota desek 30 °C (ohřev od stolu). Teplota okolního vzduchu 25 °C. Jako materiál desek i přídavného drátu byla použita ocel S235. Tyto desky a parametry byly použity pro oba experimenty.Pro porovnání byly vybrány tři roviny (3cm od konců svařence a prostředek svařence).



Obrázek 9 - Rozměry desek

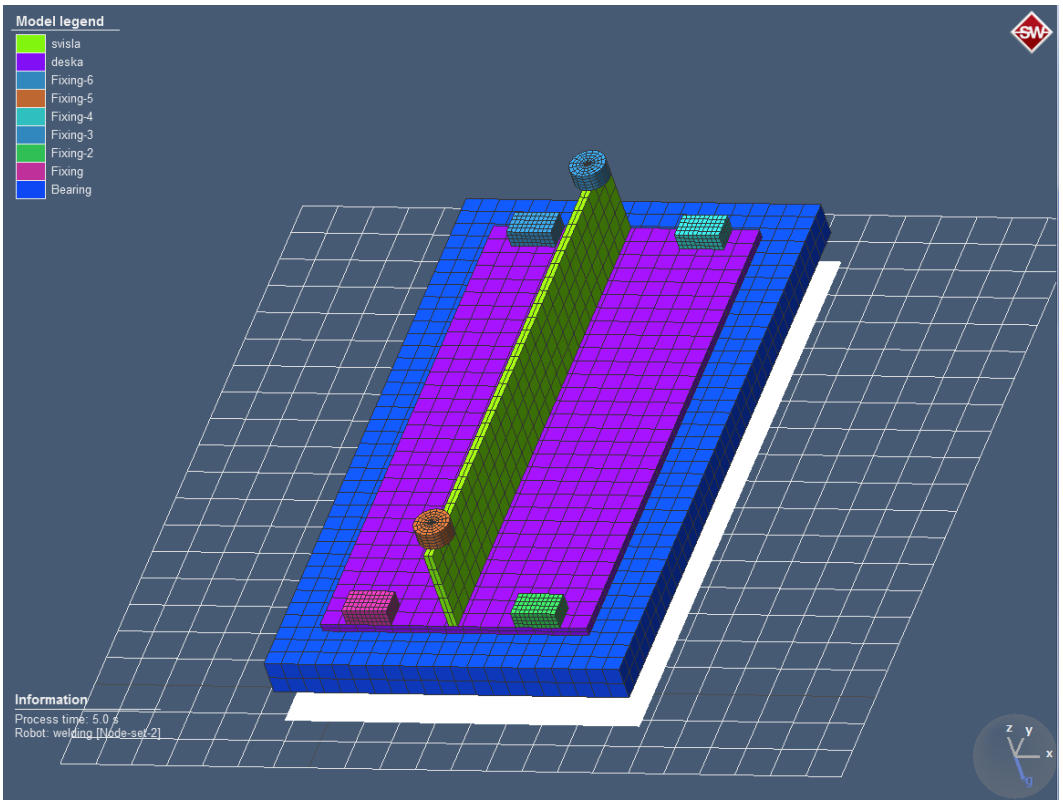
3.1 Nasimulování vzorků

Simulační experiment probíhal v Brně v prostorách firmy MSC.Software s.r.o. v programu Simufact.welding. Tento nedávno vytvořený software byl vybrán pro svou jednoduchost ovládání a příjemnému uživatelskému prostředí. Vzhledem k tomu, že byla měřena především teplota a deformace, nevadilo, že software nepočítá s fyzikálními ději přenosu hmoty, jelikož tím sledovaný výsledek simulace nebude téměř ovlivněn.

Nejprve bylo zapotřebí nakreslit tyto desky ve formátu bdf (zasíťovaný model), který je pro simulační softwary svařování základním formátem. K připravení souborů s touto příponou bylo použito softwaru MAC MENTAT 2016, ve kterém po nakreslení desek proběhlo zasíťování – rozdělení desek na 3D elementy a uzlové body (obrázek 8).

3.1.1 Upnutý model

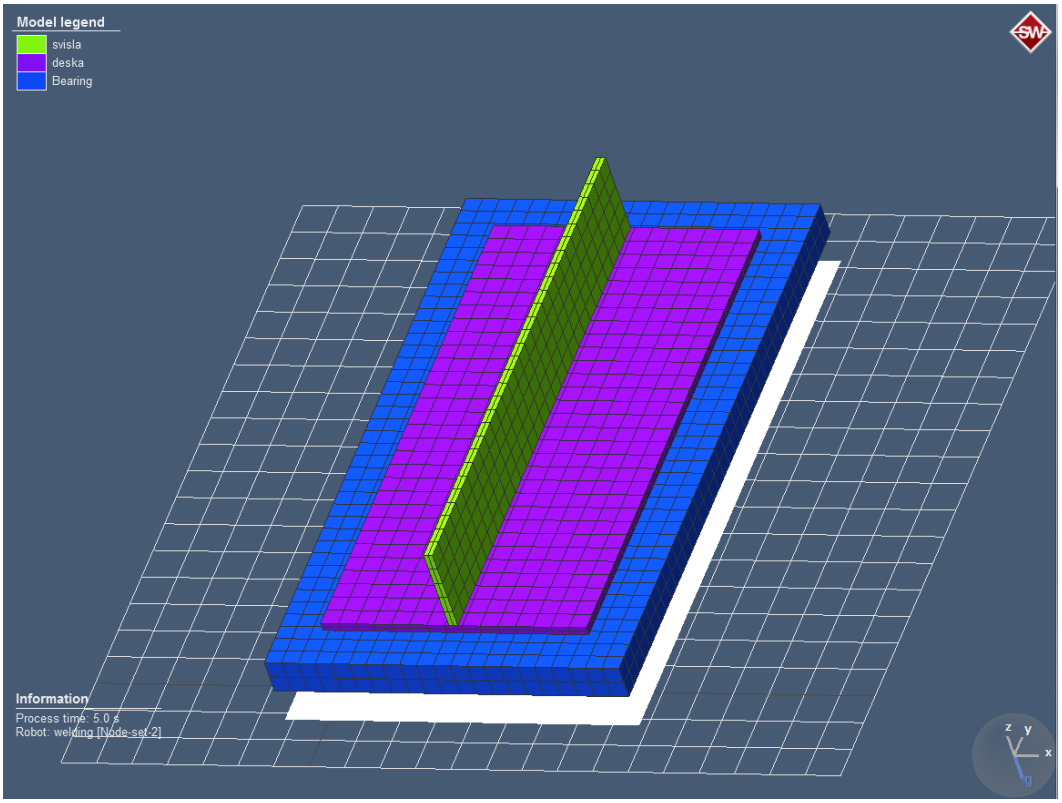
Poté bylo možné přejít do simulačního softwaru, kde se provedlo upnutí. Následně po nastavení parametrů experimentu mohla být spuštěna simulace.



Obrázek 10 - Upnutý model experimentu

3.1.2 Neupnutý model

Tato simulace se provedla bez upnutí, jinak se stejnými nastaveními jako u upnutého svařence.



Obrázek 11 - Neupnutý model experimentu

3.2 Reálné svaření vzorků

Tato část experimentu probíhala v laboratoři výuky svářečských technologií na ČVUT v Praze. Pro co nejpřesnější měření byl pro svařování vybrán svařovací robot MIGATRONIC s otáčecím stolem. Přehled pracoviště je na obrázku 13.

Teplota byla ve třech bodech měřena termočlánky napojenými na měřící stanici ALMEMO. Teplota svaru byla ještě navíc pro kontrolu měřena pomocí termokamery. Termokamera musí měřit teplotu při zastíněném oblouku, jinak by mohlo dojít k poškození čočky. Proto byl vzorek natáčen z druhé strany, než probíhalo svařování (obrázek 14).

Termočlánek 1 = 7 mm od koutu svaru v polovině svaru.
Termočlánek 2 = 5 mm od kolmé desky os svaru
Termočlánek 3 = 10 mm od koutu svaru v polovině svaru
(viz obrázek 15)

Desky byly nastříhány z materiálu S 235 na požadované rozměry dle výkresu 1. Následně otryskány pro dosažení hrubého povrchu, jelikož lesklý povrch není vhodný pro natáčení termokamerou. Kvůli nedostatečnému množství číselníkových úchylkoměrů (obrázek 15), jsou měřeny pouze dva body, kde podle simulací má dojít k téměř největší deformaci. Pro ochranu před prskáním od elektrického oblouku byly zakryty nehořlavým papírem.

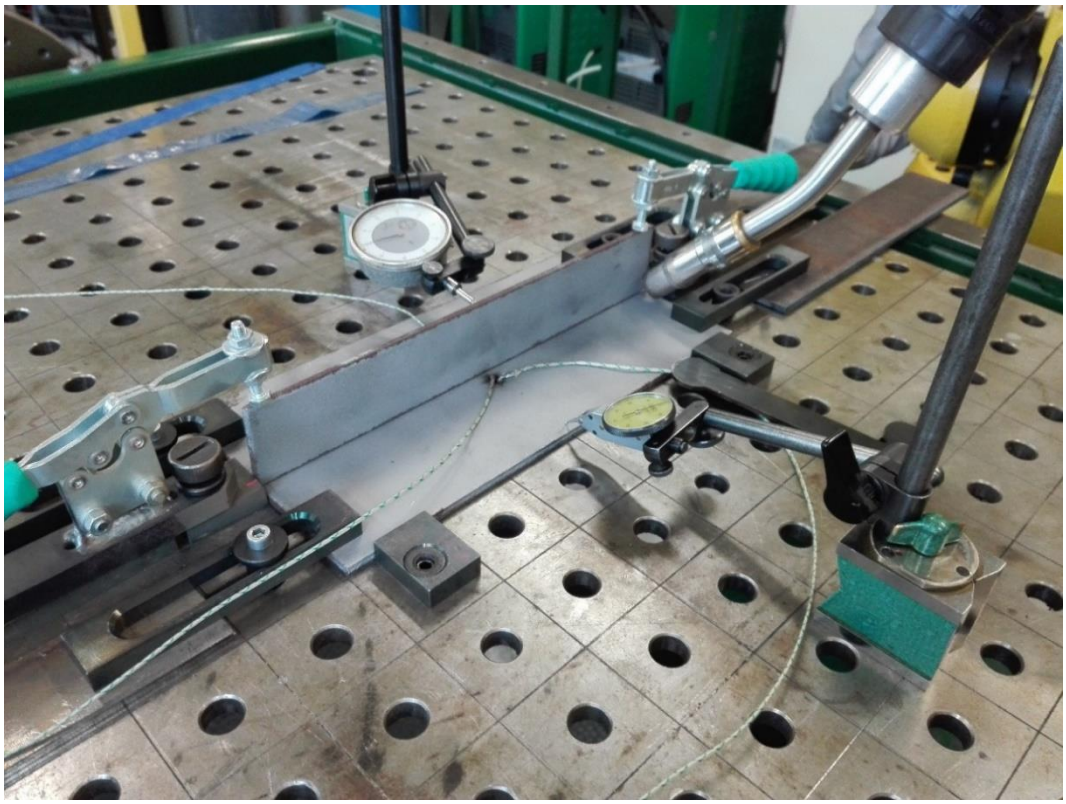
Obrázek 12 - Přehled pracoviště pro experiment 1

Úchylkoměr 1 – 5 mm od hrany kolmé desky, kvůli dráze robota byl měřen z druhé strany desky a následně odečítán

Úchylkoměr 2 – 5mm od hrany ležící desky

3.2.1 Upnutý svařenec

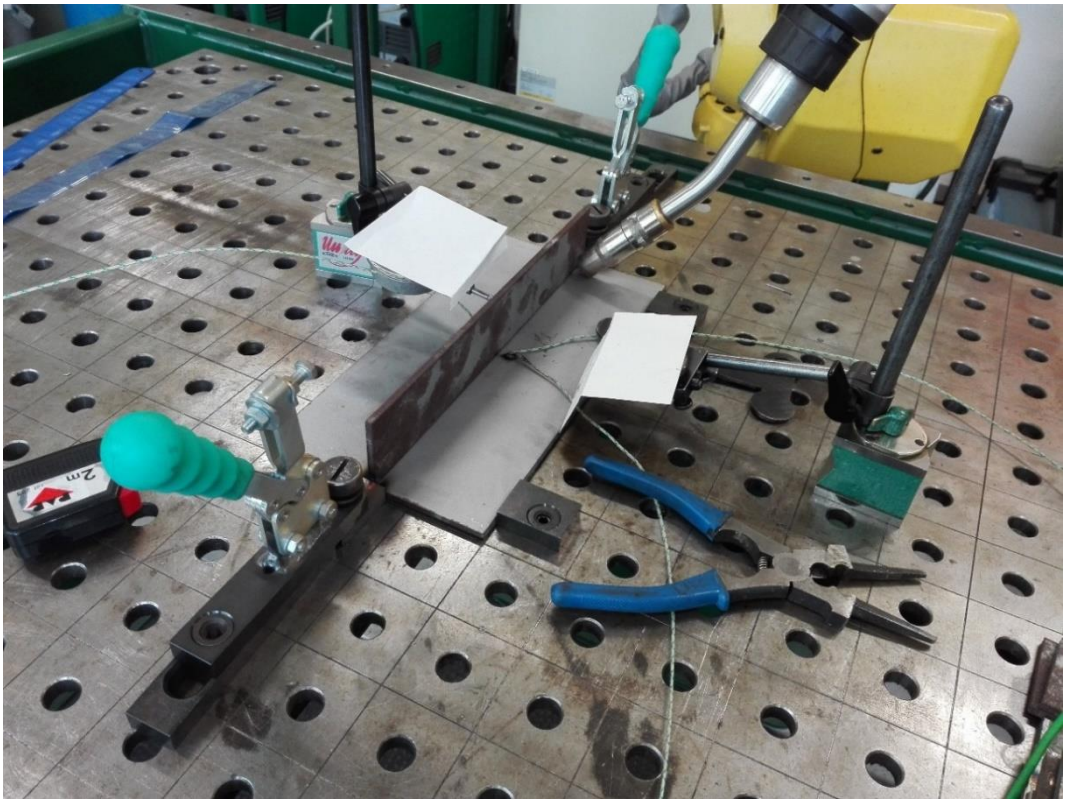
Rozložení upnutého svaru na pracovišti můžeme vidět na obrázku. Desky byly upnuty do přípravků a poté byl spuštěn svařovací robot.



Obrázek 13 - Upnutý svařenec

3.2.2 Neupnutý svařenec

Pro tuto část experimentu musely být desky k sobě přibodnuty, jinak by nebylo možné tento experiment provést.



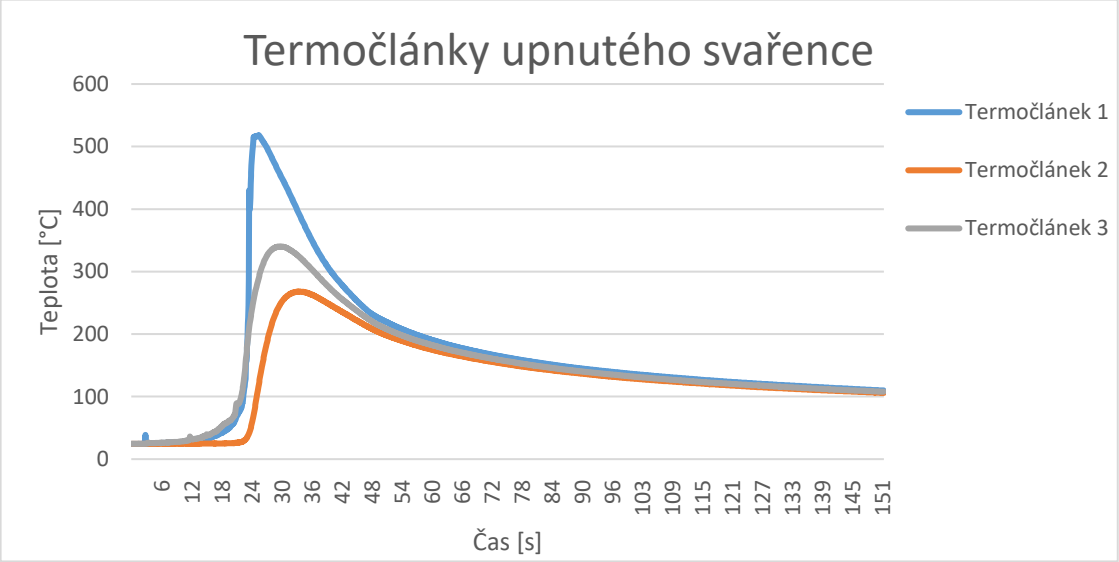
Obrázek 14 - Neupnutý svařenec

3.3 Porovnání výsledků

3.3.1 Teplota

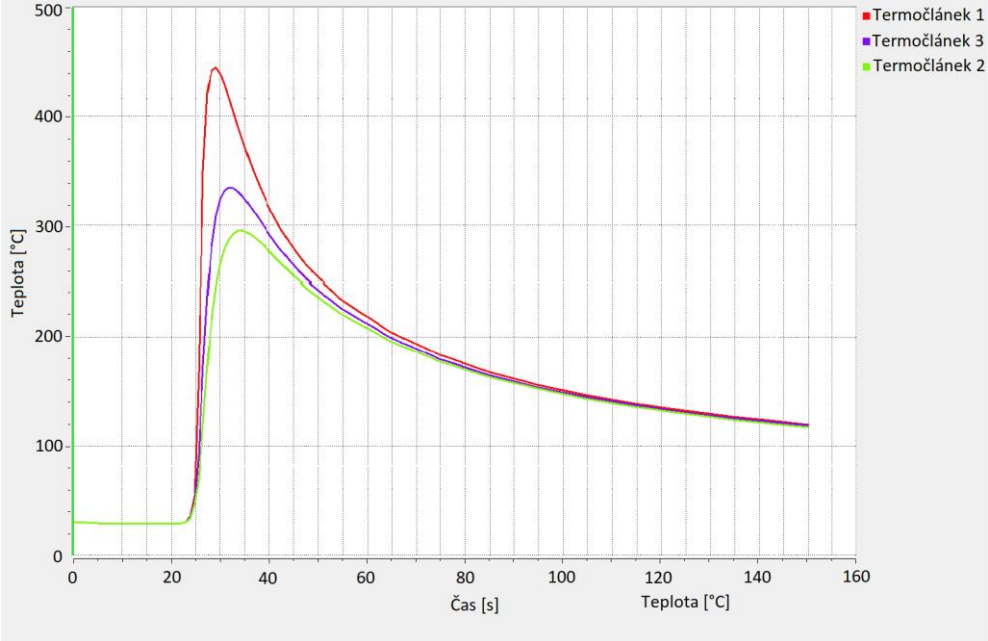
Z následujícího grafu můžeme vidět průběh teplot v místě termočlánku od počátku svařování až do skončení simulace (150 s).

Termočlánky upnutého svařence



Graf 1 – Termočlánky upnutého modelu

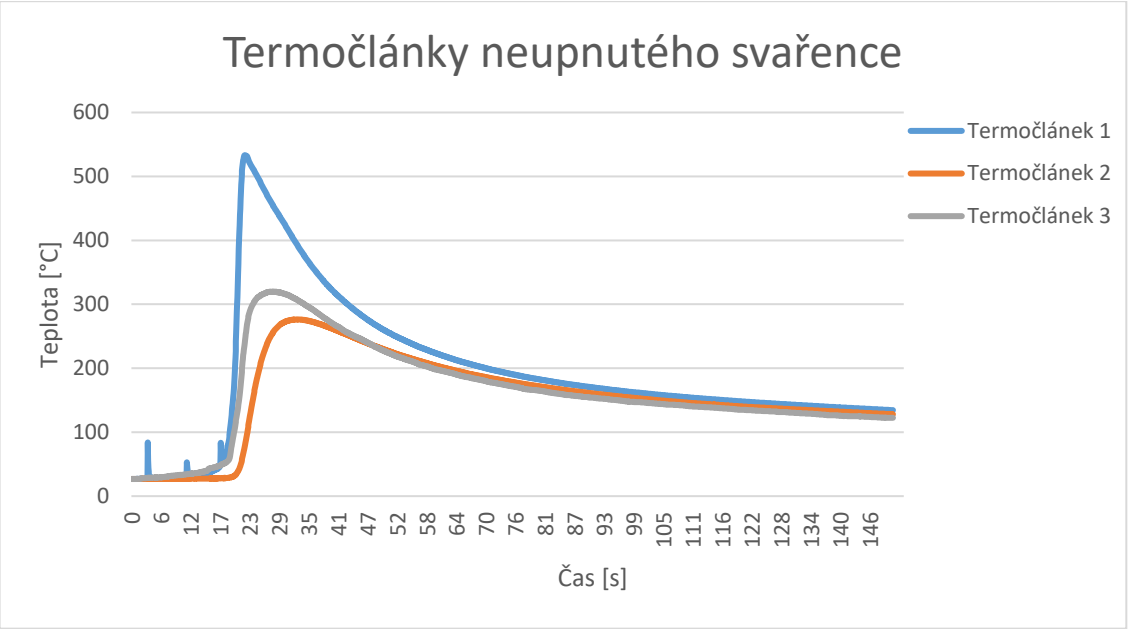
Upnutý model



Graf 2 - Průběh teplot v bodech termočlánků u upnutého modelu

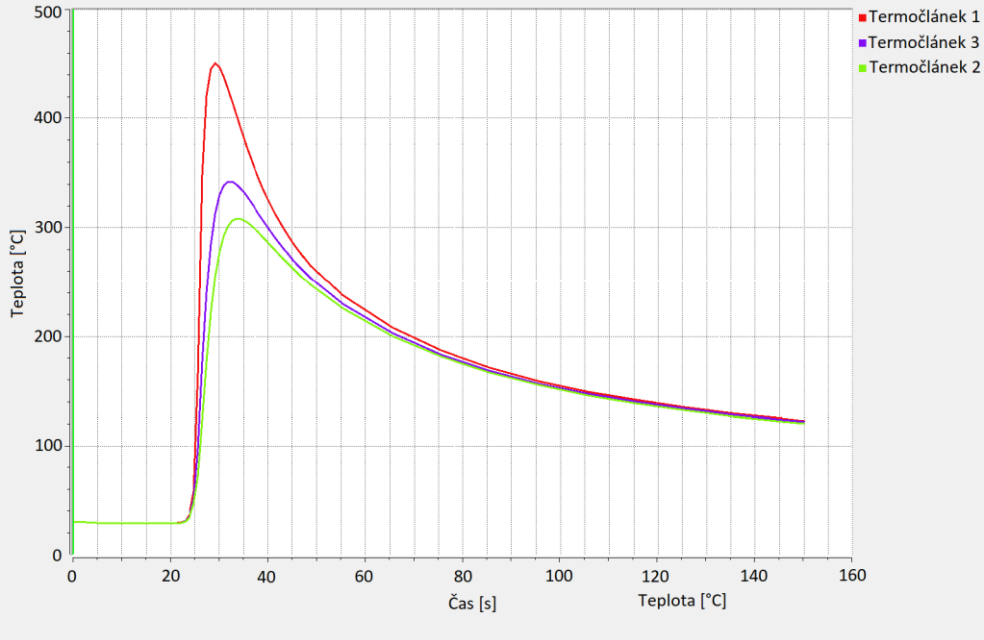
Z těchto grafů je vidět, že se hodnota prvního termočlánku liší přibližně 90 °C. Ale termočlánek 2 a 3 má již odchylku v řádu jednotek °C. Je tedy možné říci, že velká odchylka prvního termočlánku byla způsobena jeho nepřesným umístěním. Shrnutím tohoto měření je, že průběhy teplot v simulaci tedy odpovídají termočlánkům.

Termočlánky neupnutého svařence



Graf 3 - Termočlánky neupnutého svařence

Neupnutý model



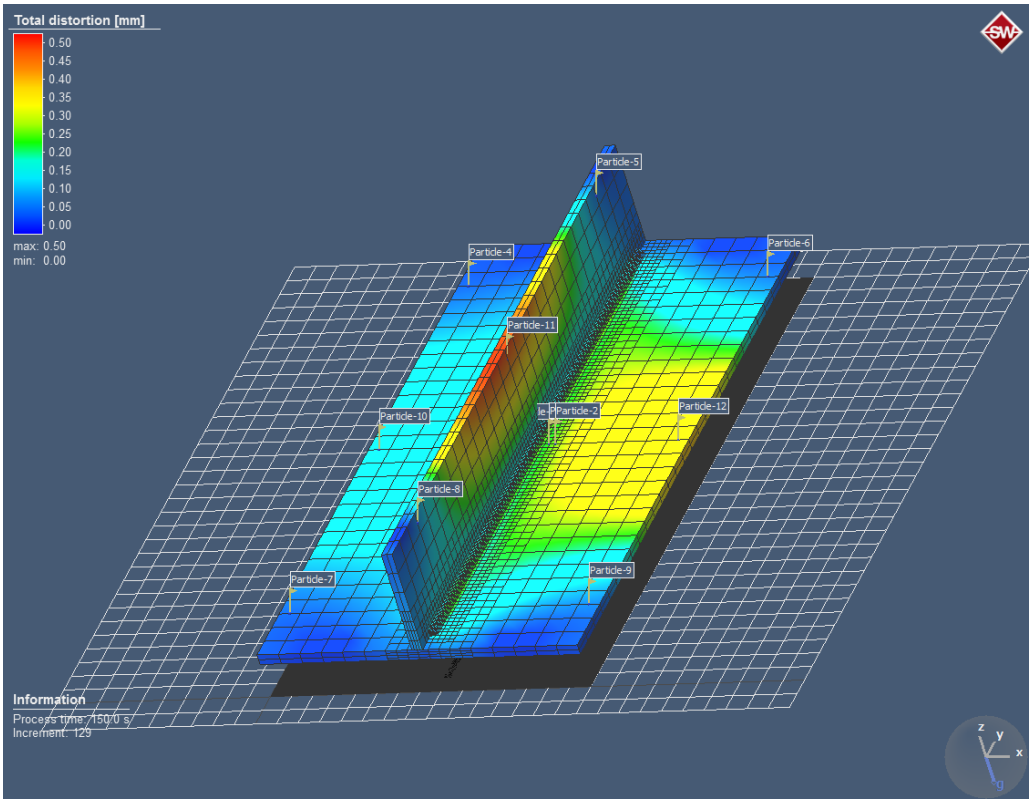
Graf 4 – Průběh teplot v bodech termočlánků u neupnutého modelu

V těchto grafech je vidět odchylka prvního termočlánku také téměř o 90 °C. Termočlánek 2 a 3 je zhruba o 10 °C. To bude nejspíše způsobeno nepřesným připevněním termočlánků. V souboru z video kamery je patrné, že každá desetina milimetru výsledky velmi ovlivní. Zajímavé také je, že v simulaci nám teploty pro oba modely vyšly rozdílné teploty (přibližně o 6 až 10 °C méně než u upnutého modelu). V praktické části se teploty také lišily. Termočlánek 2 má také u neupnutého modelu nižší hodnotu, termočlánky 1 a 3 jsou však trochu vyšší.

3.3.2 Deformace

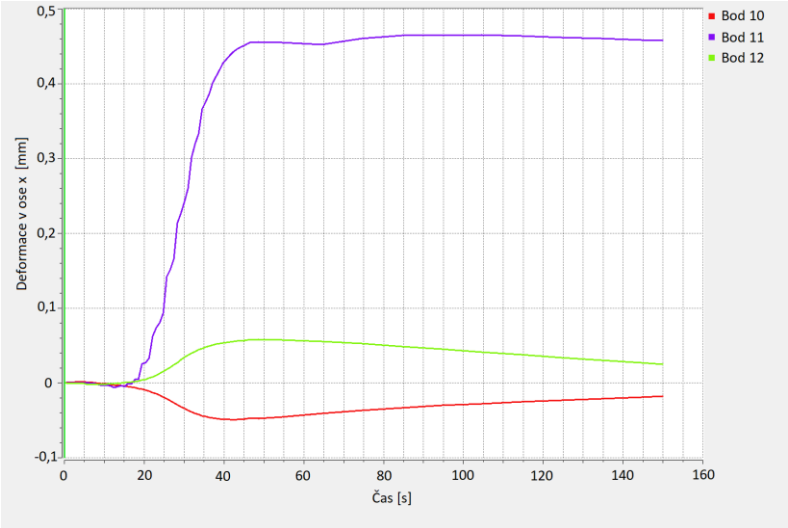
Reálné měření probíhalo na bodech 11 (deformace ve směru x) a 12 (deformace ve směru z) viz obrázek17

Upnutý vzorek - umístění bodů



Obrázek 15 - Celkové deformace upnutého svařence s řešenými body

Deformace ve směru x v bodě 11:



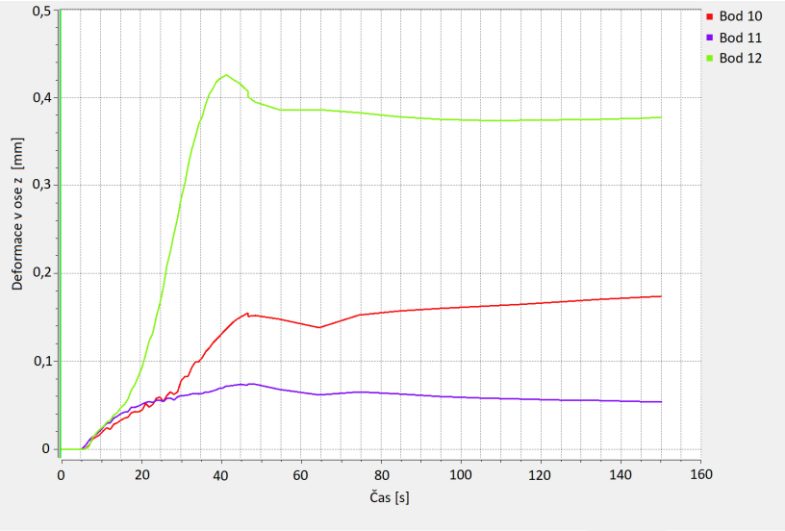
Graf 5 - Průběh deformací v ose x

Simulované body: 0,46 mm

Naměřené hodnoty: 0,23 mm

Odchylka od simulace: −0,23 mm

Deformace ve směru z v bodě 12:



Graf 6 - Průběh deformací v ose z

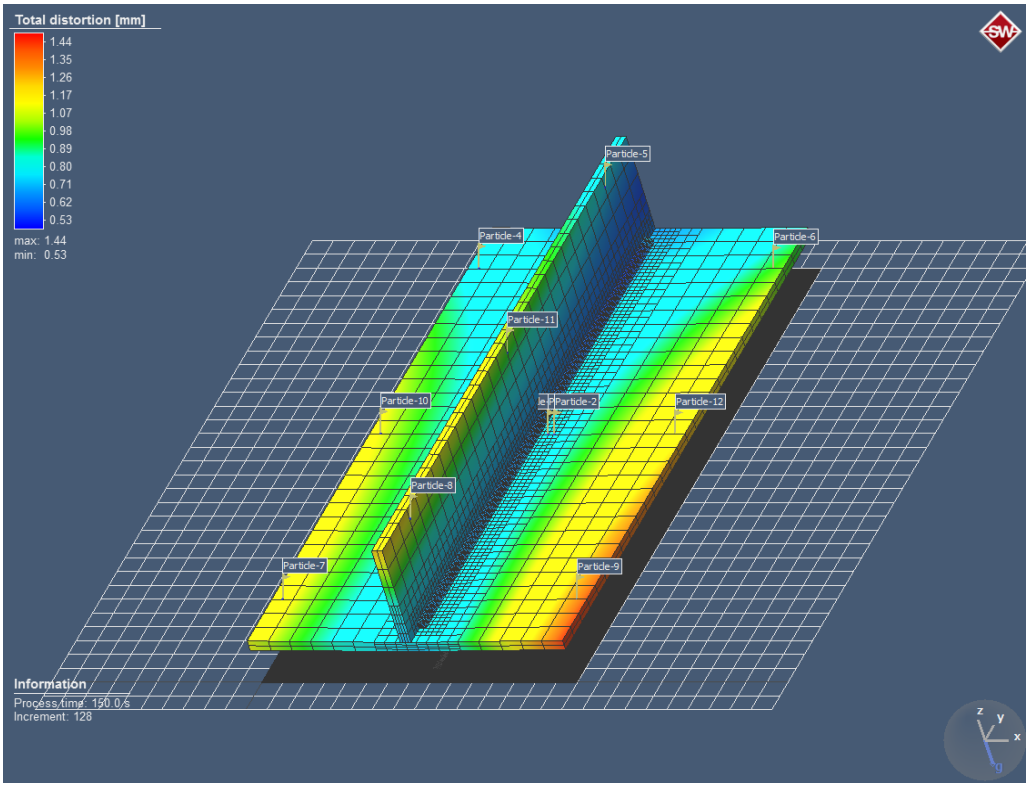
Simulované body: 0,38 mm

Naměřené hodnoty: 0,65 mm

Odchylka od simulace: +0,27 mm

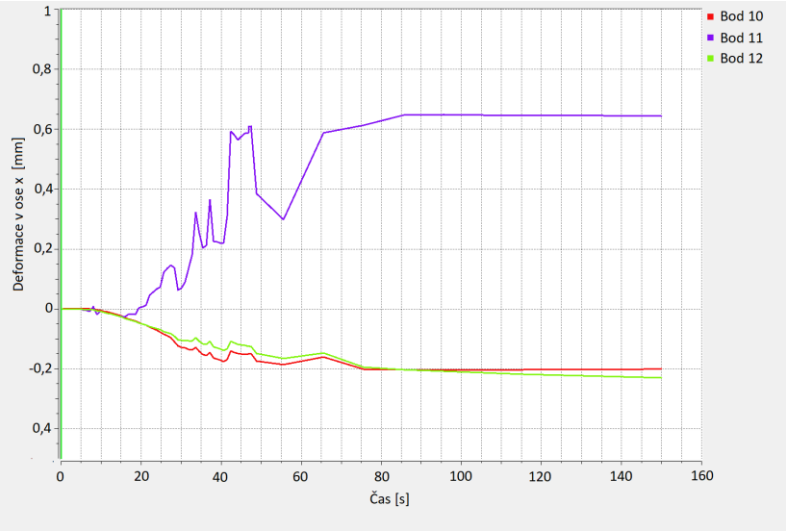
U upnutého modelu se nám hodnoty deformací liší až o polovinu nasimulované hodnoty. Ale vzhledem k tomu, že model neupnutý má hodnoty téměř stejné, je možné předpokládat, že chyba byla způsobená silou upnutí, která měřena nebyla, a v simulaci bylo nastavené pevné upnutí.

Neupnutý vzorek - umístění bodů



Obrázek 16 - Celkové deformace neupnutého svařence s řešenými body

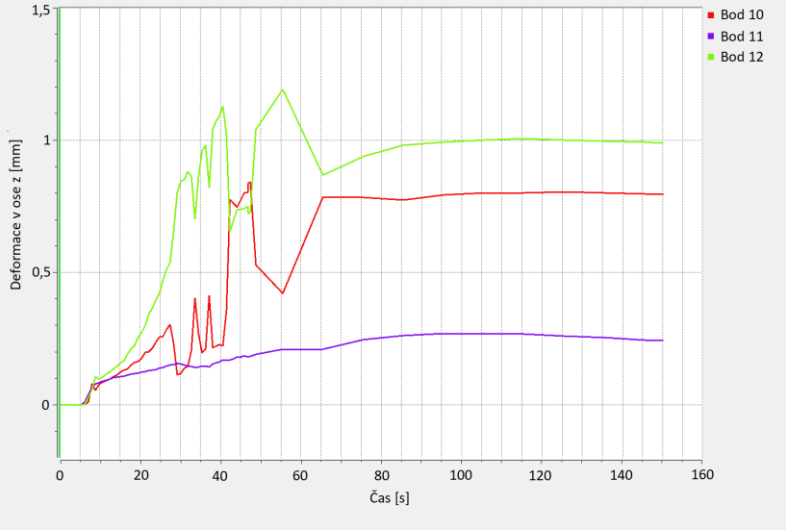
Deformace ve směru x v bodě 11:



Graf 7 - Průběh deformací v ose x

Simulované body: 0,65 mm
Naměřené hodnoty: 0,52 mm
Odchylka od simulace: −0,13 mm

Deformace ve směru z v bodě 12:



Graf 8 - Průběh deformací v ose z

Simulované body: 0,99 mm
Naměřené hodnoty: 1,02 mm
Odchylka od simulace: +0,03 mm

U neupnutého svařence nám simulace s experimentem jsou téměř stejné. Z těchto výsledků je tedy možné říci, že simulace svařenci opravdu odpovídají. U těchto průběhů jsou zajímavé vysoké skoky deformací, ale to bude zřejmě způsobeno průběhem simulace na elementech a především jejich pohyby.

4 Závěrečné zhodnocení experimentu

Cílem této bakalářské práce bylo porovnat technickou simulaci svařování s reálným svařováním a následně posoudit zda jsou simulace schopné správně vyhodnotit daný svařenec. Simulace jsou totiž ve strojírenském odvětví stále rozšířenější a to především díky automobilovému průmyslu a také rychleji řešit projekty a šetřit peníze.

Co se týče teplotní analýzy, je možné z grafů, vytvořených při experimentu, vidět, že odchylka prvního termočlánku je vyšší skoro o 90 °C. Termočlánky 2 a 3 mají odchylku nižší (do okolo 10 °C). Jak už bylo řečeno, vzhledem k tomu, jak s každou desetinou milimetru blíže ke svaru hodnoty teplot rychleji narůstají, bude to způsobeno nejspíše nepřesnou polohou termočlánku, jelikož v porovnání míst s kamerou byly hodnoty v daných místech blíže termočlánkům.

Deformace vycházející z mechanické analýzy jsou závislé na teplotně-metalurgické analýze. Tedy pokud by byly teploty velmi rozdílné, neměly by nám ani vycházet simulací předpovězené deformace.

Deformace u upnutého svaru jsou celkem rozdílné oproti těm nasimulovaným. V bodě 11 mají skoro o polovinu menší průběh než je na simulaci. V bodě 12 se jedná téměř o poloviční nárůst oproti deformaci. Jelikož při experimentu síla upnutí nebyla měřena a u simulace byla nastavená na plné upnutí, je velice možné, že chyby budou vneseny silou upnutí.

Deformace u neupnutého svaru, však svým simulacím téměř odpovídají. V bodě 11 je odchylka reálného experimentu od simulace jen 0,13 mm a v bodě 12 dokonce pouze 0,03 mm. Tedy tuto část experimentu je možné hodnotit jako velice úspěšnou.

Při celkovém shrnutí výsledků je patrné, že kdyby se experiment prováděl s opravdovou přesností, byly by hodnoty určitě bližší. I tak je hodnocení experimentu považováno za úspěšné a je tedy možné říci, že simulace svařování odpovídá reálnému svařování na velice slušné úrovni.

Vzhledem ke stále rychleji rostoucímu pokroku, je celkem jisté, že se simulace svařování budou i nadále rozvíjet. Simufact.welding je toho zdárným příkladem. Tento experiment považuji za úspěšný, i když se hodnoty občas více lišily, ale to bylo způsobeno hlavně nepřesným nastavením upínek a termočlánků.

5 Seznam použité literatury

[1] Možnosti využití počítačové simulace svařování v průmyslové praxi. *Časopis KONSTRUKCE - informace o uplatnění konstrukcí a návazných oborů při stavbách ve stavebnictví a strojírenství* [online]. 2007 [cit. 2017-08-02]. Dostupné z: http://www.konstrukce.cz/clanek/moznosti-vyuziti-pocitacove-simulace-svarovani-v-prumyslove-praxi/

[2] FRANCIS, Justin D. *Welding Simulations of Aluminum Alloy Joints by Finite Element Analysis*. Virginia: Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, 2002.

[3] INCROPERA, Frank P. a David P. DEWITT. *Introduction to heat transfer*. 3rd ed. New York: Wiley, 1996. ISBN 04-713-0458-1.

[4] KUNCIPÁL, Josef. *Teorie svařování*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1986.

[5] SLOVÁČEK, Marek. *Numerické simulace svařování*. Brno, 2005.

[6] BRADAČ, Jiří. *Simulace svařování: výukové materiály*. Liberec, b.r.

[7] LANGR, Marek a Petr VONDORUŠ. *Vlastnosti materiálů jako vstupní data pro simulaci svařování*. Praha: Fakulta strojní ČVUT, 2017. ISBN ISBN 978-80-01-06143-5.

[8] BARTÁK, Jiří, Jaroslav KUBÍČEK, Ladislav DANĚK a Bohumil KANDUS. *Technologie svařování a zařízení*. Druhé upravené vydání. Plzeň: UNO/PRAHA spol., 2014.

[9] ONDREJČEK, Peter. *Zváranie ocelí v ochrane plynov*. Bratislava: ETERNA PRESS, 2003. ISBN 80-968359-5-5.

[10] MORAVEC, Jaromír. *Analýza kritických parametrů svařovacího procesu simulačním programem SYSWELD*. Liberec, 2006.

[11] b.r.