



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

ANALÝZA ZPŮSOBŮ MODELOVÁNÍ PROCESU SVAŘOVÁNÍ METODOU KONEČNÝCH PRVKŮ

ANALYSIS OF METHODS OF MODELING WELDING PROCESS BY FINITE ELEMENT METHOD

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Andrej Krakovský

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Vosynek, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	Bc. Andrej Krakovský
Studijní program:	Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor:	Inženýrská mechanika a biomechanika
Vedoucí práce:	Ing. Petr Vosynek, Ph.D.
Akademický rok:	2018/19

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

Analýza způsobů modelování procesu svařování metodou konečných prvků

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Svařované konstrukce nyní převládají proti původně odlévaným nebo kovaným. Velkým problémem jsou ovšem zbytková napětí dosahující ve většině případů až meze kluzu, případně zbytkové deformace po svařování. Studentská práce je zaměřena na studium a modelování různých způsobů výpočtového modelování procesu svařování koutového svaru dvou desek. Pro validaci bude použita odborná literatura i vlastní experiment. Téma vychází z praxe.

Cíle diplomové práce:

- Rešeršní studie.
- Tvorba výpočtových modelů.
- Odhad zbytkových napětí, deformací.
- Porovnání odhadu s experimentem + případná kalibrace/korekce modelu.
- Analýza výsledků.

Seznam doporučené literatury:

JARÝ, M. Výpočtové modelování procesu svařování a tepelného zpracování ocelí s využitím elasto-viskoplastického modelu materiálu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 130 s. Vedoucí disertační práce Ing. Lubomír Junek, Ph.D.

DENG, Dean & MURAKAWA, Hidekazu. Numerical Simulation of Temperature Field and Residual Stress in Multi-Pass Welds in Stainless Steel Pipe and Comparison with Experimental Measurements. Computational Materials Science. 37. 269-277. 2006.

HWANG, Se-Yun, LEE, Janghyun, KIM, Sung-Chan & VISWANATHAN, K. K. Numerical Simulation of Welding Residual Stress Distribution on T-joint Fillet Structure. International Journal of Ocean System Engineering 2. 2012.

DENG, Dean. FEM prediction of welding residual stress and distortion in carbon steel considering phase transformation effects. Materials & Design. 30. 359-366. 2009.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Táto diplomová práca sa zaoberá výpočtovým modelovaním (simuláciou) procesu zvárania. Jej hlavným cieľom je určenie zvyškových napätí a deformácií vznikajúcich po zváraní. Na výpočtové modelovanie sú využité programy SYSWELD a ANSYS, oba založené na metóde konečných prvkov. Riešené sú konkrétne procesy zvárania kútového a tupého zvaru dvoch dosiek. Výsledky z jednotlivých softvérov sú porovnané medzi sebou a overené pomocou experimentálnych výsledkov.

Kľúčové slová

zváranie, zvyškové napätia, kútový zvar, tupý zvar, SYSWELD, ANSYS

ABSTRACT

Presented master thesis deals with computational modelling (simulation) of welding process. Its main goal is to determine the residual stresses and deformations arising after welding. SYSWELD and ANSYS are used for simulation, both based on the finite element method. Specifically, the processes of welding fillet and butt welds are solved. Results from both software are compared with each other and verified by experimental results.

Key words

welding, residual stresses, fillet weld, butt weld, SYSWELD, ANSYS

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

KRAKOVSKÝ, Andrej. *Analýza způsobů modelování procesu svařování metodou konečných prvků*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116343>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Petr Vosynek.

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som diplomovú prácu na tému Analýza spôsobů modelování procesu svařování metodou konečných prvků vypracoval samostatne s použitím odbornej literatúry a prameňov uvedených v zozname, ktorý tvorí prílohu tejto práce.

Dátum

Andrej Krakovský

POĎAKOVANIE

Rád by som sa poďakoval vedúcemu mojej diplomovej práce Ing. Petru Vosynkovi, Ph.D. za ochotu a trpezlivosť pri tvorbe tejto práce. Vďaka patrí aj firme MECAS ESI s.r.o, ktorá poskytla softvér a výpočtové prostriedky a jej zamestnancom Ing. Marku Slováčkovi, Ph.D. a Ing. Mojmírovi Vaňkovi, Ph.D. za neoceniteľné rady a pohľady z praxe. V neposlednom rade ďakujem svojej rodine za podporu počas celého štúdia a mojej priateľke za trpezlivosť a pochopenie počas vznikania tejto práce.

OBSAH

1	ÚVOD.....	11
1.1	Problémová situácia.....	11
1.2	Formulácia problému.....	11
1.3	Ciele riešenia	11
1.4	Popis riešeného problému.....	11
2	Rešeršná štúdia	13
2.1	Teória vzniku zvarového spoja.....	13
2.2	Rozdelenie metód zvarovania.....	14
2.3	Zváranie taviacou sa elektródou v ochrannom plyne metódou MIG/MAG	14
2.4	Zvyškové napätia	15
2.5	Podstata vzniku napätí pri zvaraní.....	16
2.5.1	Vývoj zvyškovej napätosti v priebehu teplotného cyklu.....	17
2.6	Druhy napätí vznikajúcich pri zvaraní.....	19
2.6.1	Pozdĺžne zvyškové napätia	19
2.6.2	Priečne zvyškové napätia.....	20
2.7	Vplyv zvyškových napätí na vlastnosti zvarových spojov	21
2.8	Experimentálne meranie zvyškových napätí	22
2.8.1	Odvrtavacia metóda	22
2.8.2	Metódy rentgenovej a neutrónovej difrakcie	23
2.8.3	Magnetoelastická metóda	23
2.9	Znižovanie zvyškových napätí po zvaraní.....	24
2.9.1	Žihanie na zníženie vnútorného pnutia.....	24
2.9.2	Vibrovanie	24
2.9.3	Mechanická úprava povrchu.....	25
2.10	Deformácie vznikajúce pri zvaraní.....	25
2.10.1	Znižovanie zvyškových deformácií po zvaraní	26
3	Etapy numerického modelovania procesu zvarovania	27
3.1	História	27
3.2	Rozdelenie na etapy	27
3.3	Tepelná analýza	27
3.3.1	Potrebné materiálové vlastnosti.....	28
3.3.2	Prenos tepla.....	28
3.3.3	Parametre zvaracieho procesu	28
3.3.4	Tepelné zdroje	29
3.4	Metalurgická analýza.....	33
3.5	Mechanická analýza	34
3.5.1	Potrebné materiálové vlastnosti.....	34
3.5.2	Model materiálu.....	34

3.6	Výpočet tvrdosti.....	35
3.7	Možnosti validácie výsledkov.....	35
4	Systém podstatných veličín.....	37
4.1	Metóda riešenia a použitý softvér	38
5	Kútový zvar SYSWELD.....	39
5.1	Geometria a sieť.....	40
5.2	Materiál.....	42
5.3	Proces zvarovania	43
5.4	Okrajové podmienky.....	45
5.5	Výsledky tepelnej analýzy	45
5.6	Výsledky výpočtu tvrdosti	50
5.7	Výsledky mechanickej analýzy.....	51
6	Kútový zvar ANSYS.....	58
6.1	Zjednodušenia pri výpočtovom modelovaní v ANSYS-e.....	58
6.2	Geometria a sieť.....	58
6.3	Materiál.....	59
6.4	Proces zvarovania	60
6.5	Nastavenia a výsledky tepelnej analýzy.....	61
6.6	Nastavenia a výsledky mechanickej analýzy	63
7	Porovnanie výsledkov zvarovania kútového zvaru.....	68
8	Tupý zvar SYSWELD	70
8.1	Geometria a sieť.....	71
8.2	Materiál.....	73
8.3	Proces zvarovania	73
8.4	Okrajové podmienky.....	74
8.5	Výsledky tepelnej analýzy	74
8.6	Výsledky mechanickej analýzy.....	79
9	Tupý zvar ANSYS	84
9.1	Zjednodušenia pri výpočtovom modelovaní v ANSYS-e.....	84
9.2	Geometria a sieť.....	84
9.3	Materiál.....	85
9.4	Proces zvarovania	85
9.5	Nastavenia a výsledky tepelnej analýzy.....	85
9.6	Nastavenia a výsledky mechanickej analýzy	87
10	Porovnanie výsledkov zvarovania tupého zvaru.....	91
	ZÁVER	93
	ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY	94
	ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK.....	97
	ZOZNAM OBRÁZKOV	98
	ZOZNAM TABULIEK.....	101

1 ÚVOD

1.1 Problémová situácia

Zvárané konštrukcie momentálne prevládajú proti pôvodne odlievaným alebo kovaným. To najmä z dôvodu ekonomickosti zvárania, efektivity a variability možných prevedení. Pri tejto technologickej operácii dochádza ku vzniku zvyškových napätí dosahujúcich vo väčšine prípadov medze klzu, prípadne zvyškových deformácií, čo je problémovou situáciou. Zvyškové napätia sa v praxi odstraňujú najmä tepelným spracovaním (žíhaním). Firma ŽĎAS, a.s. v spolupráci s Ústavom mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky VUT skúma, či a ako veľmi je možné znížiť zvyškové napätia pomocou vibrácií. Na toto overenie je potrebné vytvoriť výpočtový model, ktorý by určoval zvyškové napätia po zváraní. To bolo motiváciou ku vzniku tejto diplomovej práce.

1.2 Formulácia problému

Analýza úrovňovosti výpočtového modelovania na výsledky procesu zvárania kútového a tupého zvaru.

1.3 Ciele riešenia

- Rešeršná štúdia.
- Tvorba výpočtových modelov.
- Odhad zvyškových napätí a deformácií.
- Porovnanie odhadu s experimentom, na ktoré bude nadväzovať prípadná kalibrácia (korekcia) modelu.
- Analýza výsledkov.

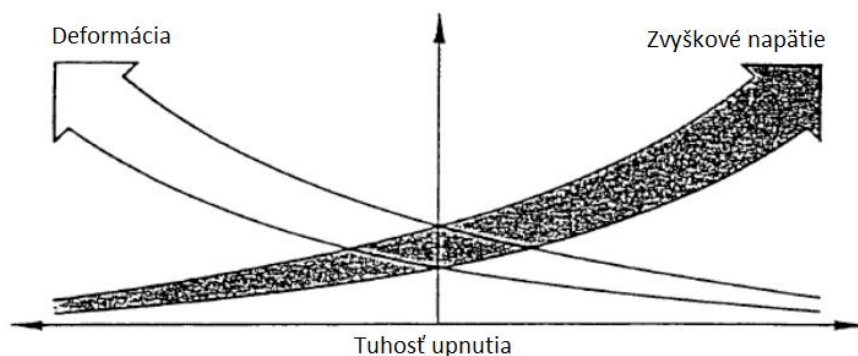
1.4 Popis riešeného problému

Zváranie je komplexný a zložitý proces, ktorého účelom je vytvorenie trvalého, nerozoberateľného spoja dvoch a viac súčastí. Tento proces je sprevádzaný vznikom nežiadúcich zvyškových napätí a deformácií. Ich charakter a veľkosti sú závislé na mnohých faktoroch, ako napríklad druhu a metóde zvárania, zváracích parametroch, geometrii a type zvaru, druhu základného a prídavného materiálu, počte zvarov, podmienkach chladnutia, spôsobe upnutia, tepelnom spracovaní atď..

Zvyškové napätia sú napätia, ktoré zostávajú v súčasti aj po odstránení príčiny, ktorá ich spôsobila. Po zváraní, ale aj iných technologických operáciách, sú tieto napätia rozložené nerovnomerne, to znamená iba v určitej vrstve (objeme) materiálu. Pričítajú sa k napätiam od vonkajšieho zaťaženia, čím sa zvyšuje ich úroveň. Problémom sú hlavne ťahové zvyškové napätia, ktoré majú nepriaznivý vplyv na životnosť konštrukcie a odolnosť voči lomu.

Zvyškové deformácie sú zase problematické najmä z hľadiska funkčnosti a montážnej nadväznosti, no tiež z pohľadu dizajnu a estetiky.

Medzi zvyškovým napätím a deformáciou existuje príčinná súvislosť (obr. 1.1). Ak je obmedzená deformácia súčasti, napr. tuhým upnutím, obvykle dochádza k zvýšeniu zvyškových napätí. [1]



Obr. 1. 1 Vzťah medzi deformáciou a zvyškovými napätiami pri zvaraní. [1]

Numerické simulácie procesu zvarania, ktorých cieľom je predpovedať napätia a deformácie, sú značne komplikované. A to najmä kvôli veľkej teplotnej a materiálovej nelinearite, zložitosti popisu chovania materiálu za vysokých teplôt, transformačným javom, vzniku nových nehomogénnych materiálových štruktúr, problémom s definovaním množstva tepla vstupujúceho do materiálu atď...

Diplomová práca sa zaoberá výpočtovým modelovaním procesu zvarania kútového a tupého zvaru dvoch dosiek s cieľom zistiť priebeh a veľkosť zvyškových napätí a deformácií. Obe geometrie sú najskôr riešené pomocou špecializovaného softvéru SYSWELD-u. Tieto výpočty vznikli vďaka pomoci od firmy MECAS ESI s.r.o, ktorá poskytla softvér, výpočtové prostriedky a cenné rady z praxe. Následne bol vytvorený vlastný výpočtový model v ANSYS-e. Ten zahŕňa rôzne zjednodušenia popísané v [kapitole 6.1](#). Model v ANSYS-e je použiteľný skôr pre jednoduché geometrie, pretože je časovo náročný na vytvorenie a rovnako na výpočtový čas. Na overenie dosiahnutých výsledkov bola použitá odborná literatúra a experiment.

2 Rešeršná štúdia

2.1 Teória vzniku zvarového spoja

Zváraním kovov a ich zliatin sa vytvára nerozoberateľné spojenie pomocou tepelnej, mechanickej, alebo radiačnej energie. Spojenie nastane pôsobením medziatómových síl a adhézných väzieb na teplom, alebo tlakom aktivovaných kontaktných plochách.

Všetky bežné metódy zvárania je možné rozdeliť na dve veľké skupiny: tavné zváranie a tlakové zváranie.

U tavného zvárania je vytvorenie spoja dosiahnuté prívodom tepelnej energie do oblasti zvaru, kedy dochádza k nataveniu základného a prídavného materiálu. Tekutá fáza je viazaná na povrch tuhej fázy adhéznymi silami a pri tuhnutí taveniny sa slabé adhézne sily menia na chemickú väzbu vo forme kryštálovej mriežky. Rastú nové zrná a pôvodné rozhranie tavenina a tuhá fáza zaniká.

Tlakové metódy zvárania sú založené na pôsobení mechanickej energie. Aktiváciou povrchových atómov a makro alebo mikro deformácií sa priblížia spojované povrchy na vzdialenosť pôsobenia medziatómových síl, pričom vznikne vlastný spoj.

U tavných metód zvárania je okolo roztavenej oblasti pásмо, kde dosiahla teplota hodnotu rekryštalizačných pochodov a prebehla aspoň čiastočná rekryštalizácia. Táto oblasť sa nazýva tepelne ovplyvnená oblasť (obr. 1.2). [2]



Obr. 2. 1 Kútový zvar vytvorený tavným zváraním.[3]

2.2 Rozdelenie metód zvárania

Ako je uvedené v predošlej kapitole, existujú dve hlavné skupiny zvárania, a to metódy tavného zvárania a metódy tlakového zvárania. [2]

Metódy tavného zvárania:

- a) elektrickým oblúkom (taviacou sa elektródou, pod tavidlom, MIG, MAG, WIG atď.)
- b) plameňom
- c) elektrónovým lúčom
- d) laserom
- e) plazmou

Metódy tlakového zvárania:

- a) tlakové zváranie za studena
- b) odporové
- c) indukčné
- d) trecie

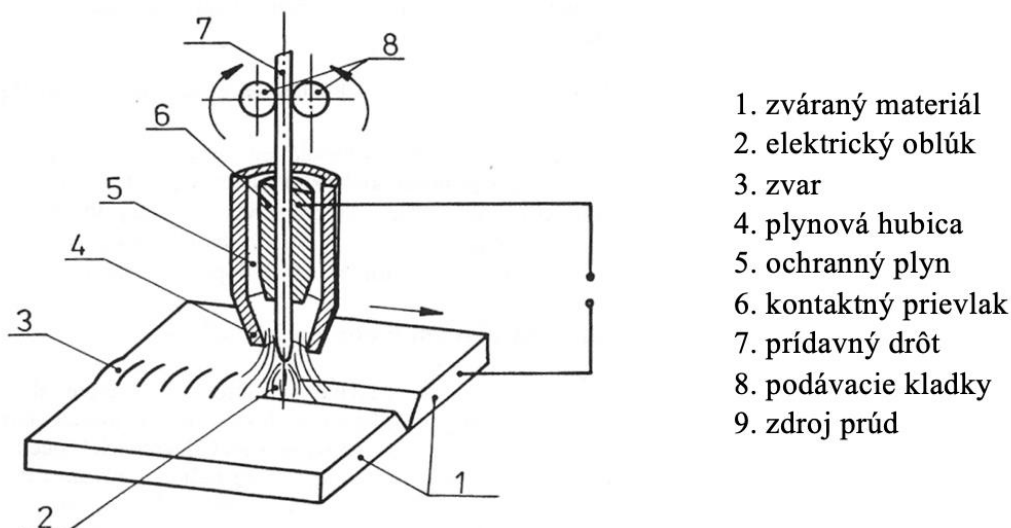
Diplomová práca je venovaná výhradne numerickej simulácii tavného zvárania. Konkrétne výpočty v práci sú pre oblúkové zváranie taviacou sa elektródou v aktívnom plyne (MAG). Vytvorené modely v ANSYS-e by bolo možné použiť aj pre ostatné oblúkové metódy zvárania a po úprave tepelného zdroja aj na ďalšie metódy tavného zvárania. SYSWELD obsahuje možnosti simulácie všetkých druhov zvárania.

2.3 Zváranie taviacou sa elektródou v ochrannom plyne metódou MIG/MAG

Zváranie v ochrannej atmosfére aktívneho plynu MAG patrí k najrozšírenejším metódam zvárania nelegovaných a nízko legovaných ocelí. Zváranie MIG v inertnom plyne získava na dôležitosť kvôli rastu objemu konštrukcií z hliníkových zliatin. Hlavnými dôvodmi rozšírenia metódy MIG/MAG sú široký výber prídavných materiálov a ochranných plynov, jednoduchá možnosť mechanizácie a robotizácie, veľký sortiment vyrábaných zváracích zariadení a predovšetkým významné výhody a charakteristiky uvedenej metódy zvárania.

Metóda MIG/MAG je založená na horení oblúku medzi taviacou sa elektródou vo forme drôtu a základným materiálom v ochrannej atmosfére inertného alebo aktívneho plynu. Napájanie drôtu elektrickým prúdom je zaistené trecím kontaktom v ústí horáku tak, aby elektricky zaťažená dĺžka drôtu bola čo najkratšia.

Zváracie prúdy sa pohybujú od 30 A pri zváraní tenkých plechov drôtom s priemerom 0,6 – 0,8 mm, až do 800 A pri vysokovýkonných mechanizovaných metódach. [2]



Obr. 2. 2 Princíp zvárania taviacou sa elektródou v inertnom alebo aktívnom plyne- MIG/MAG. [2]

Úlohou ochranných plynov pri zváraní je zamedzenie prístupu vzduchu do oblasti zvárania. Konkrétne chrániť elektródu, oblúk aj tavnú kúpeľ, jej okolie a koreň zvaru pred účinkami vzdušného kyslíku, ktorý spôsobuje oxidáciu, naplynovanie, pórovitosť a prepal prvkov. Ako ochranné plyny pre metódu MAG sa používa čistý plyn oxid uhličitý alebo v súčasnosti častejšie používané viaczložkové zmesové plyny so základom argónu. Pri zváraní metódou MIG sa používa väčšinou čistý plyn argón, hélium alebo ich dvojzložková zmes. [2]

2.4 Zvyškové napätia

Vo všeobecnosti zvyškové napätia sú také napätia, ktoré pôsobia v telese trvalo bez vonkajšieho zaťaženia, ako dôsledok predošlých technologických procesov. Vznik zvyškovej napätosti v telese môže byť spôsobený silovým, deformačným alebo teplotným zaťažením. Ak uvedené vonkajšie zaťaženie spôsobí vznik iba elastických deformácií, dôjde po jeho odstránení k ich úplnému zmiznutiu a nedochádza ku vzniku zvyškovej napätosti. Ak však dôjde vplyvom pôsobenia vonkajšieho zaťaženia ku vzniku pružne-plastického stavu (v celom telese alebo iba v niektorých oblastiach), po následnom odľahčení ostávajú v telese isté zvyškové (reziduálne) napätia. Výslednica vnútorných síl sa pritom rovná nule. [4]

Klasifikovať zvyškové napätia je možné podľa rôznych kritérií. Jedným z nich je veľkosť objemu, v ktorom sa napätie z hľadiska veľkosti a smeru nemení:

- Zvyškové napätia 1. druhu (makroskopické) - sú približne homogénne v makroskopickej oblasti (v mnoho zrnách) materiálu rádovo v *mm*.
- Zvyškové napätia 2. druhu (mikroskopické) - sú približne homogénne v oblastiach porovnateľných s veľkosťami zrn.
- Zvyškové napätia 3. druhu (submikroskopické) - sú nehomogénne aj v oblastiach porovnateľných s medziatómovými vzdialenosťami.

Zvyškové napätia v určitom bode telesa sú vždy superpozíciou všetkých troch uvedených druhov. [4]

2.5 Podstata vzniku napětí při zvarání

Nerovnomernost' a časová premenlivosť teplotných polí vznikajúcich pri zvaraní má najväčší vplyv na vznik a rozloženie napätia v súčasti. Dôvodom vzniku vnútorných napätí sú hlavne teplotne premenlivé závislosti teplotne-fyzikálnych a mechanických vlastností použitého materiálu.

Rozdielne rozloženie teplôt v súčasti spôsobuje, že v miestach s vyššou teplotou má materiál snahu rozpínať sa rýchlejšie a intenzívnejšie než v okolitých miestach s nižšou teplotou. Kvôli týmto rozdielom vznikajú v materiály napätia, ktorých veľkosť rastie úmerne s teplotným rozdielom ΔT medzi porovnávanými miestami a to až do dosiahnutia medze klzu pri danej teplote. Pri prekročení tejto hodnoty dochádza v danom mieste súčasti ku vzniku plastických deformácií. Plastickou deformáciou dochádza v uvedenom mieste k spevneniu, vďaka čomu sa hodnota medze klzu posúva k vyšším hodnotám. Preto môžu rásť aj hodnoty zvyškových napätí v súčasti. Zároveň platí, že hodnoty napätia v súčasti nikdy nemôžu byť vyššie, než je medza klzu materiálu pri danej teplote a odpovedajúcom stave deformačného spevnenia.

Z uvedeného je zrejmé, že na veľkosť vznikajúcich napätí a deformácií má vplyv predovšetkým hodnota súčiniteľa teplotnej rozťažnosti a hodnota medze klzu.

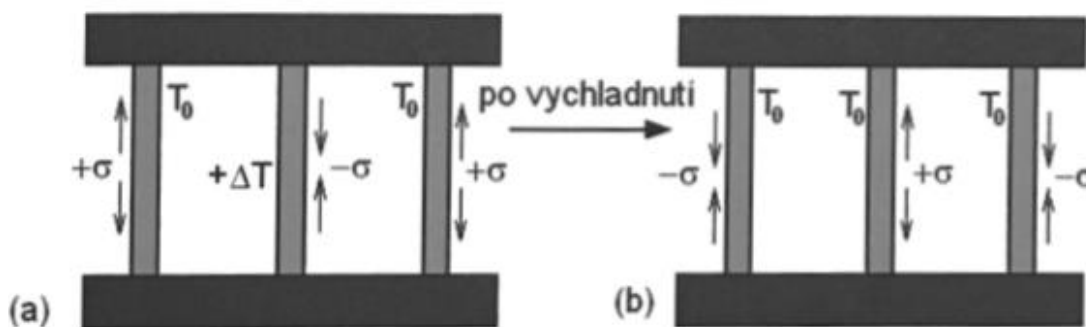
Veľkosť teplotnej dilatácie ohrievanej alebo ochladzovanej voľne uloženej súčasti je možné vyjadriť vzťahom (2.1). Ten však platí len ak v danom časovom okamihu je v celej dĺžke súčasti rovnaká teplota.

$$\Delta l = l_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T = l_0 \cdot \alpha \cdot (T_2 - T_1) \quad (2.1)$$

Vzťah (2.1) vyjadruje o koľko sa predĺži súčasť s počiatočnou dĺžkou l_0 , ak sa jej teplota zvýši z teploty T_1 na teplotu T_2 . Veličina $\alpha [K^{-1}]$ je súčiniteľ teplotnej rozťažnosti materiálu. V prípade, že v dôsledku tuhého upnutia nebude umožnená dilatácia súčasti, začnú v nej vznikať napätia. V takom prípade je možné na výpočet tohoto napätia využiť rovnicu (2.2), ktorá vychádza z Hookovho zákona a vo všeobecnosti je možné ju aplikovať až do medze klzu.

$$\sigma = -\varepsilon \cdot E = -\alpha \cdot E \cdot (T_2 - T_1) \quad (2.2)$$

Záporné znamienko v rovnici (2.2) vyjadruje skutočnosť, že pri kladnej zmene teploty vzniknú v súčasti tlakové napätia.



Obr. 2. 3 Princíp vzniku napätia pri nestacionárnom teplotnom poli a)ohrev b)chladnutie. [1]

Predstavu o tom, čo sa so súčasťou deje pri zvyšovaní jej teploty a zamedzení dilatácie, si je možné vytvoriť na základe jednoduchého experimentu (obr. 2.3). Ide o tri tyče z rovnakého materiálu votknuté do tuhého rámu. Ak je prostredná tyč zahrievaná, má snahu sa predlžovať, ale jej teplotná dilatácia je z veľkej časti potlačená krajnými tyčami. V strednej tyči preto začne vznikať tlakové napätie a zároveň v krajných tyčiach budú vznikať napätia ťahové. V prípade, že dôjde vo fázy ohrevu prostrednej tyče k prekročeniu medze klzu v tlaku pri danej teplote, dôjde v tyči zároveň ku vzniku plastickej deformácie. Pri ochladzovaní prostrednej tyče sa tlakové napätia postupne znižujú a v dôsledku plastickej deformácie vzniknutej vo fázy ohrevu, sa v tyči začnú vytvárať napätia ťahové, ktoré nakoniec môžu dosiahnuť medze klzu v ťahu. V dôsledku Baushingerovho javu bude medze klzu v ťahu (po predošlej plastickej deformácii v tlaku) dosiahnuté skôr, ako by odpovedalo medze klzu v ťahu pri zaťažovaní iba v jednom smere. V krajných tyčiach sa preto ťahové napätia postupne premenia na tlakové, pričom ich veľkosť bude odpovedať polovičnej hodnote ťahového napätia v strednej tyči. Pri reálnom zvaraní je možné nájsť analógiu priebehov napätia, ku ktorým dochádza v prostrednej tyči, s napätím vznikajúcim v oblasti zvarového kovu a v jeho blízkom okolí. Naopak v oblastiach, od zvaru vzdialenejších, dochádza k stavom napätosti analogickým s priebehom napätí v krajných tyčiach.

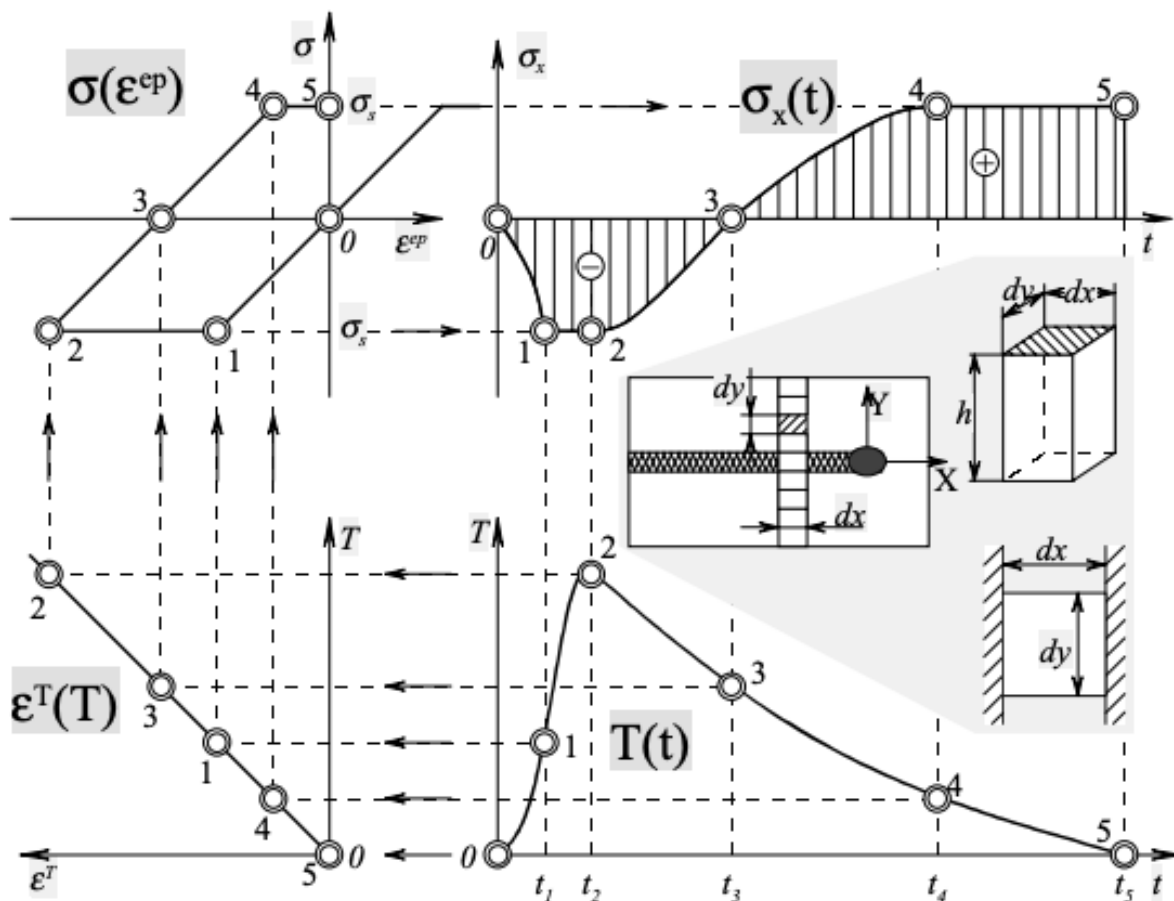
Zvyškové napätia po ochladení sa v tyčiach vyskytnú v prípade, že vo fáze ohrevu došlo k lokálnym plastickým deformáciám. U plastických materiálov nie je zvyškovými napätiami významne prekročená medza klzu nedeformovaného materiálu. U materiálov s nízkou plasticitou (nízkou ťažnosťou) sa hodnoty vnútorných napätí môžu aj po malej plastickej deformácii významne približovať medzi pevnosti materiálu.[1]

2.5.1 Vývoj zvyškovej napätosti v priebehu teplotného cyklu

Vývoj napätosti v priebehu procesu zvarovania predstavuje veľmi zložitú interakciu množstva premenných. Základnú fyzikálnu podstatu, to znamená teplotnú, deformačnú a napät'ovú odozvu, je možné do určitej miery vysvetliť aj na zjednodušených príkladoch. Jeden ukazuje obrázok 2.4, ktorý popisuje vývoj pozdĺžneho napätia vo zvolenom objemovom elemente zvaranej dosky.

Ide o zvaranie tenkej dosky, kde sa teplotné gradienty cez hrúbku predpokladajú zanedbateľné. Vybraný objemový element je vystavený pôsobeniu typického teplotného cyklu (spodná pravá časť obr. 2.4). Predpokladá sa konštantná teplota vnútri hranolu a kvôli zjednodušeniu sa uvažuje odozva z hľadiska napätia a pretvorenia iba v jednej ose.

Na hornom ľavom okraji obrázku 2.4 je idealizovaná deformačne-napät'ová krivka s vyznačeným priebehom napätia, ako funkcie elasto-plastickeho pretvorenia $\sigma(\varepsilon^{ep})$. Objemové zmeny materiálu v dôsledku zvýšených teplôt (dilatometrická krivka), je v ľavom dolnom rohu. Veličina $\varepsilon^T(T)$ je teplotné pretvorenie závislé na teplote T . Vpravo je znázornený teplotný cyklus $T(t)$. Na základe vzájomnej interakcie uvedených diagramov je v pravom hornom rohu obrázku 2.4 vykreslený napät'ový cyklus $\sigma_x(t)$. [4]



Obr. 2. 4 Priebeh vývoja zvyškovej napätosti v objemovom elemente. [5]

Napríklad v čase t_1 je teplota T_1 charakterizovaná bodom 1 na krivke teplotného cyklu. Horizontálna čiara vedená z tohoto bodu určuje bod 1 na dilatačnej krivke. Ten predstavuje veľkosť teplotného pretvorenia, respektíve teplotnú rozťažnosť, pri teplote T_1 . Prechodom hore na $\sigma(\varepsilon^{ep})$ diagram sa získa ďalší bod č.1. Tento bod je charakterizovaný napätím σ_x a elastickým pretvorením ε_x^e v čase t_1 . V tomto čase dosahuje napätie σ_x hodnoty medze klzu R_e . Nakoniec bod 1 na krivke napät'ového cyklu $\sigma_x(t)$ je získaný ako priesečník zvislej čiary vedúcej z bodu 1 teplotného cyklu a vodorovnej čiary z bodu 1 deformačne-napät'ovej krivky. Rovnakým spôsobom je možné získať aj ostatné body (2 až 5) na krivke napät'ového cyklu $\sigma_x(t)$.

Bod 2 korešponduje s maximálnou dosiahnutou teplotou na krivke teplotného cyklu a tým aj s maximálnou hodnotou tlakového plastického pretvorenia. Pri ochladzovaní z času t_2 do času t_3 dochádza vplyvom poklesu teploty k odľahčovaniu z bodu 2 do bodu 3. V čase t_3 je elastické napätie a pretvorenie rovné nule. V časovom intervale t_3 až t_4 narastá napätie a pretvorenie (v ťahovej elastickej oblasti) podľa diagramu $\sigma(\varepsilon^{ep})$. V čase t_4 vzniká opäť plastické pretvorenie opačného znamienka. Čas t_5 reprezentuje stav po kompletom ochladení s finálnou hodnotou zvyškovej napätosti. [4]

2.6 Druhy napětí vznikajících při zvarání

Napětia vznikajúce vo zvaraných dieloch a konštrukciách je možné rozdeliť podľa rôznych hľadísk a kritérií. Základné rozdelenie vnútorných napätí je podľa príčiny a spôsobu ich vzniku, a to na napätia teplotné a napätia štruktúrne.

Teplotné napätia vznikajú kvôli nerovnomernému ohrevu a ochladzovaniu súčasti (teplotným gradientom).

Štruktúrne sú spôsobené fázovými transformáciami v dôsledku vzniku nových štruktúr v jednotlivých elementoch telesa a v dôsledku vzniku presýtených roztokov deformujúcich kryštálovú mriežku. Každá transformačná premena je totiž sprevádzaná zmenou objemovou.

U materiálov s transformačnou premenou sa pri zvaraní spravidla vyskytujú obe uvedené napätia a ich účinky sa skladajú.

Oba uvedené typy napätia vyskytujúce sa v materiály môžu byť buď dočasné, alebo zvyškové (trvalé). Dočasné napätia sa vyskytujú iba určitú dobu, po ktorú trvá príčina ich vzniku. Touto príčinou môže byť upnutie, zaťaženie, vlastná hmotnosť konštrukcie pri konkrétnej pozícii atď.. Naopak zvyškové napätia zostávajú v materiály aj po ukončení operácie, procesu, prípadne výroby. Je ich ale možné znížiť dodatočnými technologickými operáciami.

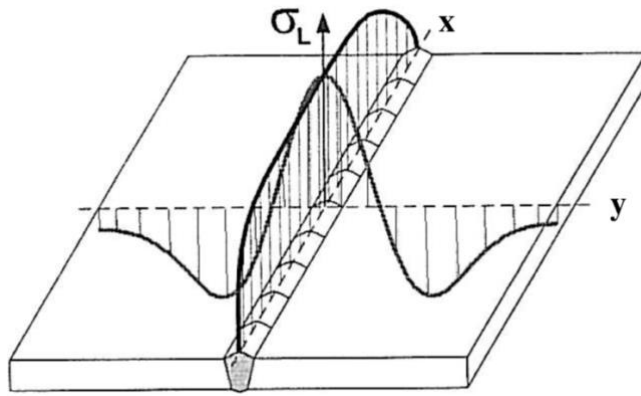
Z hľadiska všeobecnej teórie napätosti pôsobia v ktoromkoľvek mieste súčasti normálové a spravidla aj šmykové zložky napätia, vyjadrené tenzorom napätia. Výslednica uvedených zložiek je vyjadrená veľkosťou a konkrétnym smerom, teda vektorom. Z pohľadu zvarania sa však napätia v súčasti delia podľa smeru pôsobenia vzhľadom k ose zvaru na:

- Napätia pozdĺžne, ktoré pôsobia v smere osy zvaru, teda v smere zvarania.
- Napätia priečne pôsobiace kolmo na osu zvaru a na smer zvarania.
- Napätia v smere hrúbky, prejavujúce sa hlavne pri zvaraní hrubostenných súčastí, prípadne pri navarovaní na hrubé dosky a výrobky s vysokou tuhosťou. [1]

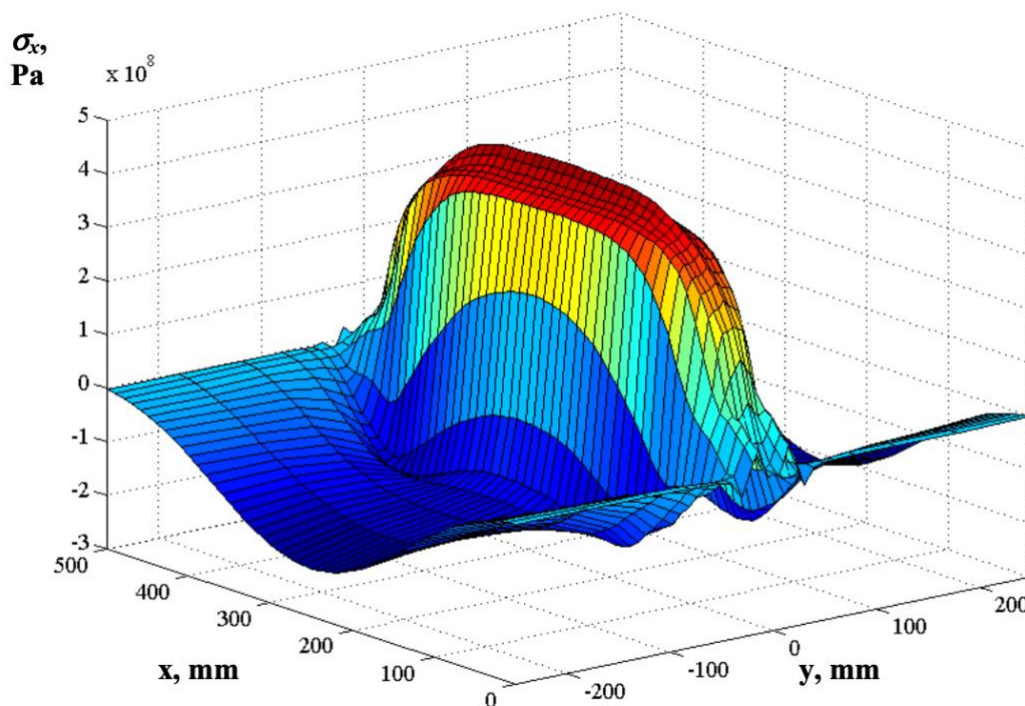
V nasledujúcich kapitolách je načrtnutý priebeh pozdĺžnych a priečných napätí pri zvaraní dvoch dosiek tupým zvarom. Pri zvaraní veľkých hrúbok je nutné uvažovať rozloženie v smere hrúbky a teda aj napätie pôsobiace v tomto smere.

2.6.1 Pozdĺžne zvyškové napätia

Pozdĺžne zvyškové napätia, v anglickej literatúre označované ako *longitudinal residual stresses*, sú výsledkom pozdĺžneho zmrštenia chladnúceho zvarového materiálu. Ťahové napätia sú obmedzené na oblasť zvaru a ich maximálne hodnoty môžu byť rovné alebo presahovať medzu klzu materiálu (získanej pri štandardnej skúške jednoosím ťahom) (obr. 2.5 a obr. 2.6). V okolitej oblasti smerom od zvaru prechádza strmo zvyšková napätosť z ťahovej do tlakovej. Priebeh sa môže líšiť v závislosti na konkrétnom type materiálu, metóde zvarania, upnutia a rôznych ďalších podmienkach. V prípade použitia rozdielných prídavných a základných materiálov môže dochádzať ku vzniku komplikovaných priebehov zvyškovej napätosti. [4]



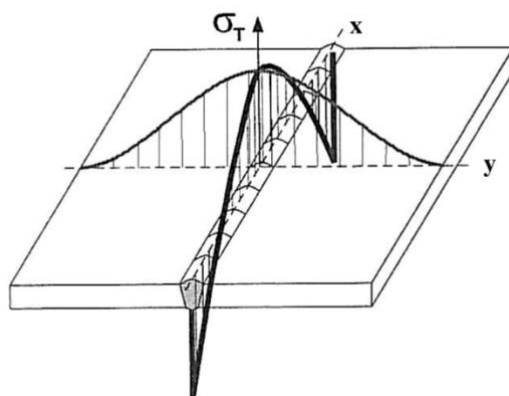
Obr. 2. 5 Všeobecný priebeh pozdĺžnej zvyškovej napätosti. [6]



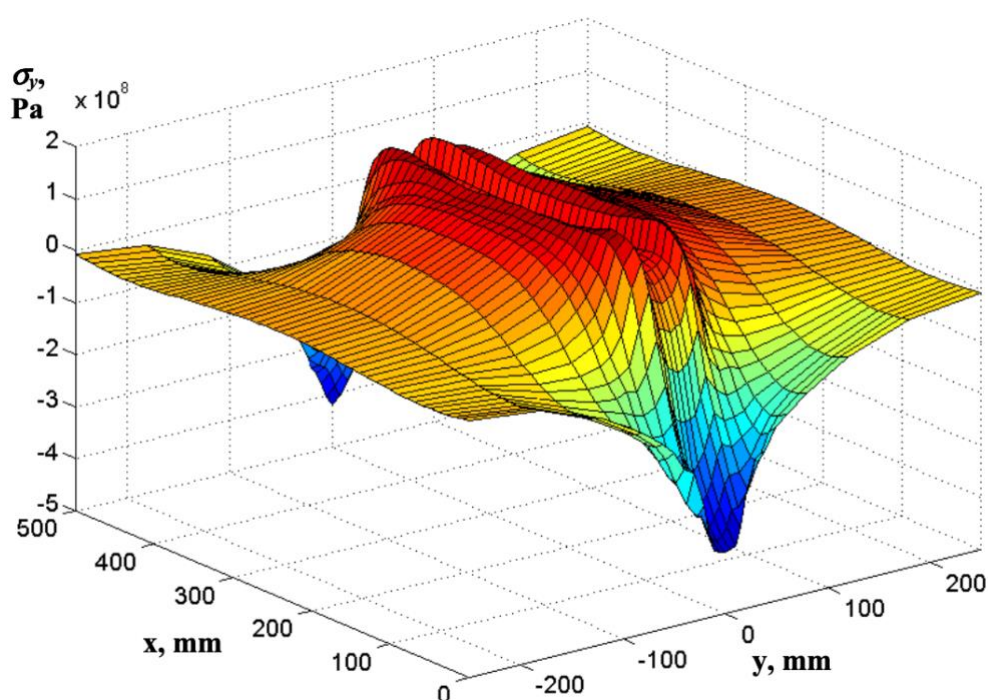
Obr. 2. 6 Priebeh pozdĺžnej zvyškovej napätosti pri simulácii zvarovania pod tavidlom. [5]

2.6.2 Priečne zvyškové napätia

Priečne zvyškové napätia, v anglickej literatúre označované ako *transversal residual stresses*, vznikajú vplyvom priečného zmršťovania chladnúceho zvarového materiálu, a to hlavne v prípade tuho upnutých krajov zvarovej dosky. Priečne zvyškové napätia nie sú obmedzené iba na úzku oblasť v blízkosti samotného zvaru, ale zahŕňajú aj vzdialenejšie oblasti (obr. 2.7 a obr. 2.8). Ich konkrétny priebeh (a aj veľkosť) je závislý napríklad na tuhosti a spôsobe upnutia, rýchlosti zvarovania atď..[4]



Obr. 2. 7 Všeobecný priebeh priečnej zvyškovej napätosti. [6]



Obr. 2. 8 Priebeh priečnej zvyškovej napätosti pri simulácii zvarania pod tavidlom. [5]

2.7 Vplyv zvyškových napätí na vlastnosti zvarových spojov

Ako je vidieť z obrázkov v predchádzajúcich kapitolách, napätie vo zvaroch nie je rovnomerne rozložené. Z hľadiska únavovej životnosti sú nebezpečné predovšetkým miesta s lokálnymi napätovými špičkami, prípadne miesta s prevládajúcimi ťahovými napätiami porovnateľnými s medzou klzu materiálu. To sa týka predovšetkým pozdĺžnych zvyškových napätí nachádzajúcich sa v blízkom okolí zvaru. Tieto napätia spravidla prekročia medzu klzu pri danej teplote a spôsobujú plastické deformácie. Odčerpávajú tak zásobu plasticity v danom mieste.

Na vyčerpanie plasticity sú náchylné predovšetkým materiály s vyššími pevnostnými hodnotami a nižšími hodnotami ťažnosti, kde sú medza klzu a medza pevnosti blízko pri sebe a zásoba plasticity je tak pomerne nízka. [1]

Aby sa mohol popísať vplyv zvyškových napätí na vlastnosti zvarových spojov, je nutné poznať veľkosti a rozloženie týchto napätí vo zvaroch. Možnosti ich stanovenia sú prakticky dve. Prvou je experimentálne meranie zvyškových napätí. Tomu je venovaná nasledujúca kapitola. Druhou možnosťou je predikcia zvyškových napätí pomocou numerických simulácií. Tej sa venuje praktická časť tejto práce. Výhodou numerických simulácií oproti experimentálnym meraniam je možnosť získať informácie o vznikajúcich napätiach a deformáciách a ich časovo premenlivej závislosti ešte pred vlastnou realizáciou zvárania. Vďaka tomu je možné reagovať a technologicky optimalizovať proces pred samotnou výrobou.

V praxi je väčšinou realizovaných niekoľko variant numerických riešení, kedy sa menia teploty predohrevu, zvaracie parametre, postupnosť kladenia zvarových húseníc atď... Cieľom je nájsť optimálny postup z hľadiska ďalšej aplikácie súčasti. Potom nasleduje vlastná realizácia navrhnutého riešenia, ktorá sa fyzicky testuje.

2.8 Experimentálne meranie zvyškových napätí

Stanovenie zvyškových napätí po zváraní je zložitý problém. Existuje na to niekoľko metód, ktoré však majú svoje obmedzenia a určitú presnosť. Ide konkrétne o odvrťavaciu metódu, metódy rentgenovej a neutrónovej difrakcie a magnetoelastickú metódu.

Experimentálne metódy sú pri štandardnom prevedení vierohodne použiteľné za splnenia určitých podmienok. Tými sú napríklad homogénna rovinná napätosť na povrchu, hodnoty napätí neprekračujúce požadovaný násobok medze klzu, experimentálne merania sú vykonávané v oblasti lineárne elastických pretvorení, kde je platný Hookov zákon. To väčšinou býva splnené v prípade zvyškovej napätosti po tepelnom spracovaní, a to ako v oblasti ďalej od zvaru, tak aj priamo vo zvare. Avšak v prípade napätosti po zváraní sú tieto podmienky splnené iba dostatočne ďaleko od zvaru. Priamo vo zvarom spoji a tepelne ovplyvnenej oblasti splnené nie sú. [4]

2.8.1 Odvrťavacia metóda

Táto metóda umožňuje merať zvyškové makroskopické napätia v blízkosti povrchu materiálu. Jej princíp spočíva vo vyvrtaní malého otvoru do povrchu materiálu. Vzniknutý otvor spôsobí uvoľnenie zvyškových napätí, vďaka čomu dochádza k povrchovým deformáciám v okolí otvoru. Tieto deformácie sú najčastejšie merané pomocou odporových tenzometrov a na základe výsledkov merania sú spätne stanovené pôvodné zvyškové napätia materiálu. Táto metóda je používaná pre svoju jednoduchosť a je vhodná pre širokú škálu riešených aplikácií i materiálov. Nevýhodou je hlavne narušenie celistvosti povrchu vrtaním otvoru. [1]

Vo vzťahu tejto metódy k procesu zvárania je možné nájsť jej nedostatky. Ako je spomenuté vyššie, podmienky na použitie tejto metódy sú splnené iba dostatočne ďaleko od zvaru a tepelne ovplyvnenej oblasti.

Existujú aj praktické prekážky na používanie tejto metódy v súvislosti so zváraním. Priemer vyvrtanej diery je minimálne 0,8 mm, avšak gradient vo zvare a tepelne ovplyvnenej oblasti na tejto dĺžke môže dosahovať aj 100 MPa, čo nedokáže daná metóda postihnúť. Ďalším problémom je členitý prechod základného materiálu a zvarovej húsenice, kde môžu nastať komplikácie z dôvodu deformácie tenzometrických ružíc pri ich lepení. Vo výsledku je možné merať iba zvyškové napätia v základnom materiáli, no ich maximá a nebezpečné miesta zvarov sa nachádzajú priamo vo zvaroch alebo v ich tesnej blízkosti.

2.8.2 Metódy rentgenovej a neutrónovej difrakcie

Pri rentgenovej difrakcii sú využívané prístroje nazývané difraktometry. Ich základnou súčasťou je rentgenka určujúca na základe použitého materiálu anódy veľkosť vlnovej dĺžky. Z rentgenky vychádza lúč primárneho žiarenia s vlnovou dĺžkou λ dopadajúcou pod určitým uhlom θ na meranú vzorku. Podstatou tejto metódy je využitie rozptylu (difrakcie) rentgenových lúčov na kryštáloch pri meraní zmien vzdialeností atómových mriežkových rovín vyvolaných napätím. Získavajú sa tak záznamy nazývané difraktogramy. Z nich sú vyhodnotené požadované informácie a tie sa následne prepočítavajú na napätie pomocou vzťahov teórie elasticity. [1]

Je nutné poznamenať, že pomocou rentgenovej difrakcie je možné merať napätia iba na povrchu vzorku (do hĺbky desiatok μm). Pri požiadavke na meranie vo väčších hĺbkach je možné použiť lokálne elektrolytické leštenie materiálu (približne do 2 mm). To však mení povrchový stav napätosti, čo môže ovplyvniť výsledky zvyškových napätí po zváraní.

Alternatívou je využitie neutrónovej difrakcie. Tá používa obdobný princíp ako difrakcia rentgenová. Vďaka kratším vlnovým dĺžkam je ňou možné merať napätia až do hĺbky 10 mm. Ide o nákladnú a komplikovanú metódu, pretože je vykonávaná v blízkosti jadrového reaktora.

2.8.3 Magnetoelastická metóda

Je založená na Barkhausenovom magnetickom šume. Ide o nespojitú zmenu magnetizácie pri spojitý zmene budiaceho magnetického poľa. Analýza Barkhausenovho šumu pre meranie zvyškových napätí využíva magneto-elastickú interakciu medzi magnetickým posunutím doménovej steny a elastickým napätím vo feromagnetických materiáloch. Oblasti s ťahovými napätiami, v ktorých je smer magnetizácie rovnobežný so smerom zaťaženia, sa zväčšujú. Zároveň sa oblasti kolmé na smer magnetizácie znižujú, až úplne zanikajú. V prípade tlakových napätí je efekt opačný. Oblasti, v ktorých je smer magnetizácie kolmý na smer zaťaženia, sa zväčšujú. Prítomnosť napätí vedie k deformáciám hysteréznej slučky, pričom platí, že maximum magnetizácie je u ťahových napätí vyššie ako u napätí tlakových. [1]

Pri praktickom použití tejto metódy je nutná relatívne zložitá kalibrácia, čo má za následok jej časovú a finančnú náročnosť. Zároveň je metóda použiteľná iba pre feromagnetické materiály. Ale pri skúmaní zvyškových napätí priamo vo zvare, by mala dávať najpresnejšie výsledky spomedzi všetkých zmienovaných metód.

2.9 Znižovanie zvyškových napätí po zváraní

Zvyškové napätia sa pri zvarencoch s nízkou tuhosťou uvoľňujú deformáciou pri samotnom procese zvárania. Pri vyšších tuhostiach môže dôjsť k ich uvoľneniu neskôr (samovoľne) pri prevádzke zariadenia. Existujú metódy vykonávajúce sa zámerné na zníženie zvyškových napätí. Ide konkrétne o tepelné spracovanie (žíhanie), mechanickú úpravu povrchu alebo vibrovanie.

2.9.1 Žíhanie na zníženie vnútorného pnutia

Počas tohoto tepelného spracovania, vykonávaného po zváraní, dochádza vplyvom zvýšenia teploty k zníženiu veľkosti medze klzu materiálu. To umožňuje lokálne uvoľnenie zvyškových napätí. Primárnym mechanizmom, ktorý vedie ku zníženiu týchto napätí je plastická deformácia. Sekundárnym je creep (tečenie). [7]

Z hľadiska energetického a časového je žíhanie veľmi nákladná operácia. Preto sú snahy nahradiť ju niečím ekonomickejšim. Ako vhodná náhrada sa ukazuje vibračná metóda.

2.9.2 Vibrovanie

Na základe skúmania možnosti využitia a efektu vibrovania na zvyškové napätia po zváraní, vznikla aj táto diplomová práca.

Metóda je založená na uvoľňovaní napätí druhého druhu (viď [kap. 2.4](#)). Využíva skutočnosť, že atómy materiálu v miestach väd krištáľovej mriežky (dislokácií, vakancií, vrstevných porúch a pod.) sú veľmi nestabilné a k ich posunu na nové stabilné miesto v mriežke, je potrebné nižšie šmykové napätie, ako je jeho teoretická hodnota pre posun sklzom. Zdrojom tohoto napätia, ktoré spôsobuje pohyb atómov a dislokácií, je vibračná energia. [10]

Vibrovanie v praxi prebieha tak, že zvarenec sa uloží na pružné podložky. Vibračná hlava sa pevne uchyťí na jeho najtuhšiu časť a v určitej vzdialenosti od nej sa pripevní snímač kmitov (obr. 2.9). Doba vibrovania je predom určená. Vibrácie môžu prebiehať pri rezonančnej alebo subrezonančnej frekvencií. Hodnoty veličín určujúcich vibrácie sa volia podľa typu zvaranej konštrukcie, jej tvaru, tuhosti, druhu materiálu a pod.. Aby sa účinok vibrovania prejavil, musí súčet zvyškového napätia a napätia spôsobeného vibráciou presiahnuť medzu klzu. [8,9,10]



Obr. 2. 9 Zariadenie na odstraňovanie napätí pomocou vibrácií.[11]

Výhodou vibrovania oproti žíhaniu je, že sa nemení štruktúra tepelne ovplyvnenej oblasti a nedochádza k poklesu medze pevnosti ani medze klzu. Vo výsledku je únavová životnosť vyššia. Nárazová práca dosahuje porovnateľných hodnôt. [9,10]

Vibračná metóda sa v praxi najčastejšie aplikuje pri rozmerných konštrukciách, kde by žíhanie bolo veľmi neekonomické prípadne rovno nemožné. Aplikáciou vibračnej metódy môže dôjsť ku zníženiu zvyškových napätí až o 40 %. [1,12]

Čo sa týka materiálov, použitie vibračnej metódy je vhodné pri väčšine nelegovaných, nízko legovaných aj vysoko legovaných ocelí, ocelí na odliatky, liatin s guľôčkovým aj lupienkovým grafitom. Neodporúča sa pre materiály spevnené tvárnením za studena, vysokopevné oceli so zníženou plasticitou, materiály so sklonom k starnutiu a materiály vytvrdzované. [9,10]

2.9.3 Mechanická úprava povrchu

Metódy mechanickej úpravy povrchu sú založené na vnášaní tlakových napätí do zvaru, ktoré eliminujú vplyv nepriaznivých ťahových napätí.

Jednou z týchto metód je prekovanie jednotlivých vrstiev zvaru v počiatočných fázach ochladzovania po vytvorení zvarovej húsenice. Vďaka vneseným tlakovým napätiam sa zvyšuje únavová životnosť spoja.

Ďalšou možnosťou je metóda synchronného valcovania, pri ktorej sa pozdĺžne valcuje teplotne ovplyvnená oblasť na oboch stranách húsenice.

Existuje ešte tryskanie oceľovými brokmi a poslednou možnosťou, ako znížiť zvyškové napätia, je s využitím ultrazvuku. [8,9]

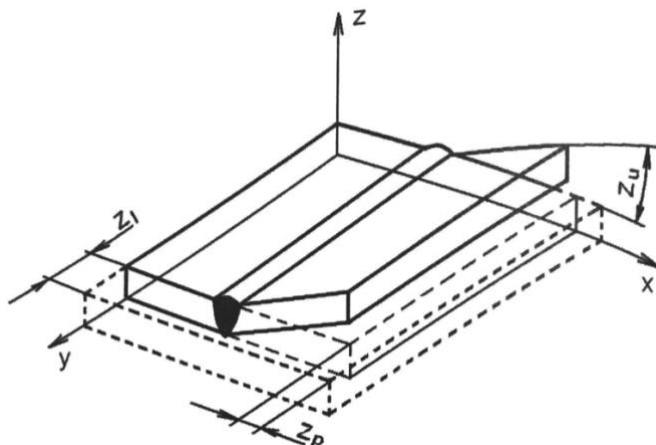
2.10 Deformácie vznikajúce pri zváraní

Napätia vznikajúce pri zváraní spôsobujú deformácie. Tie môžu byť vážnym problémom z funkčného aj estetického hľadiska.

Deformácie po zváraní je možné rozdeliť podľa rôznych kritérií. Podľa doby existencie na dočasné a zvyškové (trvalé). Zvyškové sa prejavujú po ukončení zvárania a úplnom vychladnutí zvarenca. Podľa stálosti na pružné a plastické alebo podľa oblasti pôsobenia na makrodeformácie, mikrodeformácie a submikroskopické deformácie. [12]

Podobne ako pri napätiach, je najrozšírenejšie delenie deformácií (obr. 2.10) podľa polohy vzhľadom k osám zvaru na: pozdĺžne zmrštenia- z_l , priečne zmrštenia- z_p a uhlové deformácie- z_u .

Pozdĺžne zmrštenie (z_l) je zmena rozmeru v smere zvárania a jeho veľkosť je závislá najmä na tuhosti zváraného dielu, metóde zvárania, geometrii zvaru (priečny prierez) a spôsobe vyplňovania zvarového úkosu. Pri zváraní väčšinou tuhosť zvarenca zabráni výrazným deformáciám v pozdĺžnom smere. V tomto smere tak zostávajú vysoké hodnoty zvyškových napätí. [12]



Obr. 2. 10 Deformácie spôsobené zváraním. [12]

Priečne zmrštenie (z_p) je zmrštenie v smere kolmom na osu zvaru. Závislé je na tvare zvaru, hrúbke materiálu, tuhosti a spôsobe upnutia, spôsobe stehovania, množstve vneseného tepla a spôsobe zvárania.

Uhlová deformácia (z_u) vzniká predovšetkým v nesymetrických tupých zvaroch. Príčinou tejto deformácie je nerovnomerné priečne zmrštenie v smere hrúbky materiálu. Pri zváraní nesymetrických zvarov a zvarov vyplňovaných viacerými húsenicami vzniká nerovnomerné rozloženie teploty v smere hrúbky, nerovnomerné plastické deformácie v jednotlivých vrstvách materiálu a nerovnomerné priečne zmrštenie v jednotlivých rovinách rovnobežných s povrchom materiálu. [12]

2.10.1 Znižovanie zvyškových deformácií po zváraní

Deformácie je možné odstraňovať buď mechanickým spôsobom (rovnaním), alebo pôsobením tepla. Pri rovaní sa vnáša do zvarenca prídavné napätie a hrozí jeho prasknutie. Mechanické rovanie, vykonávané ručne alebo pod lisom, je prácne a zdĺhavé.

Rovnanie teplom sa vykonáva najčastejšie plameňom, kedy sa používa zvarací horák. Pri tomto druhu rovnania sa využíva rovnaký jav, ktorý spôsobuje deformácie aj pri zváraní. [8]

3 Etapy numerického modelování procesu zvarování

3.1 História

Stanovenie zvyškových napätí a deformácií po zvarování je náročný problém. Či už kvôli komplexnosti celého procesu, výpočtovej náročnosti, alebo potrebe presných vstupných parametrov.

Prvým pokusom o predpovedanie zvyškových napätí po zvarování bola podľa [13] práca Rodgersa a Fletchera z roku 1938. Na analýzu boli použité analytické rovnice založené na lineárnej škupinovej teórii v kombinácii s nameranou teplotnou históriou.

Niekoľko ďalších analytických metód bolo vytvorených do roku 1970. Na základe ich výsledkov sa zjednodušene predpokladalo, že pozdĺžne zvyškové napätie (okrem miest začiatku a konca zvarování) je nemenné a má veľkosť medze klzu. Zistilo sa tiež, že priečne napätie je závislé na množstve parametrov.

Analytické modely boli okolo roku 1970 vystriedané numerickými analýzami, založenými prevažne na metóde konečných prvkov. Prvé práce, ktoré určujú veľkosť napätí po zvarování boli nezávisle publikované Friedmanom a Kimichikom. Podľa Donga [13] bol ďalším míľnikom rok 1979, kedy pracovníci z výskumného pracoviska Battelle publikovali rozšírené modely pre analýzu viacvrstvého zvarování vrátane tavenia materiálu a žihania. V ďalších prácach boli uverejnené modely už aj s uvažovaním fázových transformácií.

Neskôr sa vývojom numerických analýz začala zaoberať rada organizácií. Vzniklo niekoľko programových systémov, ako v univerzitnom, tak aj komerčnom priestore. [13]

3.2 Rozdelenie na etapy

Výpočtové modelovanie v tejto práci je vykonané v špecializovanom softvéri SYSWELD-e a univerzálnom softvéri ANSYS-e. V ANSYS-e je vytvorený vlastný algoritmus riešenia, ktorý simuluje proces zvarování. Etapy výpočtového modelovania, popísané v nasledujúcich kapitolách, platia pre výpočty vykonané v programe SYSWELD. Výpočty v ANSYS-e niektoré etapy alebo ich časti neobsahujú kvôli zjednodušeniam, ktoré sú bližšie rozobraté v [kapitole 6.1](#).

Výpočtové modelovanie procesu zvarování je založené na fyzikálnych a empirických vzťahoch. Konkrétne ide o tranzientnú analýzu, ktorú je možné rozdeliť do niekoľkých vzájomne prepojených etáp. Začína sa tepelnou a metalurgickou analýzou, nasleduje analýza mechanická a zahrnúť je možné ešte výpočet tvrdosti. [14]

3.3 Tepelná analýza

Ide o proces simulácie prenosu tepla. Výsledky, nestacionárne teplotné polia, sú závislé na termofyzikálnych vlastnostiach materiálu, geometrii zvarovnice ovplyvňujúcej odvod tepla z tavnej kúpele a tepelných okrajových podmienkach. Zmeny teplôt (tepelné procesy) spôsobujú zmeny objemu materiálu, ktoré vedú k deformáciám a generujú napätia v materiály, tie sa riešia v mechanickej analýze.

3.3.1 Potrebné materiálové vlastnosti

Materiálové vlastnosti, potrebné pre numerické modelovanie procesu zvarovania, sa vo všeobecnosti dajú rozdeliť do dvoch skupín. Prvou skupinou sú termofyzikálne vlastnosti materiálu a druhou sú mechanické vlastnosti (viď [kap. 3.5.1](#)).

Na rozdiel od mechanických vlastností, termofyzikálne vlastnosti materiálu bývajú väčšinou v literatúre dobre dostupné a zároveň nevykazujú významné rozdiely pre rôzne typy materiálov patriacich do rovnakej kategórie.

Materiálové charakteristiky je nutné do analýzy zadávať vždy v závislosti na teplote (od izbovej teploty až do teploty tavenia) a v prípade materiálov, ktoré vykazujú fázové premeny, tiež v závislosti na type štruktúry materiálu.

Do analýzy je potrebné zadať tieto termofyzikálne vlastnosti:

Veličina	Symbol	Jednotka
Koeficient tepelnej vodivosti	λ	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$
Merná tepelná kapacita	c	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
Hustota	ρ	$[kg \cdot m^{-3}]$
Koeficient prestupu tepla	β	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$

Tab. 3. 1 Potrebné termofyzikálne vlastnosti materiálu.

Ak ide o polymorfný materiál, je nutné zadať aj ARA diagram (viď [kap. 3.4](#)).[4,14]

3.3.2 Prenos tepla

Komerčne využívané simulačné programy tavného zvarovania uvažujú pri výpočtoch teplotných polí prenos tepla vedením (kondukciov). To je popísané diferenciálnou rovnicou vedenia tepla, ktorá sa rozširuje (modifikuje). Rýchlosť vedenia tepla určuje koeficient tepelnej vodivosti, ktorý je materiálovou charakteristikou.

Chladnutie zvarovnice, alebo inak tepelné straty, sú uvažované prúdením (konvekciou) a sálaním (radiáciou). Prúdenie je popísané pomocou Newtonovéhó ochladzovacieho zákona. Na jeho popis je nutné poznať koeficient prestupu tepla medzi materiálom a okolím. Sálanie popisuje Stefan-Boltzmannov zákon. [15,16]

3.3.3 Parametre zvaracieho procesu

Tieto parametre sa nastavujú priamo pred zvarovaním a v priebehu zvarovania je ich možné korigovať. Z veľkej časti sú závislé na konštrukcii a charakteristikách zvaracieho zdroja. Najdôležitejšími parametrami zvaracieho procesu sú zvarací prúd I [A], zvaracie napätie U [V] a rýchlosť zvarovania v_s [$m \cdot s^{-1}$]. Pomocou nich je možné vyjadriť jednu z najdôležitejších veličín používaných pri zvarovaní, tzv. merné vnesené teplo.

Merné vnesené teplo Q_v [$J \cdot m^{-1}$] určuje množstvo vneseného tepla na jednotku dĺžky zvaru. Je dané podmienkami existencie zvarovej kúpele a celkovou tepelnou bilanciou zvaru s ohľadom na privedené a odvedené teplo, straty pri prenose a ochrane oblúku. Túto veličinu je možné stanoviť podľa vzťahu (3.1).

$$Q_v = \eta_0 \cdot \frac{U \cdot I}{v_s} \quad (3.1)$$

Bezrozměrná veličina η_0 se nazývá efektivita (účinnost) přenosu elektrického oblúku. Její hodnota se pro MIG/MAG zvarování pohybuje v rozmezí 0,7-0,9. Tato veličina kompenzuje fakt, že ne všechno teplo se přenesie z oblúku do zvarového materiálu.

Okrem základných (vyššie spomenutých) parametrov zvaracieho procesu, ovplyvňujú tvar a rozmery zvarovej kúpele aj ďalšie. Ide napríklad o rýchlosť podávania drôtu, polaritu elektródy, sklon drôtu (horáku) voči povrchu zvarovaného materiálu, prietokové množstvo ochranného plynu, tvar a rozmer zvarových plôch, polohu zvarovania a iné. [16]

Jedným z kľúčových faktorov pre úspešnú predikciu zvyškovej napätosti pomocou numerickej simulácie procesu zvarovania, je spôsob zadávania vneseného tepla do materiálu. Množstvo vneseného tepla určuje už vyššie spomenutá veličina Q_v , ktorá musí čo najlepšie odpovedať skutočnosti.

Najpoužívanejší spôsob zadávania vneseného tepla do objemu modelovaných zvarových húseníc je pomocou pohybujúceho sa modelu tepelného zdroja. Pri tomto spôsobe je celý zvarací proces analyzovaný postupne pre každý časový interval. To vyžaduje veľmi jemnú konečno-prvkovú sieť elementov v oblasti zvarových húseníc a malý výpočtový časový krok volený s ohľadom na rýchlosť zvarovania. Rozloženie tepla v priestore v každom časovom okamihu je zadávané vhodným modelom tepelného zdroja (tejto problematike je venovaná nasledujúca kapitola). Výhodou takto postavenej numerickej simulácie sú presné výsledky analýz, nevýhodou sú dlhé výpočtové časy. [17]

3.3.4 Tepelné zdroje

Jediným zaťažujúcim účinkom behom numerickej simulácie zvarovania, je rozloženie teplotných polí v priestore a čase. To tvorí vstupné dáta pre ďalšie analýzy vedúce k určenie deformačných a napätových polí, štruktúry materiálu atď.. Kľúčom k dosiahnutiu uspokojivých výsledkov je preto nájdenie správneho matematického popisu tepelného zdroja.

Model tepelného zdroja slúži na matematický popis zvarovej kúpele. Určuje a riadi veľkosť a tvar tepelného toku vstupujúceho do materiálu. Modely simulujúce zdroj zvarovania je možné rozdeliť na jednorozmerné, dvojrozmerné a trojrozmerné. Toto rozdelenie zároveň naznačuje ich zložitosť a presnosť. [16]

Jednotlivé typy tepelných zdrojov:

- a) Bodový zdroj (1D)- využitelný pre prípady navarovania hrubých dosiek.
- b) Lineárny zdroj (1D)- využitelný pri zvarovaní tenkostenných dosiek, u ktorých je možné zanedbať teplotný gradient v smere ich hrúbky.
- c) Rovinný zdroj- využitelný pri simulácii stykového zvarovania tyčí.
- d) Rovinný zdroj s Gaussovým rozložením tepla- vychádza z bodového zdroja. Bližšie informácie o tomto modeli sú na strane [30](#).
- e) Pologulovitý zdroj- prvý trojrozmerný model.
- f) Elipsoidný zdroj- ide o vylepšenie pologulovitého modelu zdroja. Dáva lepšiu zhodu s reálnymi výsledkami. Bližšie informácie o tomto modeli sú na strane [30](#).
- g) Dvojelipsoidný zdroj- vo svojej modifikovanej podobe vykazuje najlepšiu zhodu s realitou pre takmer všetky metódy oblúkového zvarovania. Využíva sa vo väčšine komerčných simulačných programov zvarovania. Jeho popis je na strane [31](#).

h) Priestorový zdroj s Gaussovým rozložením tepla tzv. 3D Gaussian- najnovší tepelný zdroj pre simuláciu zvárania laserom a elektrónovým lúčom. Je implementovaný vo väčšine komerčných simulačných programov. O tomto modeli sú bližšie informácie v [16,18,19].

d) Rovinný zdroj s Gaussovým rozložením tepla

Tiež model kruhového disku, bol predstavený v roku 1969 v [20] Pavelicom. Tepelný tok má Gaussovo (normálne) rozdelenie. Preto distribúcia plošnej hustoty tepelného toku na povrchu materiálu súvisí s radiálnou polohou $r = \sqrt{x^2 + z^2}$, ktorej počiatok je stred oblúka pohybujúci sa s horákom. Model kruhové disku je popísaný rovnicou: [18,21]

$$q(r) = q_m \cdot e^{-(r^2/2R^2)} \quad (3.2)$$

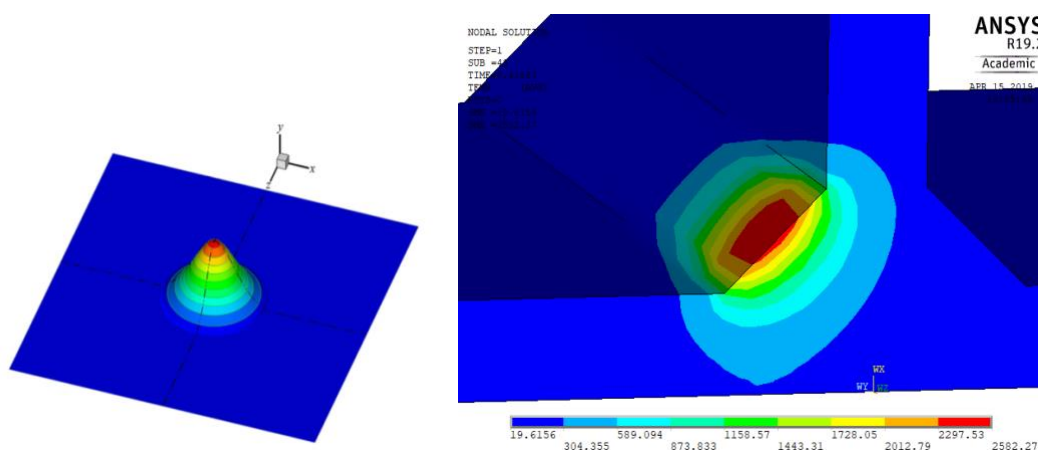
kde:

$q(r)$ - plošná hustota tepelného toku [$W \cdot m^{-2}$]

R - radiálna vzdialenosť od stredu zdroja [m]

q_m - maximálna plošná hustota tepelného toku v strede zdroja daná rovnicou

$$q_m = \eta UI / 2\pi R^2 \quad (3.3)$$



Obr. 3. 1 Náčrt rozloženia tepla s Gaussovým rozdelením (vľavo)[21] a výsledok použitia modelu kruhového disku v ANSYS-e (vpravo).

Výhodou tohoto modelu zdroja tepla je, že má prakticky iba jeden voliteľný parameter R . Preto bol pri začiatkoch tvorby a prvotnom ladení výpočtov v programe ANSYS použitý. Na praktické výpočty je však nedostačujúci, pretože ide o rovinný model. Teplo pôsobí iba na povrch materiálu a tak nedochádza ku vzniku natavenej oblasti (obr. 3.1 vpravo). Je ešte vhodné spomenúť, že tento model sa v ANSYS-e aplikuje pomocou okrajovej podmienky heat flux.

f) Elipsoidný zdroj

Ide o trojrozmerný zdroj tepla, ktorý má 3 voliteľné parametre: šírku, dĺžku a penetráciu. Tie určujú rozmery natavenej oblasti. Teplo je rovnako ako pri predošlom modeli rozložené s Gaussovým rozdelením. Zdroj v pevnom súradnicovom systéme reprezentuje rovnica 3.4. [18]

$$q(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}Q}{abc\pi\sqrt{\pi}} e^{-3x^2/a^2} e^{-3y^2/b^2} e^{-3[z+v(\tau-t)]^2/c^2} \quad (3.4)$$

$q(x,y,z,t)$ - objemová hustota tepelného toku [$W \cdot m^{-3}$]

Q - celkový výkon zdroja daný napätím a prúdom [W]

a,b,c - poloosi elipsoidu, ktoré určujú rozmery natavenej oblasti [m]

v - rýchlosť zvárania [m/s]

τ - čas [s]

Vo výpočtoch v programe ANSYS, bol použitý tento model. Aplikuje sa okrajovou podmienkou heat generation.

g) Dvojelipsoidný model zdroja tepla

Skúsenosti s elipsoidným zdrojom tepla ukázali, že predpovedané teplotné gradienty pred oblúkom boli menej strmé ako experimentálne pozorované a gradienty za oblúkom boli strmšie než namerané. Preto vznikol dvojelipsoidný model.

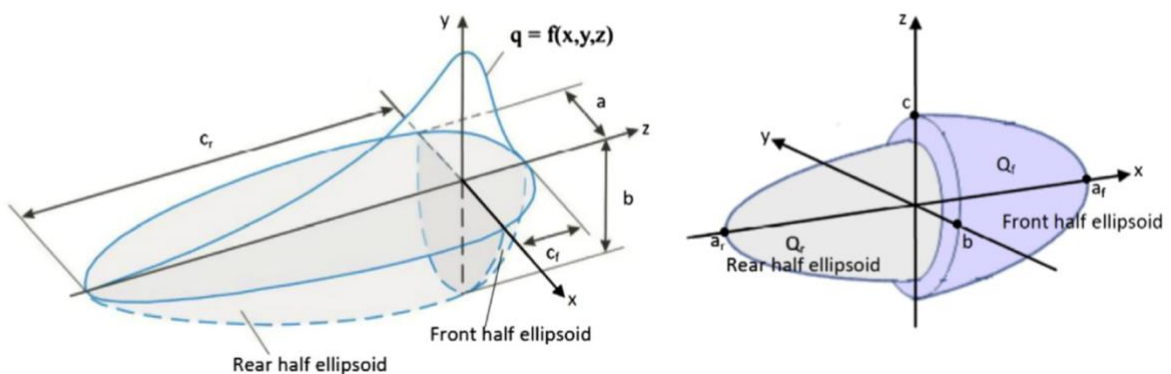
Tento model je preddefinovaný v SYSWELD-e a aj ďalších simulačných programoch zvárania. Ide o kombináciu dvoch do seba zasadených elipsoidov (obr. 3.2), majúcich rovnaký prienik v rovine danej polohou zdroja a kolmej na smer zvárania. Dvojelipsoidný model najlepšie popisuje reálny stav u metód zvárania elektrickým oblúkom. Na rozdiel od ostatných modelov je dvojelipsoidný model popísaný dvoma rovnicami (rov. 3.5 a 3.6). Každá pre jeden elipsoid.

$$q(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}f_1Q}{abc_1\pi\sqrt{\pi}} e^{-kx^2/a^2} e^{-ly^2/b^2} e^{-m[z+v(\tau-t)]^2/c_1^2} \quad (3.5)$$

$$q(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}f_2Q}{abc_2\pi\sqrt{\pi}} e^{-kx^2/a^2} e^{-ly^2/b^2} e^{-m[z+v(\tau-t)]^2/c_2^2} \quad (3.6)$$

k,l,m - koeficienty umožňujúce modifikáciu tvaru zdroja tepla

f_1, f_2 - parametre ovplyvňujúce rozloženie toku energie do materiálu

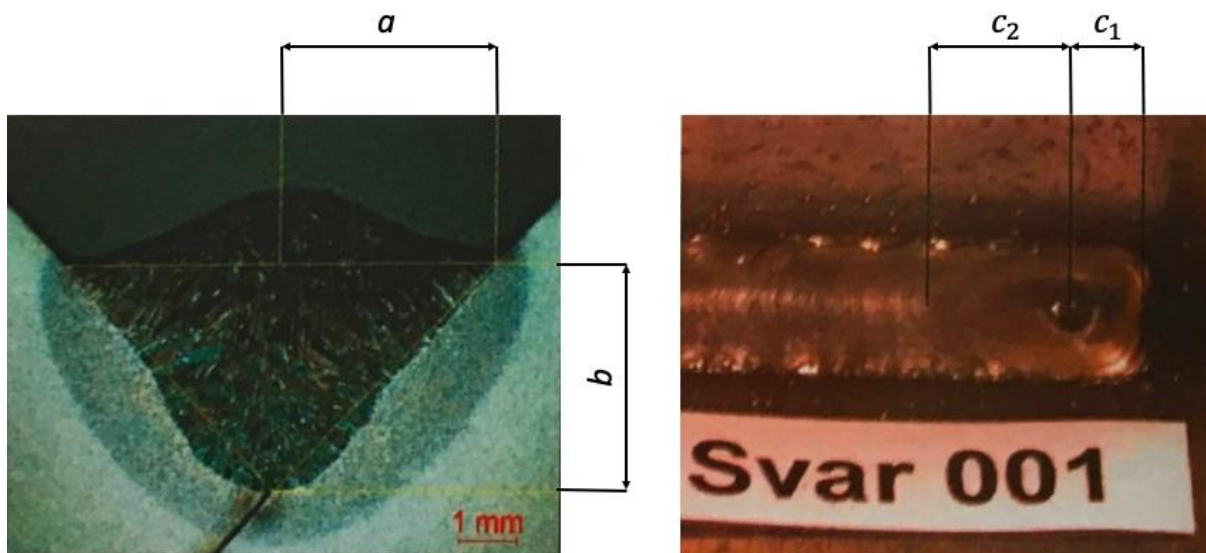


Obr. 3. 2 Dvojelipsoidný model zdroja tepla. [23]

O tom, koliko z celkového množství tepla vyprodukovaného zdrojom pôjde do jednotlivých elipsoidov, rozhodujú parametre f_1 a f_2 . Väčšinou smeruje 60 % energie do predného a 40 % energie do zadného elipsoidu. Pritom musí pre parametre platiť:

$$f_1 + f_2 = 2 \quad (3.7)$$

Aby bolo možné použiť dvojelipsoidný model, je potrebné poznať veľkosti natavenej oblasti (parametre a, b, c_1, c_2). Ideálnym prípadom je, ak sa uskutoční experiment a určia sa z makrovýbrusu (obr. 3.3).



Obr. 3. 3 Spôsob zisťovania parametrov natavenej oblasti a, b, c_1, c_2 . [16]

Dvojelipsoidný model (v nemodifikovanej podobe) nie je možné použiť ako všeobecný zdroj pre všetky prípady zvárania. Preto sa v súčasnej dobe používajú modifikované dvojelipsoidné zdroje tepla. Modifikácia spočíva v zmene koeficientov k, l, m v exponentoch (rov. 3.5 a 3.6). Tie čiastočne menia krivky v smere jednotlivých osí (tvar natavenej oblasti). Po modifikovaní je tento zdroj možné použiť pre väčšinu metód tavného zvárania, okrem zvárania laserom, plazmou a zväzkom elektrónov. [16,18,22,23]

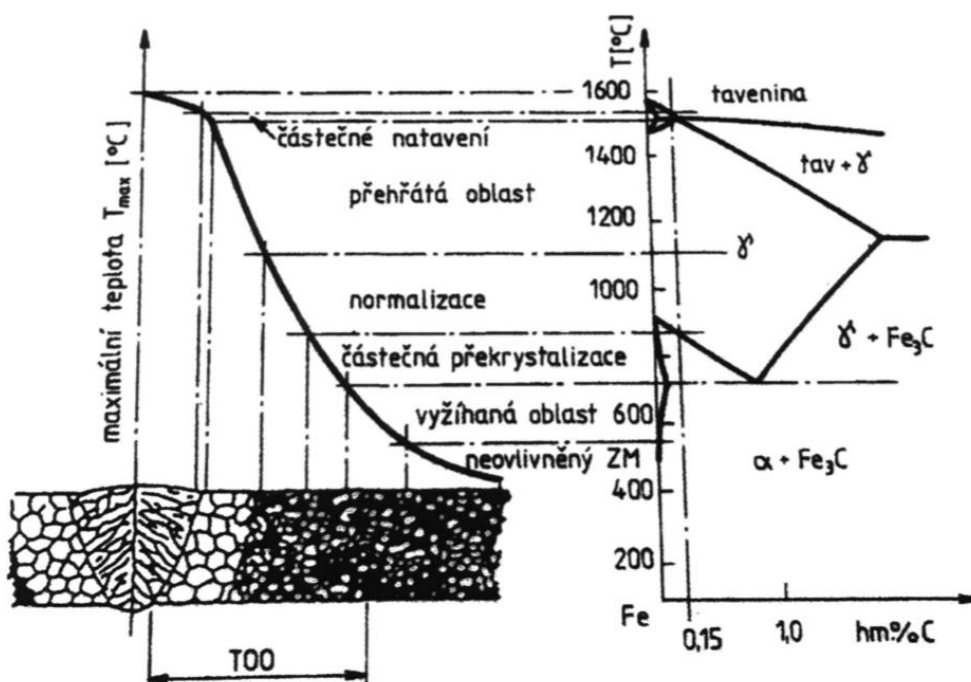
Numerické simulácie procesu zvárania založené na pohyblivých modeloch zdrojov tepla, ktoré sú popísané vyššie, v sebe zahrňujú určité zjednodušenia. Nepočítajú napríklad s prúdením v tavej kúpeli, vplyvom povrchovo-aktívnych prvkov, druhom ochranného plynu, priemerom drôtu alebo zmenou spôsobu prenosu kovu do materiálu. Vplyv týchto parametrov je možné čiastočne kompenzovať pomocou modifikácie matematického popisu určitého modelu zdroja tepla alebo spojením viac rôznych typov modelov dokopy. [16]

Ďalšie informácie o tepelných zdrojoch je možné nájsť v [24,25,26].

3.4 Metalurgická analýza

Teplotné cykly z predošlej analýzy sú základom výpočtu mikroštruktúrnych premien behom metalurgickej analýzy. Zmena mikroštruktúry tiež spätne ovplyvňuje výpočty tepelnej analýzy, kedy sa musia uvažovať latentné teplá fázových transformácií a fakt, že jednotlivé štruktúry môžu mať výrazne odlišné termofyzikálne vlastnosti (napr. ferit v porovnaní s austenitom). Z tohoto dôvodu prebieha v SYSWELD-e výpočet tepelnej a metalurgickej analýzy súčasne.

V metalurgickej analýze sa na základe rozloženia teplotných polí v čase, rýchlosti ohrevu a chladnutia rieši vznik a zmena materiálových štruktúr. Behom ochladzovania po zváraní dochádza ku kryštalizácii kovu a vzniku niekoľkých oblastí v tepelne ovplyvnenej zóne. Obrázok 3.4 zobrazuje tieto zóny v reze zvarového spoja z nelegovanej oceli.



Obr. 3. 4 Vplyv teplotných účinkov zvárania na štruktúru zvarového spoja. [28]

Výsledky metalurgickej analýzy závisia hlavne na chemickom zložení materiálu, podmienkach austenitizácie a veľkosti austenitického zrna. Tieto javy ovplyvňujú vzhľad transformačných diagramov. U ocelí nimi sú ARA a IRA diagramy.

Pri zváraní sa rozpad austenitu deje väčšinou anizotermicky, to znamená, že zmena neprebehne za konštantnej teploty. Preto sa vo zvaračskej praxi zvyčajne používajú ARA diagramy. Vo výpočtových programoch sa však tieto diagramy neukladajú v grafických formátoch, ako to býva v literatúre, ale pre vyčíslenie metalurgických pochodov behom zvárania sa používajú modely popisujúce kinetiku transformačných premien. Tieto modely sú najčastejšie odvodené z Johnson-Mehl-Avramiho zákona. [27,30]

3.5 Mechanická analýza

Cieľom tejto časti analýzy je určenie deformácií a napätí počas a najmä po procese zvárania. Mechanická analýza nadväzuje a preberá výsledky z tepelnej a metalurgickej analýzy. Teplotné polia v jednotlivých časových okamihoch sú jediným (deformačným) zaťažením pre túto časť. Jej výsledky ovplyvňuje okrem iného aj množstvo jednotlivých materiálových štruktúr.

Analýza deformácií a napätí je riešená v nelineárnej elasto-plastickej oblasti chovania materiálu s uvažovaním veľkých deformácií. Celková pomerná deformácia (pretvorenie) behom numerickej simulácie zvárania je riešená pomocou Leblondovho modelu (rov. 3.8). [29,30,31]

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_{th} + \varepsilon_p + \varepsilon_{tp} \quad (3.8)$$

ε - celkové pomerné pretvorenie [–]

ε_e - elastické pretvorenie [–]

ε_{th} - teplotné pretvorenie [–]

ε_p - plastické pretvorenie [–]

ε_{tp} - transformačná plasticita [–]

Okrem výsledkov tepelnej a metalurgickej analýzy sú pre účely mechanickej analýzy ďalšími vstupnými parametrami mechanické vlastnosti materiálu.

3.5.1 Potrebne materiálové vlastnosti

Pre mechanickú analýzu sú potrebné:

Veličina	Symbol	Jednotka
Koeficient teplotnej rozťažnosti	α	$[K^{-1}]$
Poissonovo číslo	μ	[–]
Modul pružnosti v ťahu	E	$[Pa]$
Medza klzu	Re	$[Pa]$
Modul spevnenia	Et	$[Pa]$

Tab. 3. 2 Potrebne mechanické vlastnosti materiálu.

Na rozdiel od termofyzikálnych, mechanické materiálové vlastnosti obvykle v literatúre dostupné nie sú a je nutné ich získať z mechanických skúšok vykonaných pre konkrétny materiál. Rovnako je nutné ich zadávať v závislosti na teplote (od izbovej teploty až do teploty tavenia materiálu) a v závislosti na type štruktúry materiálu.

3.5.2 Model materiálu

Ako už bolo spomenuté, analýza deformácií a napätí je zvyčajne riešená v nelineárnej elasto-plastickej oblasti chovania materiálu. Na jeho popis sú k dispozícii modely mechanickeho chovania: ideálne pružne-plastický model materiálu, plastický model s kinematickým spevnením materiálu, plastický model s izotropným spevnením materiálu a plastický model s kombinovaným spevnením materiálu. [14,27]

Model s izotropným spevnením materiálu je vhodný pre postupne (úmerne) narastajúce zaťaženie, ktoré nemeň charakter (ťah-tlak). To znamená, že nie je vhodný pre cyklické zaťažovanie (viacvrstvé zvaranie). Jeho výhodou je dobrá konvergencia.

Model s kinematickým spevnením materiálu je vhodný pre riešenie cyklicky zaťažovaných konštrukcií (napríklad viacvrstvé zvaranie). Tento model zahŕňa Bauschingerov efekt (rozdielnosť medze klzu v ťahu a tlaku).

Podľa [13] pri použití izotropného modelu spevnenia sú výsledky konzervatívne, takže vypočítané zvyškové napätia sú vyššie, ako v skutočnosti. Naopak pri použití kinematického modelu spevnenia sú vypočítané napätia nižšie, ako skutočné. Preto je v [13] odporúčané použitie kombinovaného modelu spevnenia. Pri ňom je však problémom určenie, akou veľkou časťou sa podieľa izotropné a kinematické spevnenie na celkovom napätí. [30]

V praxi sa pri simuláciách procesu zvarania väčšinou používa model s izotropným spevnením, preto bol v práci použitý či už vo výpočtoch v SYSWELD-e, ako aj vo výpočtoch v ANSYS-e.

Program SYSWELD umožňuje aj použitie viskoplastického modelu chovania materiálu. Popis tohoto modelu je však zložitý a veľkým problémom je získanie vstupných materiálových charakteristík. Touto problematikou sa zaoberá [4].

3.6 Výpočet tvrdosti

Softvér SYSWELD obsahuje modul, ktorý na základe teplotných a štruktúrnych výsledkov umožňuje výpočet tvrdosti. Tento výpočet je vykonávaný podľa empirických vzťahov, ktoré vychádzajú z chemického zloženia materiálu, štruktúry materiálu a rýchlosti ochladenia cez charakteristické teploty. Ďalšou možnosťou tohoto modulu je zistenie veľkosti austenitického zrna. [4,14]

3.7 Možnosti validácie výsledkov

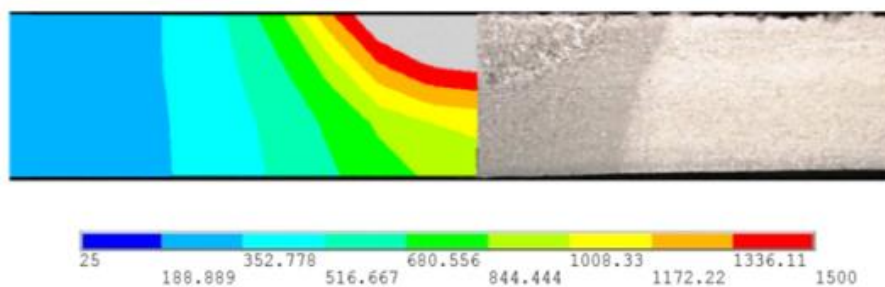
Výsledky numerických analýz je možné overiť pomocou experimentálnych meraní reálneho zvarania. Konkrétne je možné použiť: [30]

- a) Meranie teplotných cyklov pomocou termočlánkov. Meranie slúži na validáciu použitého teplotného zdroja a použitých materiálových charakteristík. Pre meranie sa využívajú minimálne tri termočlánky v rôznych vzdialenostiach od miesta zvaru. Toto overenie je približné a má skôr informačný charakter, pretože nalepenie termočlánkov je možné len s určitou presnosťou pričom teplota v tepelne ovplyvnenej oblasti môže mať gradient aj niekoľko sto stupňov na dĺžke 1 mm.
- b) Meranie tvrdosti (obr. 3.5). Ak sa zhoduje nameraná a vypočítaná tvrdosť cez teplotne ovplyvnenú oblasť, tak bol správne použitý tepelný zdroj a zároveň dobre nadefinovaný ARA diagram. V praxi často využívané a zároveň dôveryhodné overenie výsledkov výpočtového modelovania.



Obr. 3. 5 Príklad merania tvrdosti na makrovýbruse zvaru. [32]

- c) Porovnanie teplotne ovplyvnenej oblasti na makro výbrusoch (meranie vzdialeností čiar A_{c1} a A_{c3}). Podobne, ako porovnanie tvrdosti, ide o spoľahlivú možnosť overenia výsledkov simulácií (obr. 3.6).



Obr. 3. 6 Porovnanie natavenej a teplotne ovplyvnenej oblasti: vľavo- numerická simulácia vpravo- makrovýbrus. [15]

- d) Meranie zvyškových napätí. Podrobnejšie rozoberané v [kapitole 2.8.](#)
e) Meranie deformácií (posuvov). Ide o jednoduchú možnosť porovnania simulácie a experimentu. Avšak pri zistení rozdielov je zložité určiť ich príčiny.

4 Systém podstatných veličín

Pre problém týkajúci sa výpočtového modelovania procesu zvarovania bol vytvorený podľa [33] systém podstatných veličín, ktorý je možné rozdeliť na nasledujúce podmnožiny:

S0- Veličiny popisujúce okolie objektu

Pri riešenom probléme reprezentuje túto množinu teplota okolia.

S1- Veličiny popisujúce geometriu a topológiu objektu

Celková štruktúra objektu je daná výkresom zvarenca, ktorý popisuje geometriu a rozmiestenie jej jednotlivých častí voči sebe. Z hľadiska daného problému je najpodstatnejším rozmerom hrúbka zvaraného materiálu. Ďalej je dôležité o aký typ zvaru ide (kútový, tupý atď.).

S2- Veličiny popisujúce väzby a interakcie objektu s okolím

Jednotlivé časti zvarenca budú po procese zvarovania tvoriť nerozoberateľný spoj. Pri tomto procese môže byť zvarenec voľne položený alebo upnutý v prípravku. V prípade upnutia je dôležitý spôsob prevedenia a jeho tuhosť.

S3- Veličiny popisujúce aktiváciu objektu s okolím

Aktivácia objektu nastáva v okamihu začiatku procesu zvarovania.

S4- Veličiny popisujúce ovplyvnenie objektu okolím

Do tejto množiny patrí prestup tepla do okolia (podmienky chladnutia), prípadne teplota predohrevu alebo následné tepelné spracovanie.

S5- Veličiny popisujúce vlastnosti jednotlivých prvkov objektu

Tu patrí použitá metóda zvarovania (napr. taviacou sa elektródou, WIG, MIG/MAG) a parametre zvaracieho procesu, charakterizujúce množstvo vneseného tepla. Konkrétne ide o rýchlosť zvarovania, zvarací prúd a napätie. Dôležitý je aj počet zvarových húseníc a postupnosť ich kladenia. Ďalej do tejto množiny patrí druh základného a prídavného materiálu, ich chemické zloženie, model materiálu a model pohyblivého tepelného zdroja. Na popis materiálu sú potrebné materiálové vlastnosti (vypísané sú v [tab. 3.1](#) a [tab. 3.2](#)) vyjadrené v závislosti na teplote a štruktúre materiálu (ak ide o polymorfny materiál).

S6- Veličiny popisujúce procesy prebiehajúce na objekte

Pri procese zvarovania dochádza k tepelnému ovplyvneniu materiálu v dôsledku nerovnomerného rozloženia teplotných polí. Ďalej sa menia materiálové štruktúry behom ohrievania a ochladzovania, dochádza k zmenám mechanických vlastností v tepelne ovplyvnenej oblasti (tvrdosť, húževnatosť, ťažnosť) a ku vzniku zvyškových napätí a deformácií.

S7- Veličiny popisujúce prejavy (chovanie) objektu

Prejavy objektu sú dané deformáciami (celkovými posuvmi jednotlivých častí) a napätosťou, ktorá je charakterizovaná tenzorom napätia.

S8- Veličiny popisující důsledky projevov (chovania) objektu

Důsledkem zvyškových napětí a deformací může být překročení daných mezních stavov.

Okrem spomenutých veličín v jednotlivých podmnožinách, existujú ďalšie, ktoré môžu ovplyvňovať proces zvarovania a vznik zvyškových napätí a deformácií po ňom. Ide napríklad o prúdenie roztaveného kovu v tavnej kúpeli, prietokové množstvo a druh prídavného plynu, polarita elektródy, rýchlosť podávania drôtu, priemer drôtu (elektródy), sklon horáku voči povrchu zvarovaného kovu. Tieto veličiny sú pri výpočtovom modelovaní zanedbané, a to z rôznych príčin. Niektoré majú minimálny vplyv na vznik skúmaných zvyškových napätí a deformácií, ďalšie na základe dnešných poznatkov nie je možné zahrnúť do analýzy prípadne by to bolo mimo rozsah tejto diplomovej práce.

Podobne nie všetky veličiny popísané v podmnožinách S0-S8 sú uvažované pri jednotlivých výpočtoch. Napríklad pri výpočtoch v ANSYS-e nie sú uvažované fázové transformácie. Rozdiely a zjednodušenia pri uskutočnených výpočtoch sú podrobnejšie rozoberané v jednotlivých kapitolách práce.

4.1 Metóda riešenia a použitý softvér

Táto práca sa z hľadiska formulácie problému zaoberá priamym príčinným problémom. Vstupom do algoritmu riešenia sú podmnožiny S0-S5 a výstupom podmnožiny S6-S7. Konkrétnym cieľom je určenie zvyškových napätí a deformácií po procese zvarovania. Na vyriešenie tohoto problému bolo využité simulačné výpočtové modelovanie (numerické modelovanie). To bolo realizované pomocou výpočtových softvérov ANSYS a SYSWELD.

SYSWELD

Ide o výpočtový softvér špecializovaný na analýzy zvarovania a tepelného spracovania vyvíjaný od roku 1975. Program ponúka francúzska spoločnosť ESI Group. Softvér je založený na metóde konečných prvkov. Základom je združená tepelno-metalurgická analýza, na ktorú nadväzuje analýza mechanická a možný je aj výpočet tvrdosti (viac v [kap. 3](#)). Vzhľadom k prítomnosti databázy matematických modelov tepelných zdrojov je možné simulovať všetky technológie zvarovania elektrickým oblúkom, elektrónovým či laserovým lúčom, plazmou, plameňom a aj simulácie zvarovania elektrickým odporom. Softvér tiež umožňuje riešiť technológie spájkovania a tepelného spracovania (kalenia, žihania a popúšťania). Po zvaraní je možné analyzovať namáhanie dielov konštantnými či premenlivými silami, tlakmi a vyhodnotiť ich životnosť. [27]

SYSWELD je iba riešič, preto na tvorbu modelu a konečno-prvkovej siete bol použitý program Visual-Mesh, na definovanie zvarovania a jeho popis program Visual-Weld a na spracovanie výsledkov program Visual-Viewer.

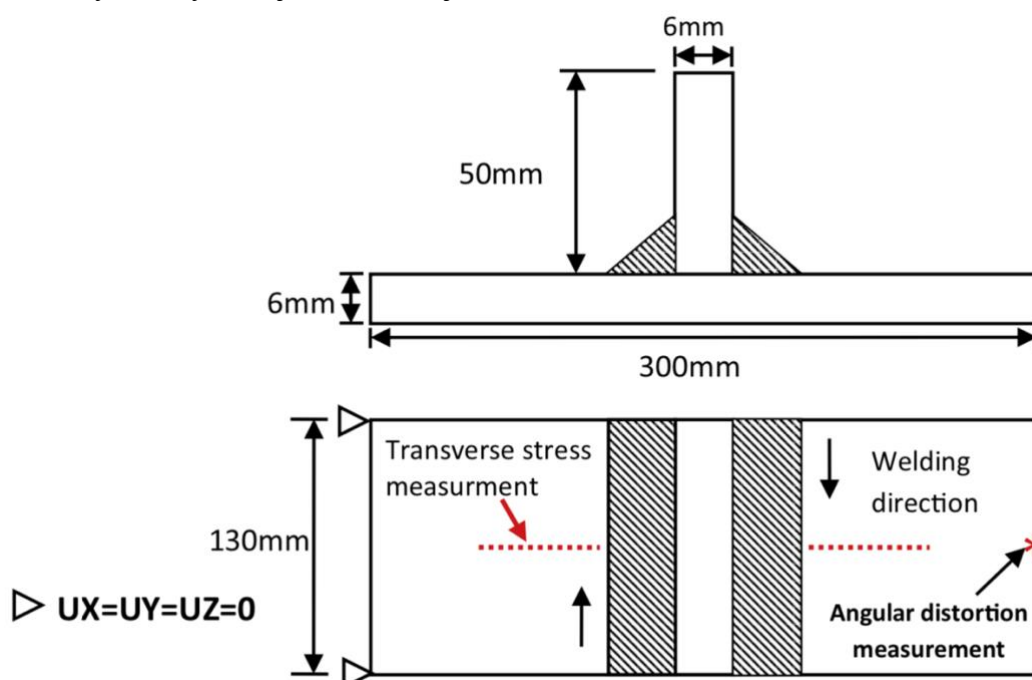
ANSYS

Je výpočtový softvér založený na metóde konečných prvkov. Konkrétne je v práci použité prostredie ANSYS Classic. Na riešenie problému bol vytvorený skript napísaný v jazyku APDL. To umožňovalo rýchlu zmenu zadaných vstupných parametrov modelu a aj algoritmu riešenia.

5 Kúťový zvar SYSWELD

Kapitoly 5 a 6 sa zaoberajú modelovaním procesu zvárania kúťového zvaru. Potrebné vstupné veličiny pre výpočtové modelovanie boli prevzaté z [34]. Dôvodom pre riešenie tohoto konkrétneho zvaru bolo viacero. V prvom rade potrebné vstupné veličiny pre zváranie tupého zvaru (kapitoly 8 a 9), ktoré sa aj fyzicky vykonalo, neboli v počiatkoch vznikania tejto práce dostupné. Kúťový zvar bol zvolený, pretože je z hľadiska modelovania procesu zvárania jednoduchší. Obe zvarové húsenice sú rovnaké a delí ich zvislá doska zvaru. Publikácia [34] ako zdroj dát bola zvolená kvôli hodnotám materiálových vlastností a možnosti overenia výsledkov, keďže v nej bolo vykonané experimentálne meranie zvyškových napätí a deformácií.

Riešený kúťový zvar je na nasledujúcom obrázku.

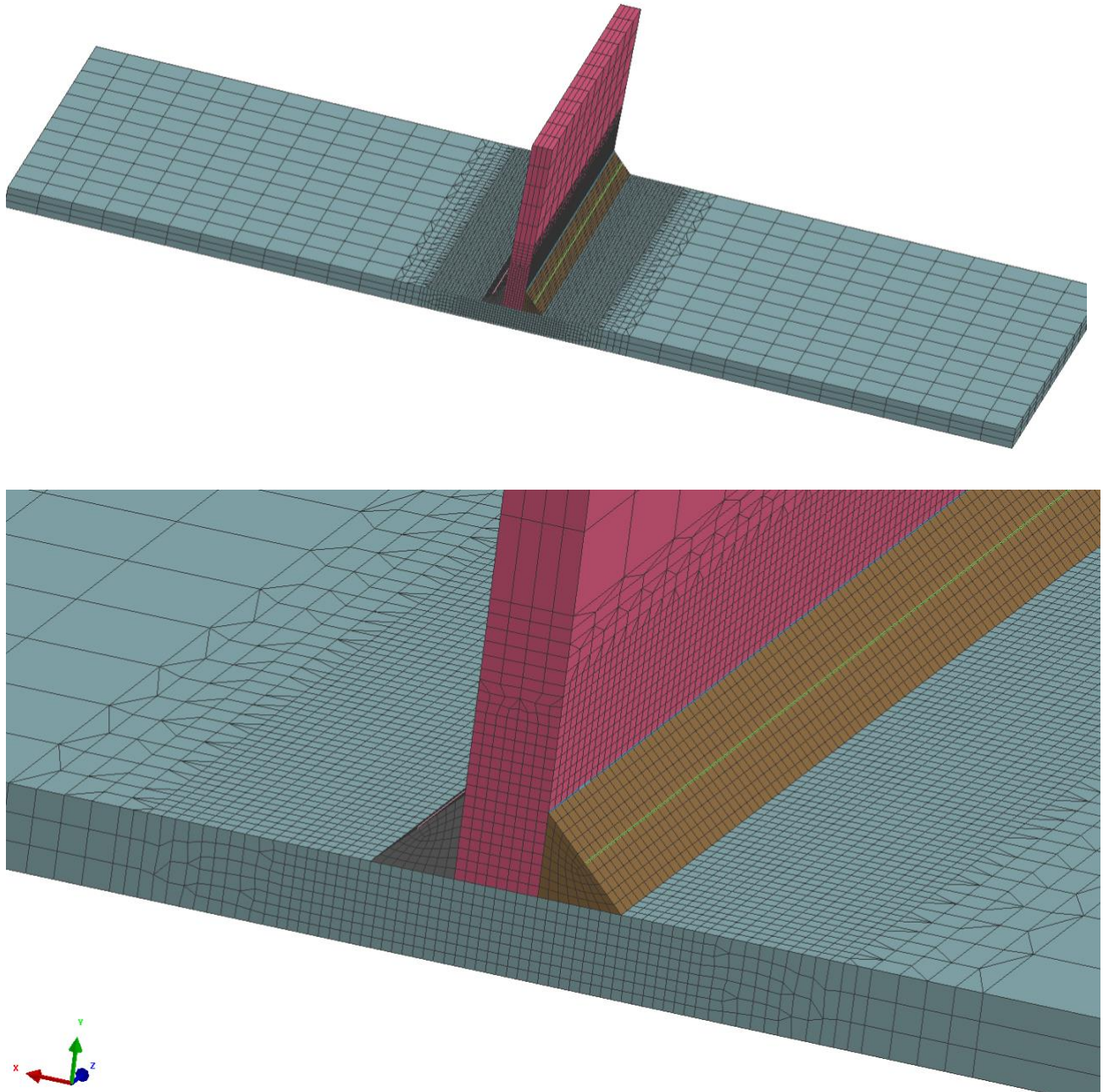


Obr. 5. 1 Riešený kúťový zvar s vyobrazenými základnými rozmermi, smerom zvárania a pozíciou experimentálneho merania zvyškových napätí a deformácií.

Základný materiál kúťového zvaru mal hrúbku 6 mm. Zváranie sa skladalo z 2 húseníc, každá v opačnom smere. Po ukončení prvej húsenice a vychladnutí zvaru sa začalo so zváraním druhej. Zváranie prebiehalo taviacou sa elektródou v ochrannom plyne metódou MAG. Výpočtové modelovanie bolo vykonané pomocou softvéru SYSWELD. Všetky telesá boli od začiatku spojené (modelované ako jedno teleso skladajúce sa z viacerých častí). Efekt pridávania materiálu je v SYSWELD-e zahrnutý pomocou postupného rodenia sa elementov (viac v [kap. 5.3](#)). Výpočtové modelovanie procesu zvárania je založené na spojenej teplo-metalurgicko-mechanickej tranzientnej analýze. Jej vytváranie a výsledky sú prezentované v nasledujúcich kapitolách.

5.1 Geometria a sieť

Geometria a sieť kútového zvaru boli vytvorené v programe Visual-Mesh. Rozmery sú prevzaté z [34] a vidno ich na predošlom obrázku (obr. 5.1).

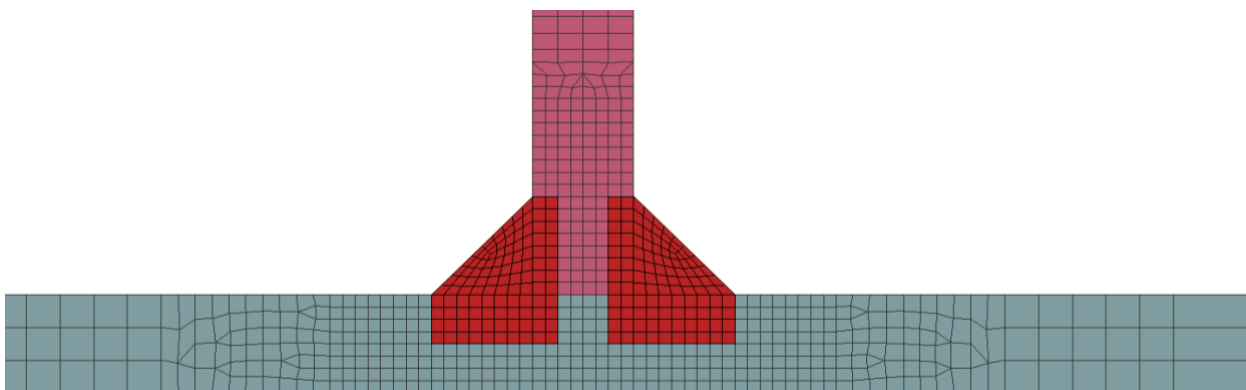


Obr. 5. 2 Vytvorená konečno-prvková sieť (hore) a detail na jej zahustenie v okolí zvaru (dole).

Po zhotovení geometrie a konečno-prvkovej siete, ktorá bola zhustená v okolí zvaru kvôli veľkým teplotným gradientom, sa vytvorila takzvaná obálka. Obálku tvoria 2D elementy, reprezentuje povrch geometrie a slúži neskôr na definovanie prestupu tepla do okolia.

Následně se vybrali elementy, do kterých bude proudit teplo z pohyblivého tepelného zdroje (červené elementy obr. 5.3). Do zbytných elementů proudí teplo iba sekundárne, pomocou vedenia tepla v materiáli. Skupina označených (červených) elementů sa vloží do tzv. collectoru. Za názov konkrétneho collectoru je možné pridať príponu (v tomto prípade `_LOAD`), vďaka čomu softvér automaticky tento collector rozpozná a priradí mu požadovanú funkciu. Prípon je viacero druhov a urýchľujú prácu s programom.

Tvar a množstvo vybraných elementů, do ktorých bude teplo prúdiť priamo, umožňuje upravovať veľkosť a tvar natavenej oblasti. Táto možnosť sa hodí hlavne pri metódach zvarovania, u ktorých má tavný kúpel výrazne iný tvar ako elipsový, to znamená, keď nestačí meniť rozmery zdroja tepla.

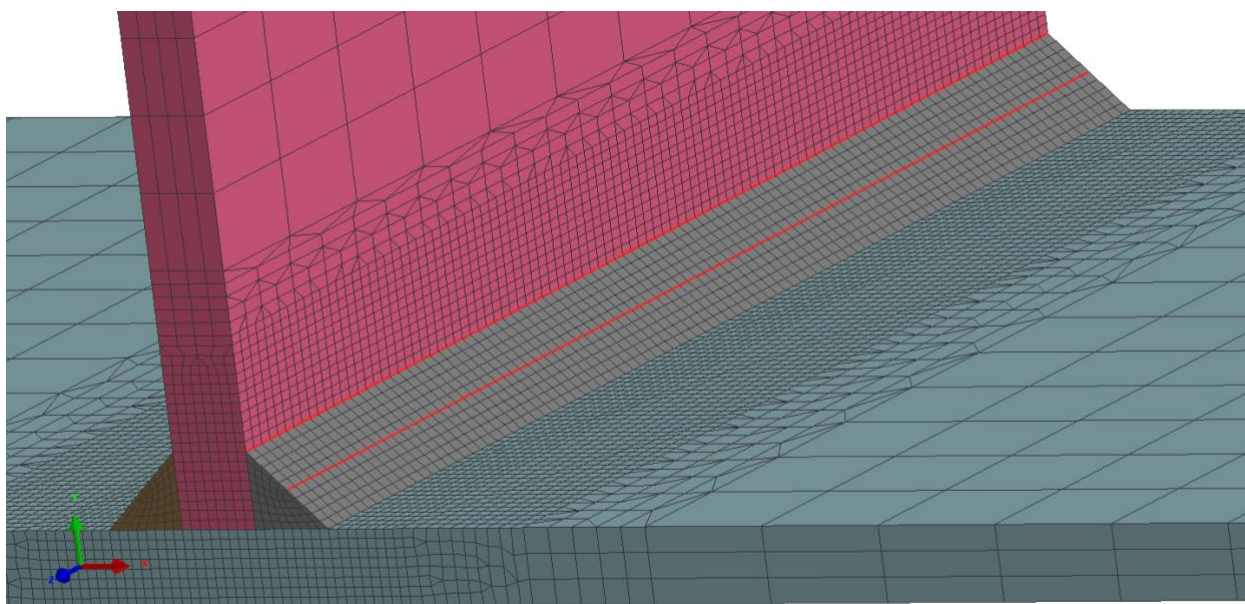


Obr. 5. 3 Vybrané elementy, do ktorých teplo prúdi priamo z tepelného zdroja.

Ako posledné sa v tejto časti vložili do collectorov (s príponou `_CLAMP`) uzly, slúžiace na neskoršie definovanie upnutia zvarenca.

Ďalej sa už prešlo do programu Visual-Weld. Tu sa podobne pomocou collectorov pre každú zvarovú húsenicu definovali trajektória a referencia (červené čiary obr. 5.4). Trajektória určuje cestu, po ktorej sa pohybuje tepelný zdroj a referencia zase lokálny súradnicový systém.

Konečno-prvkovú sieť vo výsledku tvorilo 92 342 elementů, z toho 3D elementů bolo 73818 (základný a prídavný materiál), 2D elementů bolo 18124 (obálka pre prestup tepla) a 1D elementů bolo 400 (trajektória a referencia).



Obr. 5. 4 Trajektória- červená čiara v strede prídavného materiálu, referencia- čiara na okraji prídavného materiálu.

5.2 Materiál

V module s názvom Welding Advisor sa definujú vlastnosti, tepelný zdroj, okrajové podmienky a nastavenia samotného výpočtu procesu zvárania.

Medzi prvé nastavenia patrí definovanie vlastností materiálu. Základným materiálom, ktorý sa zváral, bola oceľ S355. V publikácií [34], z ktorej sú prebraté vstupné veličiny, síce sú popísané materiálové vlastnosti v závislosti na teplote, ale nie na štruktúre materiálu. To by znemožnilo výpočet fázových transformácií a rovnako tvrdosti po zváraní. Visual-Weld obsahuje databázu najčastejšie používaných materiálov. Jej súčasťou je aj oceľ S355J2G3, obsahujúca potrebné materiálové vlastnosti meniace sa v závislosti na teplote a štruktúre a tiež definovaný ARA diagram. Na výpočty bola teda použitá oceľ S355J2G3.

S355J2G3 je upokojená akostná oceľ vhodná pre zváranie oceľových konštrukcií a strojných súčastí s vyššou medzou klzu, ktoré sú namáhané staticky i dynamicky. Podľa normy ČSN EN 10027-1 má materiál minimálnu medzu klzu 355 MPa a zaručenú KV pri -20 °C 27 J. V nasledujúcej tabuľke je porovnané chemické zloženie oceli podľa normy a zloženie oceli z databázy Visual-Weld: [8]

	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]
Norma	max. 0,20	max. 0,55	max. 1,6	max. 0,035	max. 0,035
Databáza	0,18	0,47	1,24	0,029	0,029

Tab. 5. 1 Porovnanie chemického zloženia oceli S355J2G3.

V publikácií [34], z ktorej sa čerpalo, sa zanedbáva vplyv fázových transformácií a preto prídavný materiál je zhodný so základným. Boli vykonané výpočty s rovnakým prídavným a základným materiálom a výpočty s prídavným materiálom S460MC. Na zvyškové napätia a deformácie to nemalo takmer žiadny vplyv. V praxi sa takmer výlučne zvara s rozdielnym prídavným a základným materiálom, preto boli výpočty prezentované v tejto práci vykonané s uvažovaním prídavného materiálu S460MC. Táto oceľ bola zvolená kvôli nižšiemu obsahu uhlíku (0,12 %), čo malo za následok reálnejšie výsledky rozloženia štruktúr a tvrdosti po zvaraní. Materiálové vlastnosti pre oceľ S460MC nie sú v základnej databáze Visual-Weldu, pre účely tejto práce ich poskytla firma MECAS ESI s.r.o .

Na popis chovania materiálu bol použitý model s izotropným spevnením materiálu.

5.3 Proces zvarania

Ako prvá sa v tejto časti definuje metóda zvarania. Podľa nej si softvér (Visual-Weld) zvolí vhodný model zdroja tepla. Konkrétne sa zvaralo metódou MAG, a preto bol zvolený dvojelipsoidný model zdroja tepla, ktorý je bližšie popísaný [na strane 31](#) tejto práce. Keďže sa v predošlej časti vhodne nazvali časti geometrie a collectory (použitie prípony), softvér automaticky vybral prídavný materiál určený pre danú zvarovú húsenicu, elementy do ktorých má priamo prúdiť teplo a podľa trajektórie a referencie určil, kadiaľ a s akým sklonom sa bude zdroj tepla pohybovať.

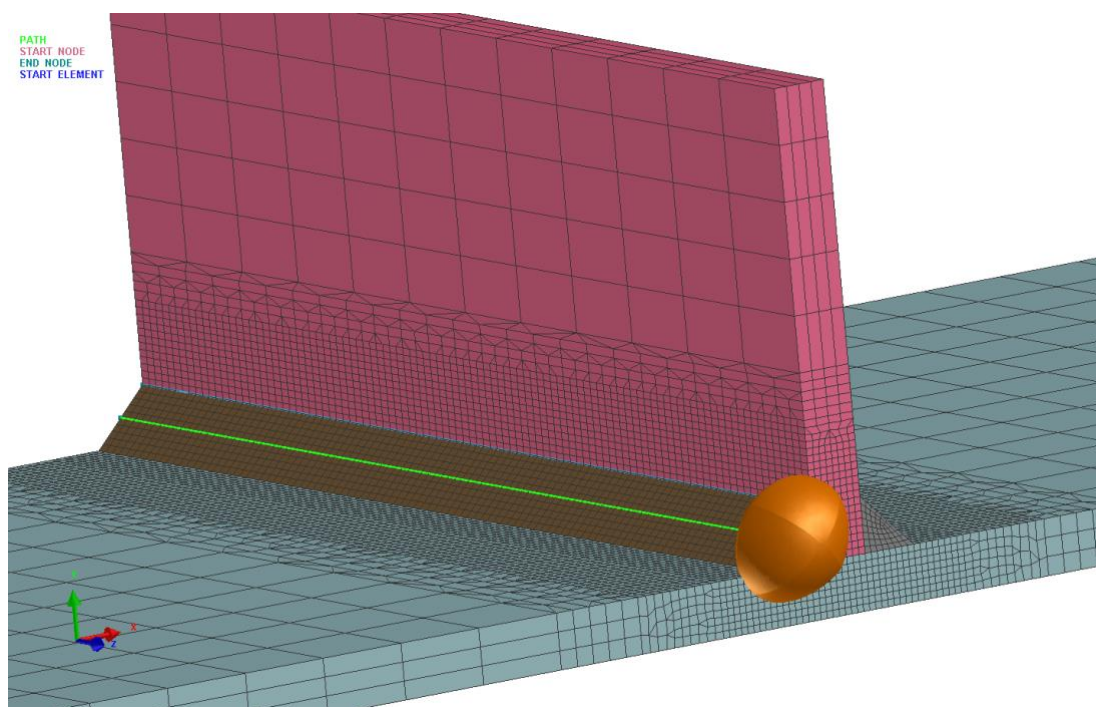
Následne sa definujú parametre samotného zvaracieho procesu. Použité veličiny sú zhodné pre obe zvarové húsenice a ich hodnoty sú v nasledujúcej tabuľke.

Rýchlosť zvarania	Napätie	Prúd	Účinnosť prenosu eklektického oblúku
8,3 mm/s	30 V	290 A	0,85

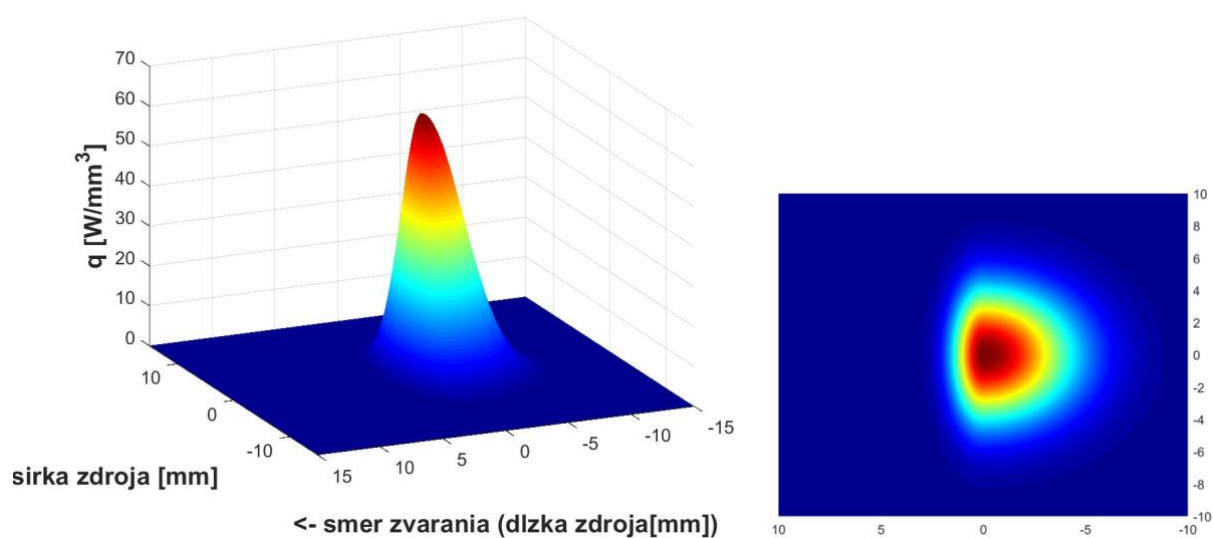
Tab. 5. 2 Použité parametre zvaracieho procesu.

Veličiny rýchlosť, počiatkový čas zvarania a merné vnesené teplo sa zadávajú priamo. Merné vnesené teplo je vypočítané podľa [vzťahu 3.1](#).

Ďalšou skupinou veličín, ktoré je nutné zadať, sú rozmery tepelného zdroja. Konkrétne ide o dĺžku, šírku a penetráciu. V ideálnom prípade sa určujú z makrovýbrusov, ako ukazuje [obrázok 3.3](#). Tie však neboli k dispozícii. Preto bol vytvorený krátky model s päťtinovou dĺžkou v smere zvarania. Ten významne šetril výpočtový čas. Vykonalo sa niekoľko desiatok výpočtov, kedy sa hľadali rozmery tepelného zdroja. Správnosť týchto rozmerov sa odhadovala podľa maximálnej dosiahnutej teploty v tavnej kúpeli, rozmerov tavnej kúpele, natavenia základného materiálu a neskôr aj podľa výsledkov mechanickej analýzy. Konečný použitý model je vidieť na obrázku 5.5. Objemovú hustotu tepelného toku (q), ktorá model reprezentuje, znázorňuje obrázok 5.6 (vytvorený v MATLAB-e). Rozloženie veličiny q je ešte limitované elementami zahrnutými v collectore s príponou `_LOAD` ([obr. 5.3](#)). Tie obmedzujú hustotu tepelného toku a spôsobujú jej prerozdelenie.



Obr. 5. 5 Tepelný zdroj.



Obr. 5. 6 Objemová hustota tepelného toku použitého zdroja (vpravo pohľad zhora).

Softvér obsahuje aj rôzne pokročilejšie možnosti nastavení, ako napríklad možnosť korekcie množstva tepla na začiatku a konci zvarovania, aby simulácia čo najlepšie odpovedala skutočnosti. Nastavenia, prezentované v tejto kapitole, je potrebné vykonať pre každú zvarovú húsenicu samostatne.

Počas procesu zvarovania sa mení geometria zvarenca (pridáva sa zvarový materiál). V SYSWELD-e je tento jav reprezentovaný postupným rodením sa elementov. To znamená, že už na začiatku je vytvorená geometria aj s prídavným materiálom. Elementy prídavného materiálu sú však neaktívne (majú priradené veľmi malé hodnoty materiálových vlastností) a

neovplyvňujú výpočet. K ich zrodeniu dôjde, až keď daný element dosiahne určitú teplotu (dostane sa k nemu tepelný zdroj). To znamená, že elementy zvarovej húsenice, ktoré sú pred tepelným zdrojom sú neaktívne a rovnako sú neaktívne všetky elementy húseníc, ktoré sa ešte len budú zvärať.

5.4 Okrajové podmienky

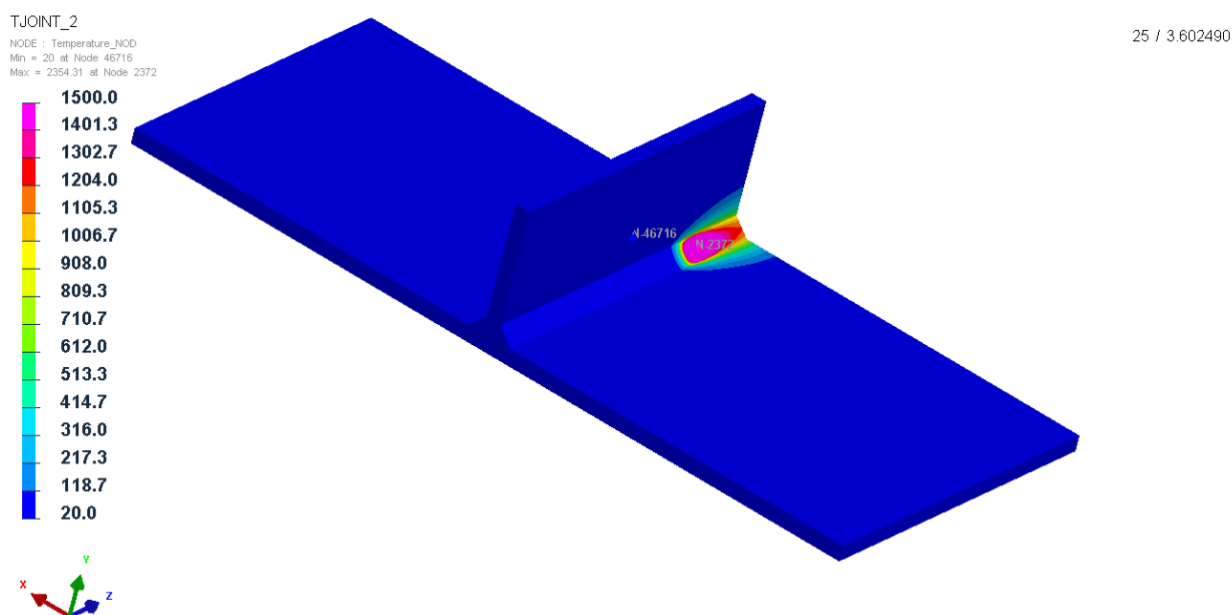
Ako prvé sa nastavili podmienky chladnutia. Išlo o voľné chladnutie na vzduchu s teplotou 20 °C. Počítalo sa celkovo do času 3000 s od začiatku zvarovania prvej húsenice. Druhá húsenica sa pritom začala zvärať v čase 500 s.

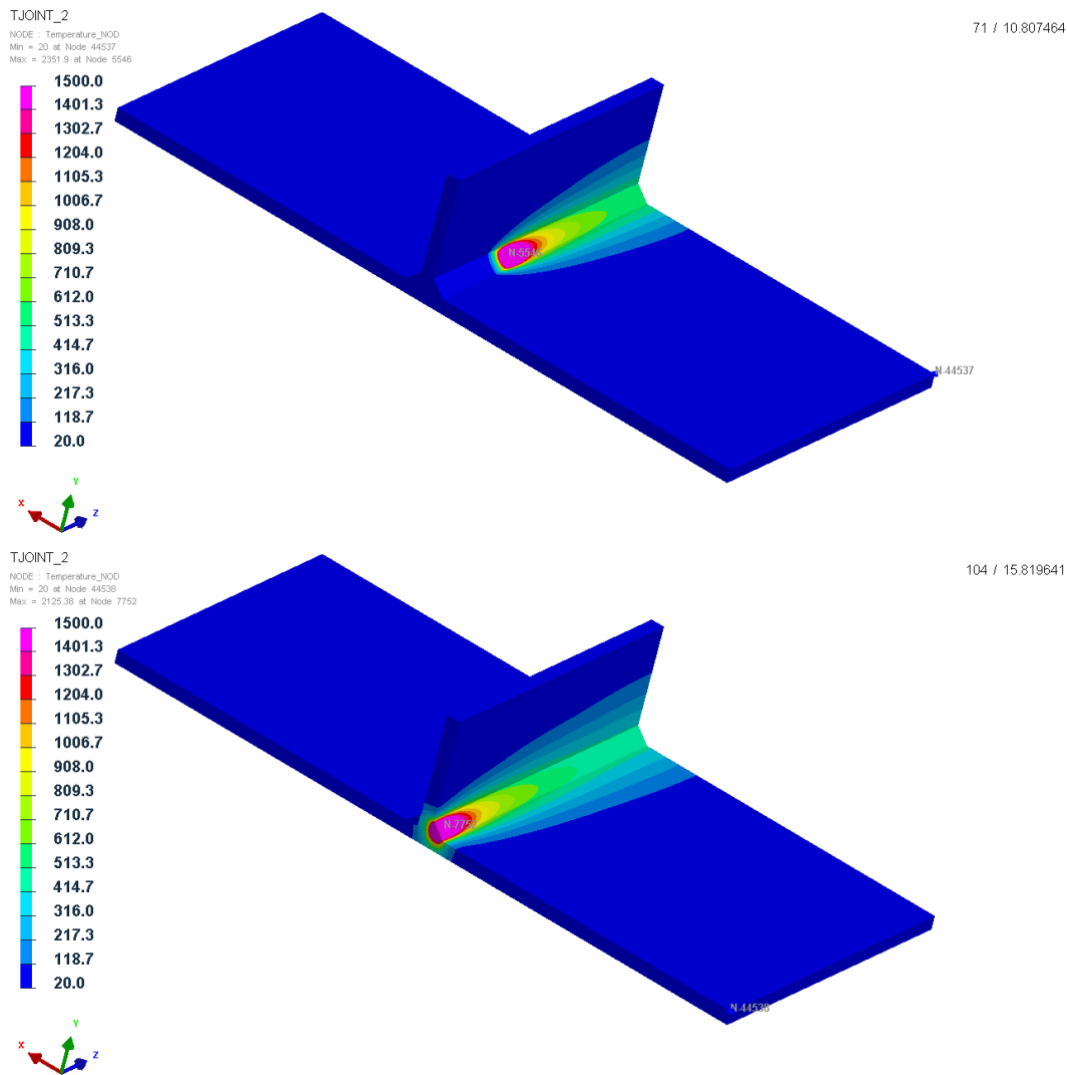
Zvarenc bol upnutý (obr. 5.1) tak, že boli zamedzené všetky posuvy na dvoch krajných hranách spodnej dosky základného materiálu.

5.5 Výsledky tepelnej analýzy

Výsledky boli spracovávané v prostredí Visual-Viewer.

Prejazd tepelného zdroja v rôznych fázach tvorby zvarovej húsenice je vidieť na nasledujúcich obrázkoch. Maximálna teplota kovu vo zvarovej kúpeli sa pohybovala okolo hodnoty 2350 °C.





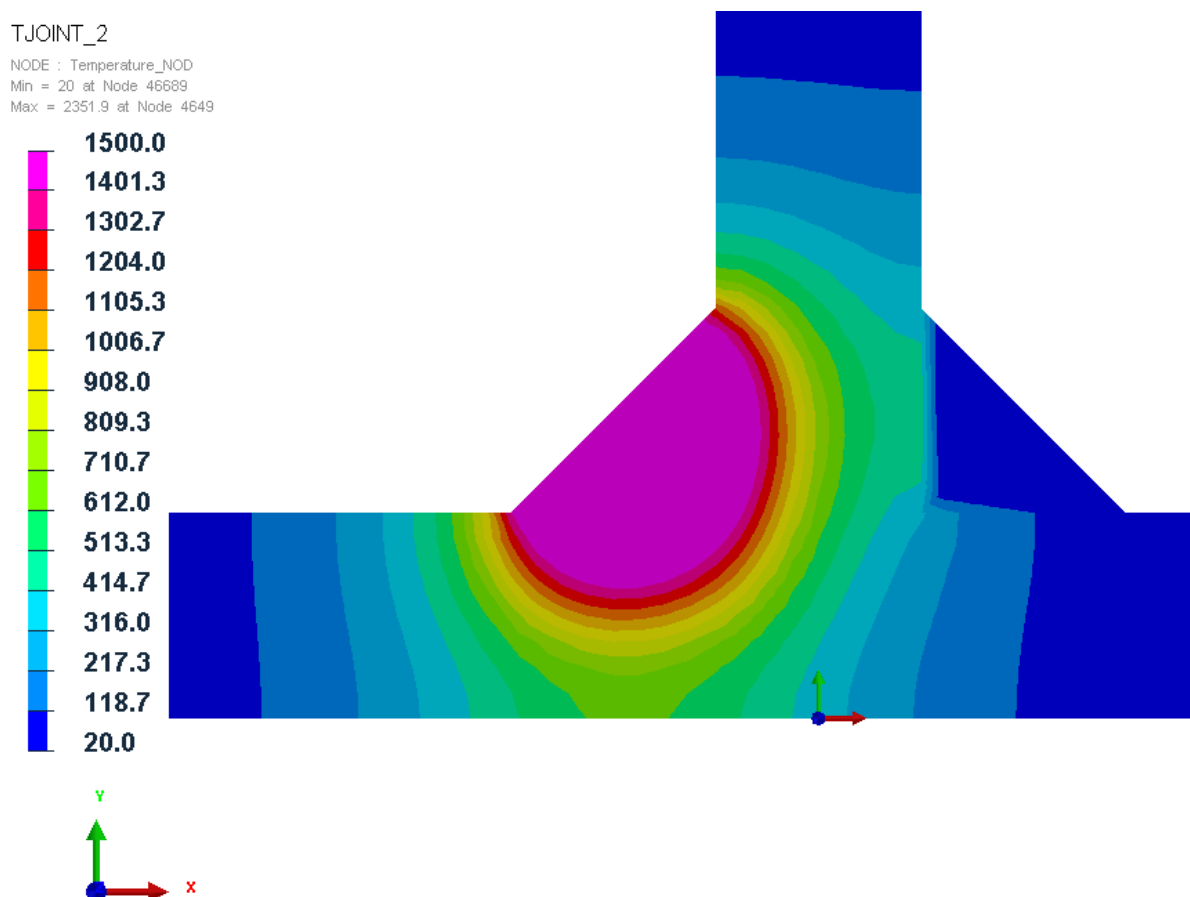
Obr. 5. 7 Prejazd tepelného zdroja v rôznych časoch.

Veľký vplyv na veľkosti a rozloženie zvyškových napätí a deformácií po zváraní má veľkosť a tvar natavenej oblasti. Táto oblasť riešeného kútového zvaru je zobrazená v reze na obrázku 5.8. V ideálnom prípade sa porovnáva s makrovýbrusom zvaru ako naznačuje [obrázok 3.6](#).

Kvôli prehľadnosti a ľahšej identifikácii je na obrázkoch pozmenená farebná škála. Maximálna hodnota je daná na hodnotu 1500 °C, čo reprezentuje približnú hodnotu tavenia ocele. Takže všetok materiál nad touto teplotou, reprezentovaný tou istou (fialovou) farbou, znázorňuje roztavený kov. Dôležité pritom je, aby bol roztavený prídavný materiál a aj časť základného materiálu. To odpovedá správne vykonanému reálnemu zváraníu.

Prezentovaná je natavená oblasť iba prvej zvarovej húsenice, pretože druhá bola zváraná rovnakými parametrami a mala teda rovnaký tvar.

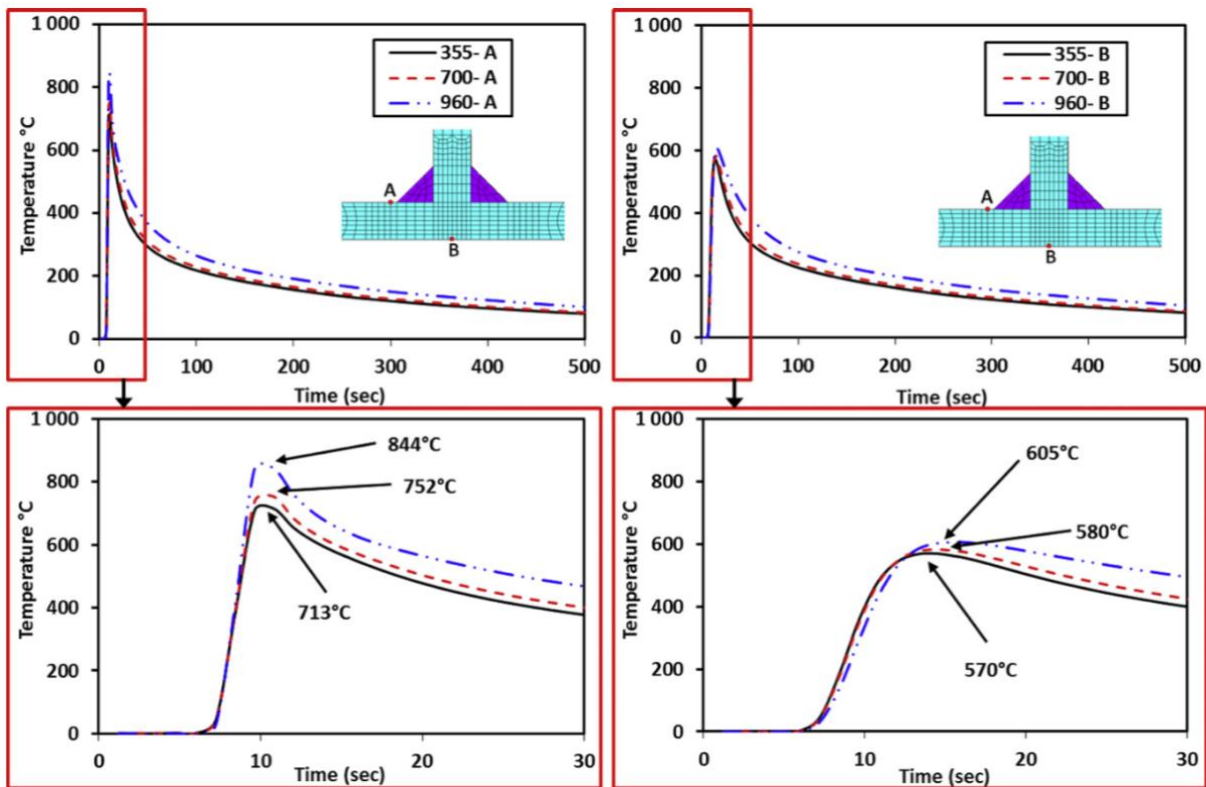
Na obrázku 5.8 je vidieť už spomínaný jav, že elementy prídavného materiálu druhej húsenice sú neaktívne a neprúdi do nich teplo počas zvárania prvej húsenice, pretože tam pri reálnom zváraní ešte nie sú.



Obr. 5. 8 Tvar natavenej oblasti počas zvárania.

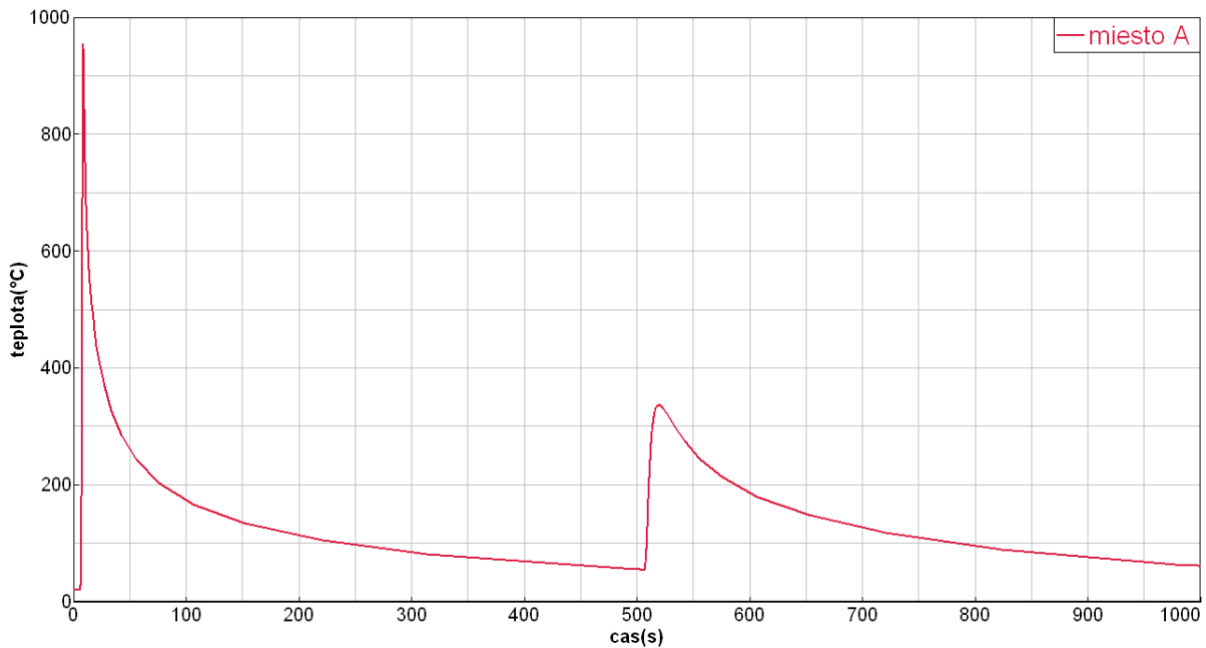
V [34] boli jedinými publikovanými výsledkami tepelnej analýzy priebehy teplôt v čase (obr. 5.9). Tie navyše neboli merané pomocou termočlánkov, ale sú vykreslené z výpočtového modelovania vykonaného v ANSYS-e. To neuvažovalo fázové transformácie v materiály. Navyše v [34] nie je uvedené aký (a či vôbec) bol použitý pohyblivý model zdroja tepla. Je totiž možné, že kvôli šetreniu značného času či už pri tvorbe zdroja tepla, pri hľadaní jeho rozmerov, alebo pri samotnom výpočte, bolo teplo do materiálu vložené naraz. Tento spôsob analýzy je možný, no ide o značné zjednodušenie skutočného procesu zvárania. Preto priebehy teplôt na obr. 5.9 treba brať skôr ako informačné.

Obrázok 5.9 sa skladá zo 4 grafov. Horné grafy reprezentujú priebehy teplôt do času 500 s (začiatok zvárania druhej húsenice). Spodné zobrazujú detail na čas dosiahnutia maximálnej teploty v danom mieste. Bod A, v ktorom sa teplota vykresľovala, sa nachádza na povrchu základnej dosky zvaru 1 mm od zvarovej húsenice. Priebehy teplôt v tomto mieste reprezentujú ľavé grafy. Bod B je zase v strede spodnej strany základnej dosky zvaru. (body A a B ukazuje aj detail modelu v horných grafoch). Každý graf obsahuje 3 priebehy teplôt. To preto, že v [34] sa skúmali 3 rôzne oceli (S355, S700 a S960). Pre túto prácu sú zaujímavé len čierne krivky reprezentujúce oceľ S355.

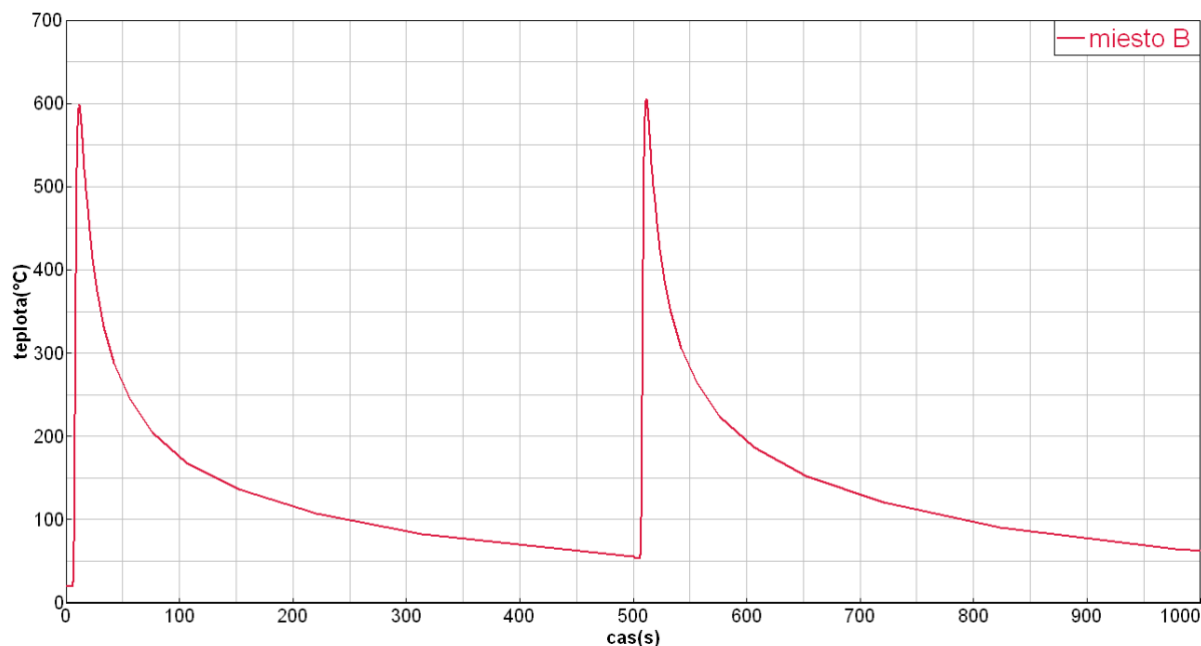


Obr. 5. 9 Priebeh teplôt v čase (bod A grafy vľavo, bod B grafy vpravo). [34]

Priebehy teplôt získané pomocou výpočtového modelovania v SYSWELD-e sú na nasledujúcich obrázkoch.



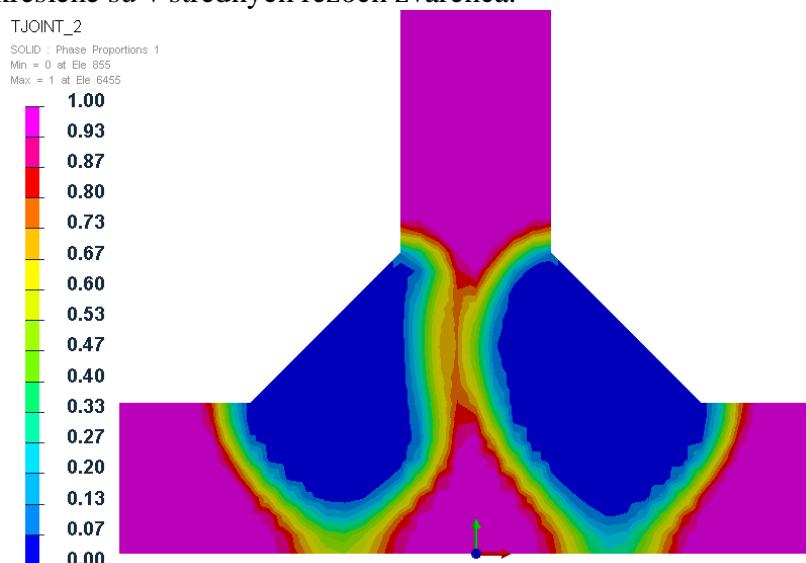
Obr. 5. 10 Priebeh teploty v mieste A.



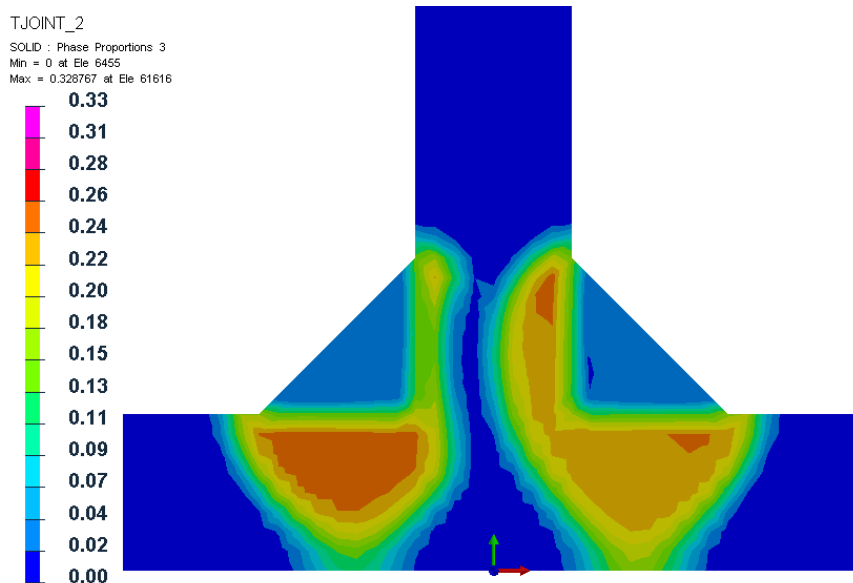
Obr. 5.11 Priebeh teploty v mieste B.

Obrázok 5.10 zobrazuje priebeh teploty do času 1000 s v mieste A a obr. 5.11 v mieste B. Obsahujú dva vrcholy, ktoré reprezentujú dva prejazdy tepelného zdroja pri tvorbe oboch zvarových húseníc. Po porovnaní priebehov a maximálnych hodnôt z týchto obrázkov s hodnotami z obr. 5.9 je možné konštatovať, že bola dosiahnutá relatívne dobrá zhoda. Najväčší rozdiel je v maximálnej teplote v mieste A pri tvorbe prvej húsenice. Toto miesto sa však nachádza v okolí hranice tepelne ovplyvnenej oblasti, kde na jednom milimetri môže dosahovať gradient teploty aj niekoľko sto °C (vidieť to na [obr. 5.8](#)).

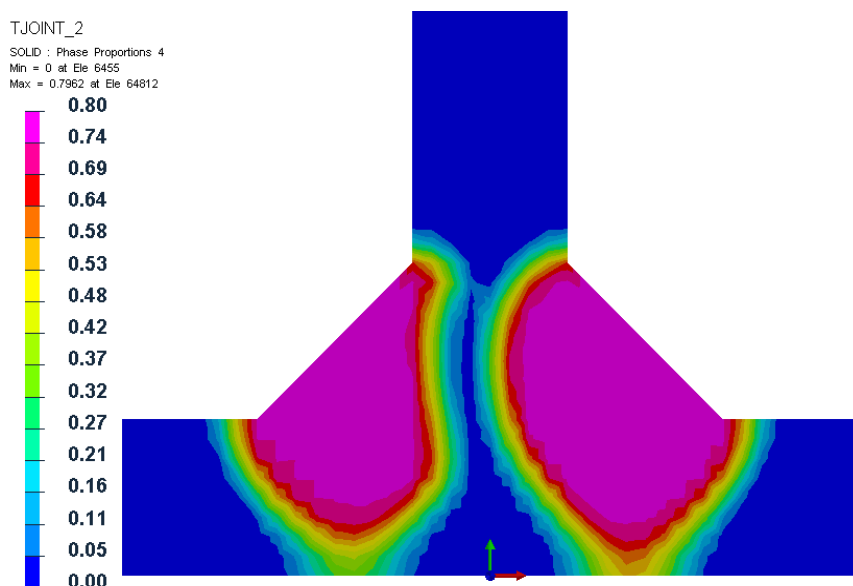
Rozloženia štruktúr (fáz) po procese zvárania kútového zvaru sú na nasledujúcich obrázkoch. Vykreslené sú v stredných rezoch zvarenca.



Obr. 5.12 Obsah feriticko-perlitickej štruktúry po zváraní.



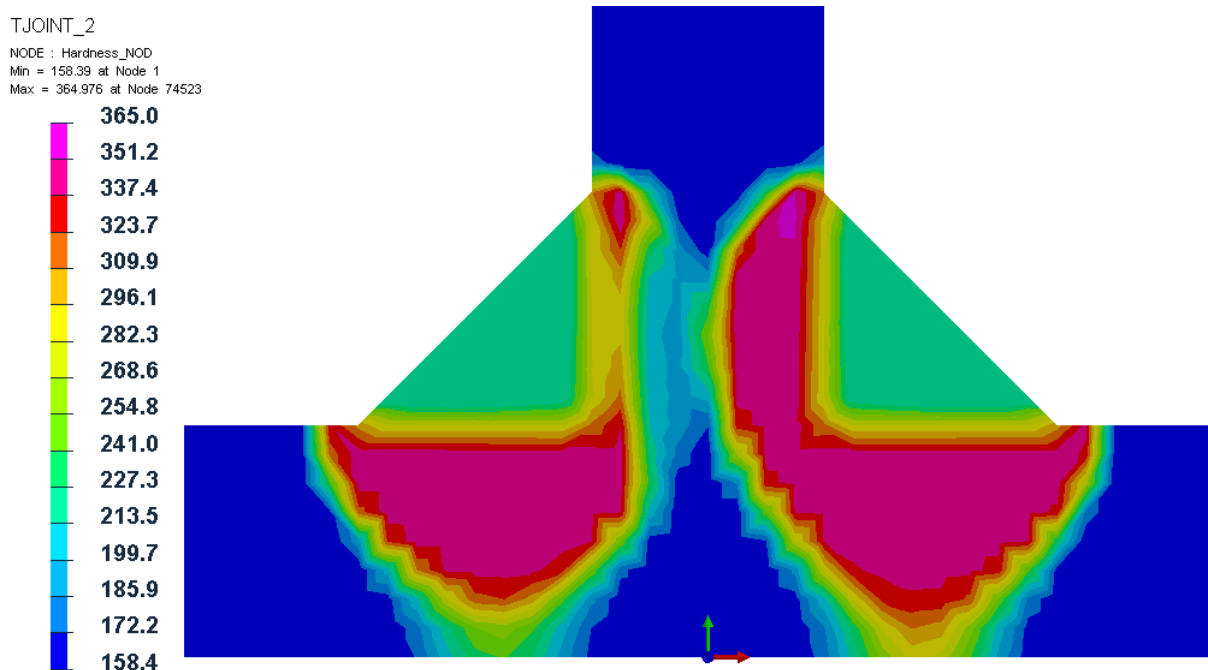
Obr. 5. 13 Obsah martenzitu po zváraní.



Obr. 5. 14 Obsah bainitu po zváraní.

5.6 Výsledky výpočtu tvrdosti

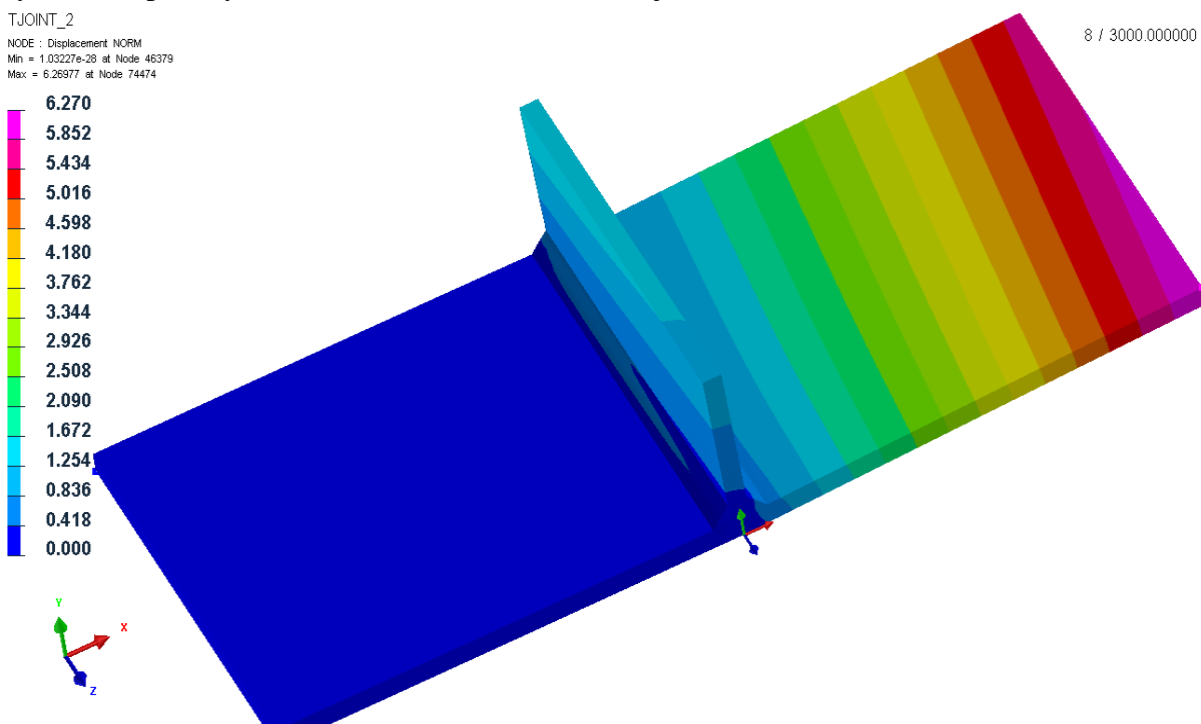
Tvrdość materiálu po zváraní podľa Vickersa [HV] znázorňuje obrázok 5.15. Ide o často používanú možnosť kontroly modelovania procesu zvárania. Výsledky tvrdosti sú však citlivé na hodnoty vstupných materiálových parametrov. Pre ilustráciu, oceľ S355 má podľa normy definovaný obsah maximálne 0,2 % uhlíku. To však znamená, že uhlíku môže byť 0,1 % alebo napríklad 0,18 % (toľko má S355 v databáze Visual-Weldu). Stále pritom ide o oceľ S355, no z metalurgického hľadiska ide o rozdielne materiály, u ktorých sa bude líšiť aj hodnota vypočítanej tvrdosti.



Obr. 5. 15 Tvrdost materiálu po zváraní.

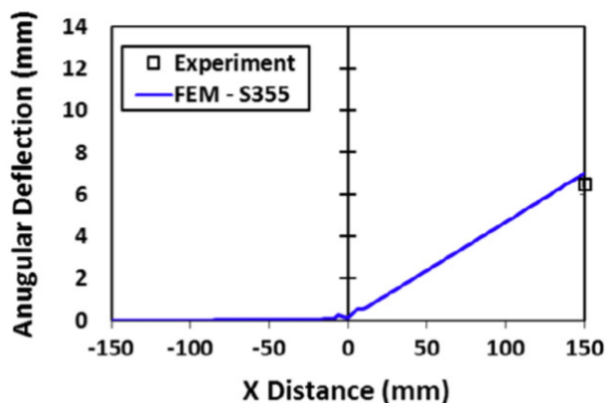
5.7 Výsledky mechanické analýzy

Na nasledujícím obrázku je vidět, ako sa kútový zvar zdeformoval. Konkrétne sú vykreslené posuvy s maximálnou hodnotou dosahujúcou takmer 6,3 mm.



Obr. 5. 16 Posuvy po zváraní kútového zvaru.

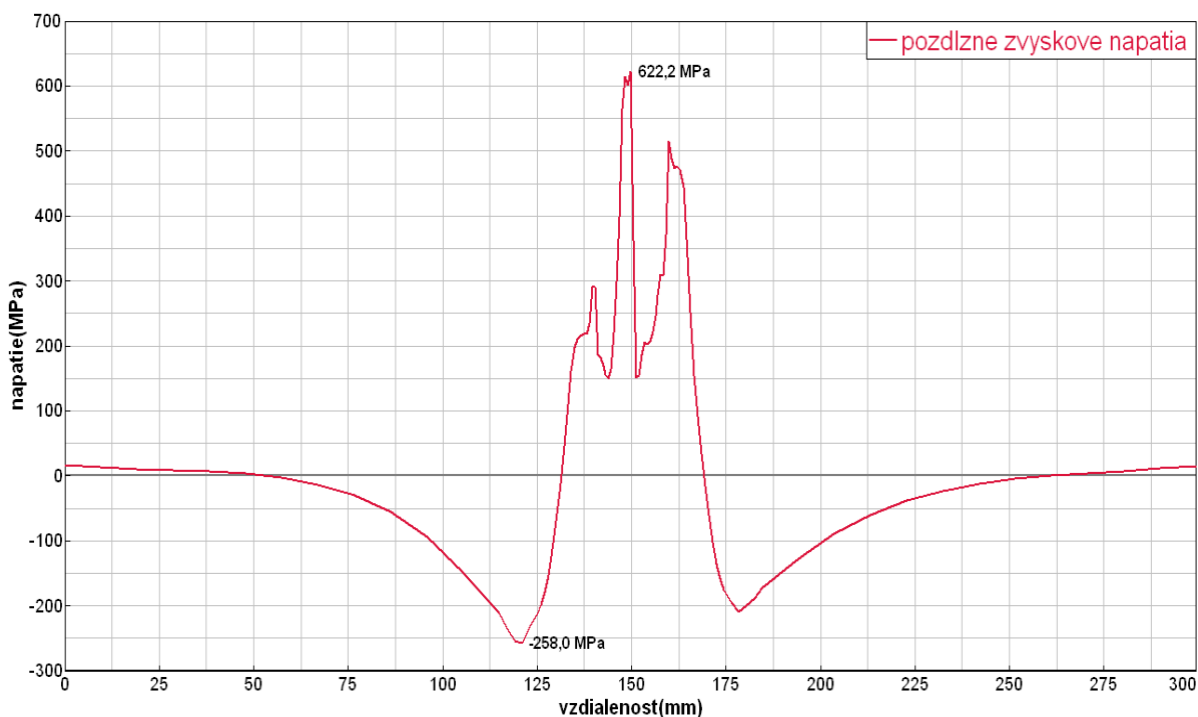
Experimentálně zmeraná hodnota maximálneho posuvu po zváraní (čierny štvorec obr. 5.17) bola približne 6,2 mm. Presné miesto merania je vidieť na [obr. 5.1](#). Vypočítaný posuv v tomto mieste vyšiel 5,96 mm.



Obr. 5. 17 Experimentálne zmeraná hodnota maximálneho posuvu po zváraní. [34]

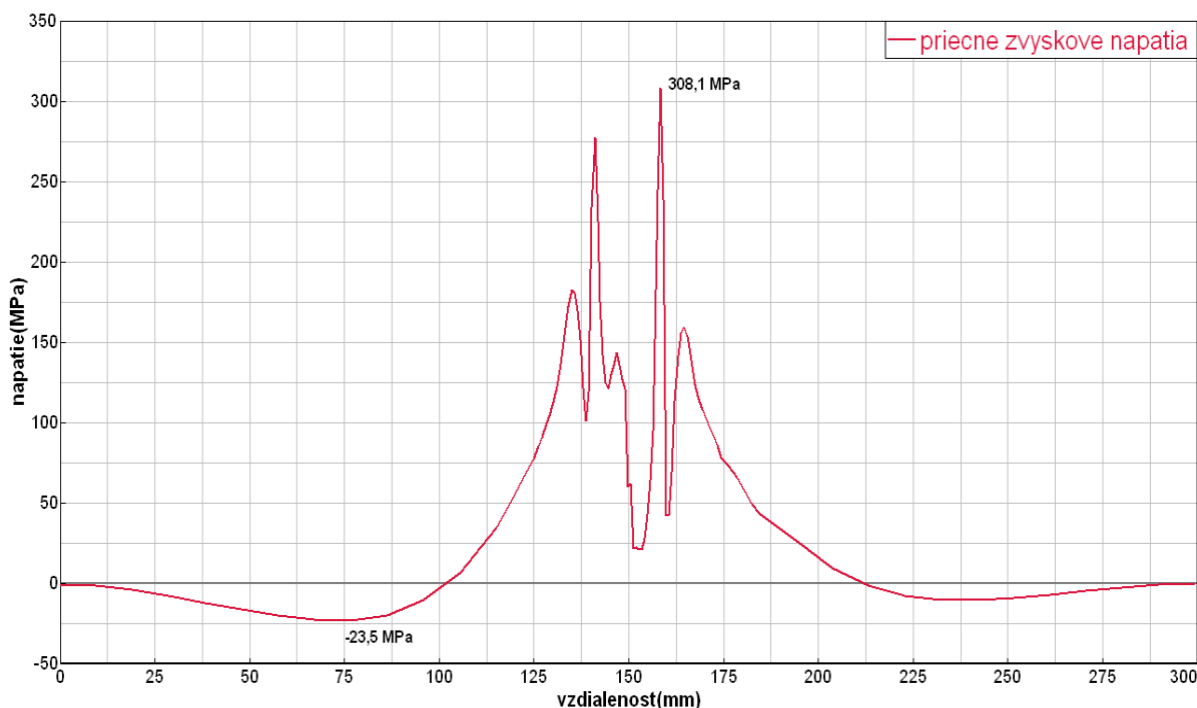
Všetky nasledujúce grafy v tejto kapitole reprezentujú zvyškové napätia vykreslené v strede povrchu základnej dosky zvarenca (červeno označená cesta na [obr. 5.1](#)).

Konkrétne obr. 5.18 reprezentuje pozdĺžne zvyškové napätia (napätia v smere zvárania). Je možné pozorovať analógiu medzi vypočítaným a ich teoretickým priebehom ([obr. 2.5](#)).



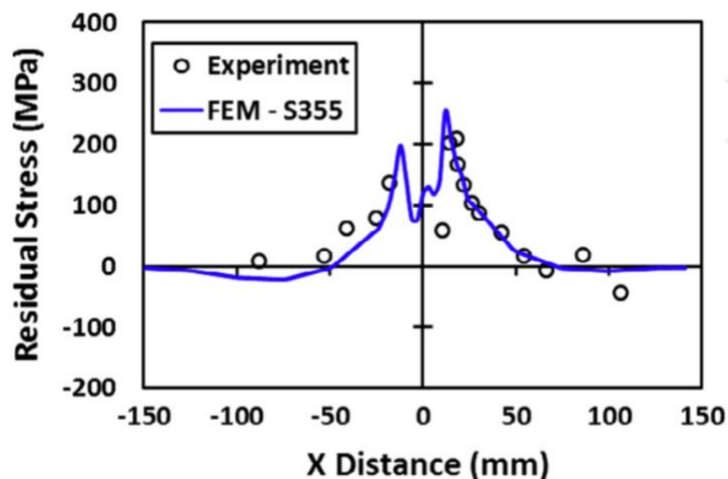
Obr. 5. 18 Priebeh pozdĺžnych zvyškových napätí po zváraní kútového zvaru.

Obrázok 5.19 znázorňuje priebeh priečných zvyškových napätí.



Obr. 5. 19 Priebeh priečných zvyškových napätí po zváraní kútového zvaru.

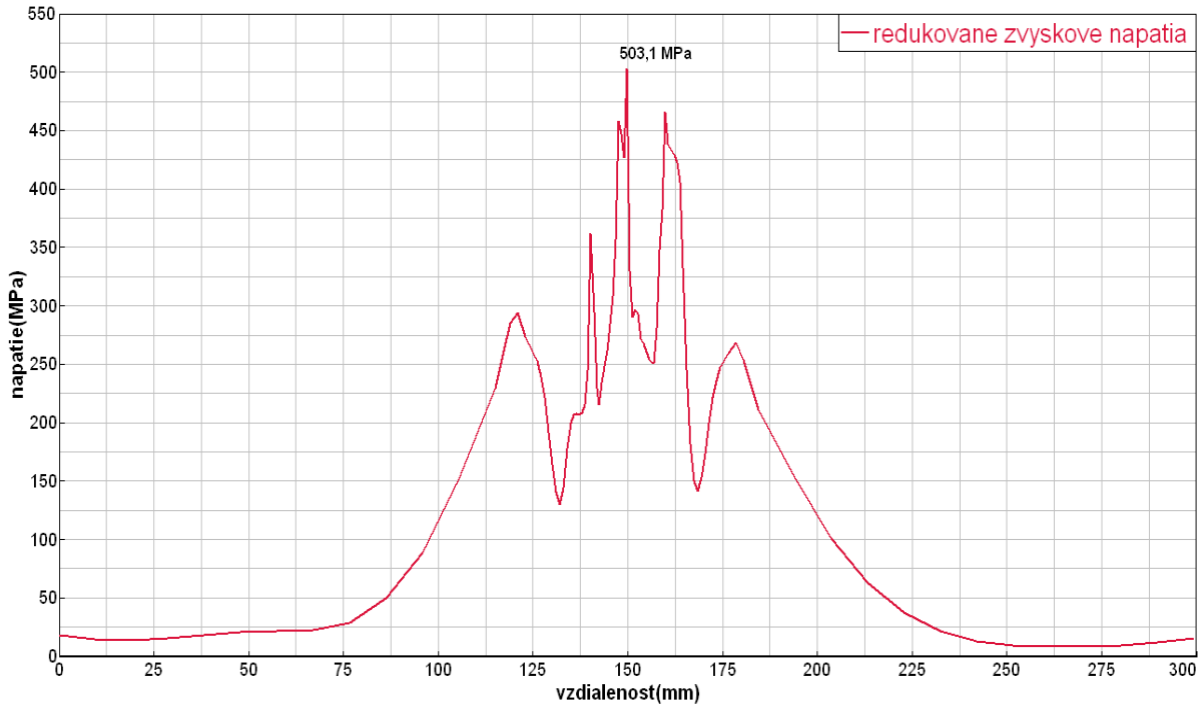
Priečne zvyškové napätia boli experimentálne namerané v [34] pomocou rentgenovej difrakcie. Ich priebeh je na obr. 5.20.



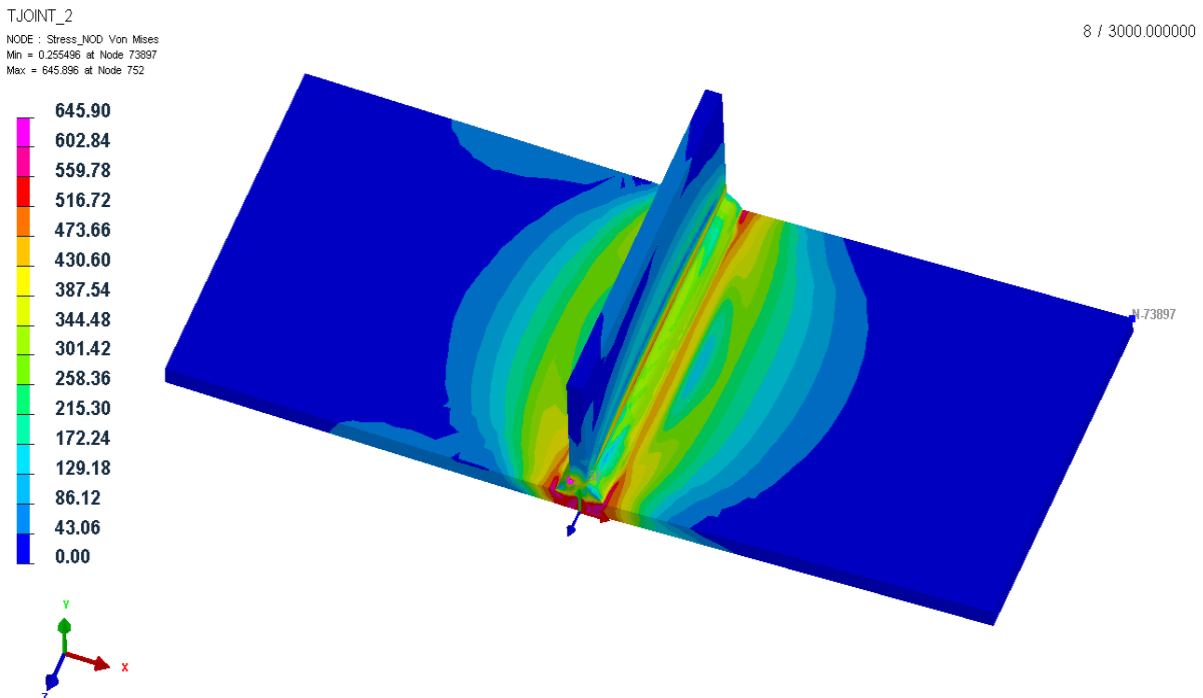
Obr. 5. 20 Priebeh priečných zvyškových napätí určených experimentálne (čierne body). [34]

Modrá krivka na obr. 5.20 je výsledkom výpočtu zvyškových napätí v ANSYS-e vykonanom v [34], kde okrem iných zjednodušení neboli uvažované fázové transformácie materiálu. Čierne body sú výsledky experimentálneho merania. Po porovnaní obr. 5.20 s obr. 5.19 je možné konštatovať, že bola dosiahnutá veľmi dobrá zhoda.

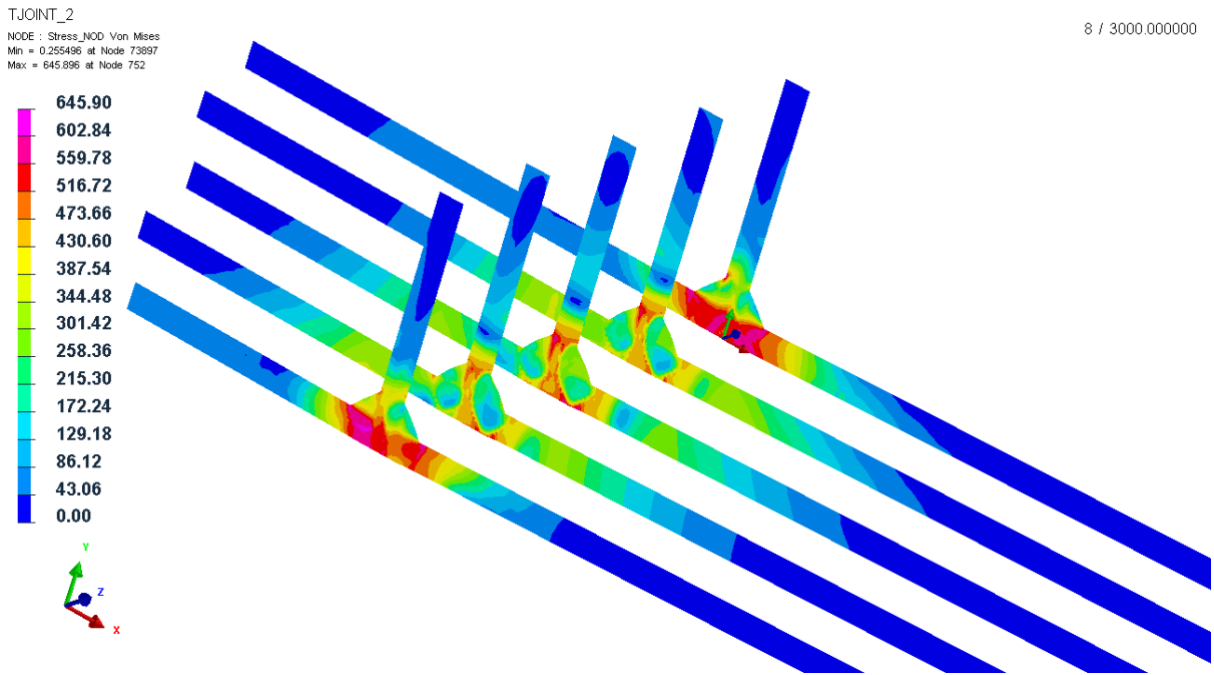
Redukované zvyškové napětia podľa podmienky plasticity HMM sú vykreslené v grafe (obr. 5.21), na celej geometrii (obr. 5.22) a pre lepšiu prehľadnosť o ich rozložení aj v rezoch geometrie (obr. 5.23).



Obr. 5. 21 Redukované zvyškové napätia podľa HMM vykreslené v grafe.

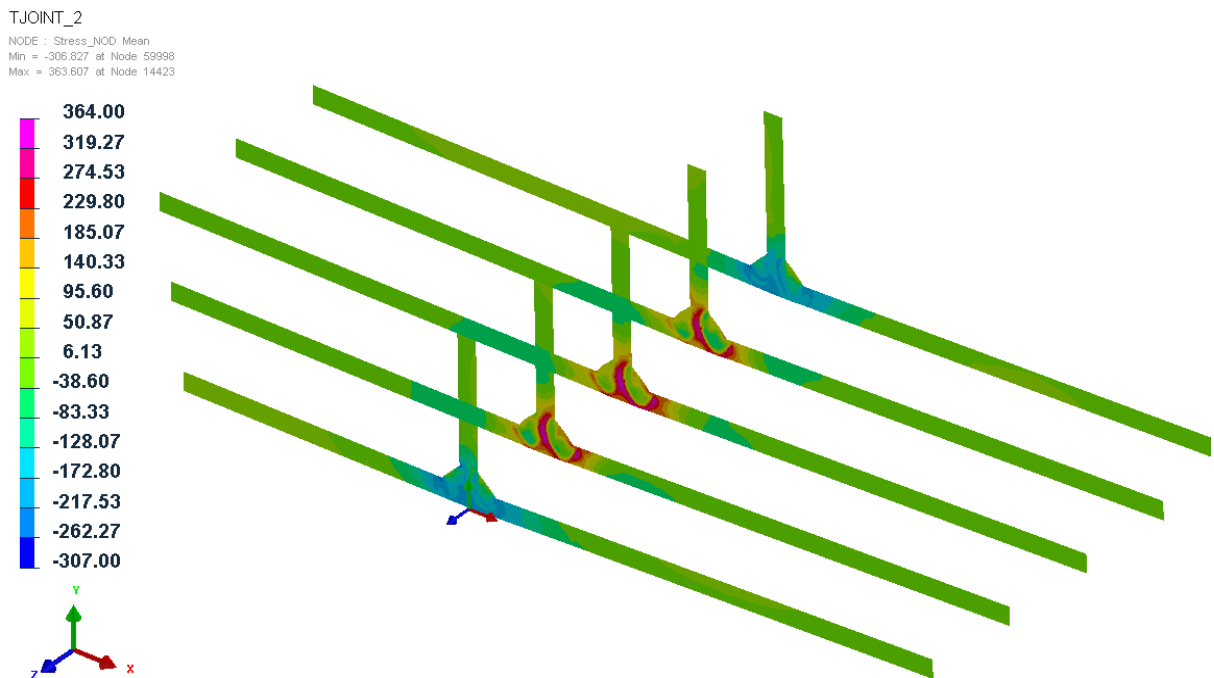


Obr. 5. 22 Redukované zvyškové napätia podľa HMM vykreslené na celej geometrii.



Obr. 5. 23 Redukované zvyškové napätia podľa HMH vykreslené v rezoch geometrie.

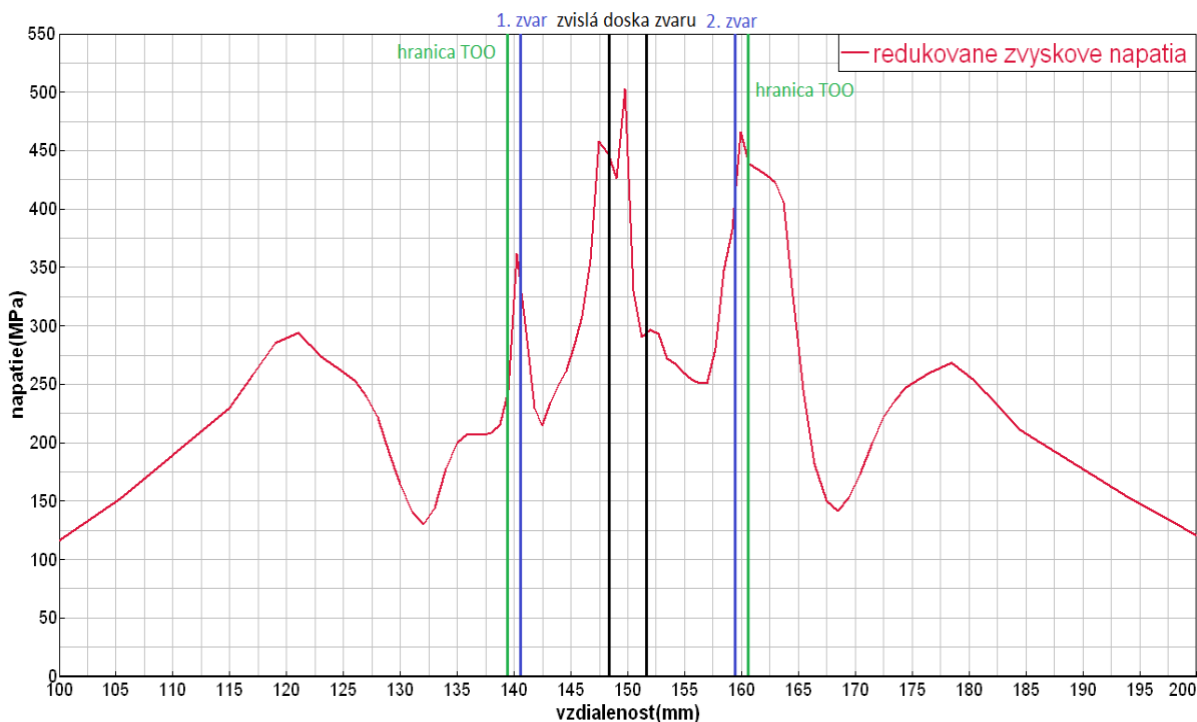
Maximálna hodnota napätia podľa HMH je 645,9 MPa a je obmedzovaná medzou klzu materiálu. Tá je však pre použitý základný a prídavný materiál oveľa nižšia (viď [kap 5.2](#)). Tieto hodnoty sú totiž určené pre pôvodnú feriticko-perlitickú štruktúru. Ak porovnáme rozloženie napätí s obsahom jednotlivých štruktúr (obr. [5.12](#), [5.13](#) a [5.14](#)), vidíme, že najväčšie napätia sú v okolí zvaru, kde sa nachádza okrem feriticko-perlitickej štruktúry aj bainit a martenzit. Medza klzu týchto štruktúr je odlišná ([obr. 5.26](#)).



Obr. 5. 24 Rozloženie redukovaných zvyškových napätí - Mean.

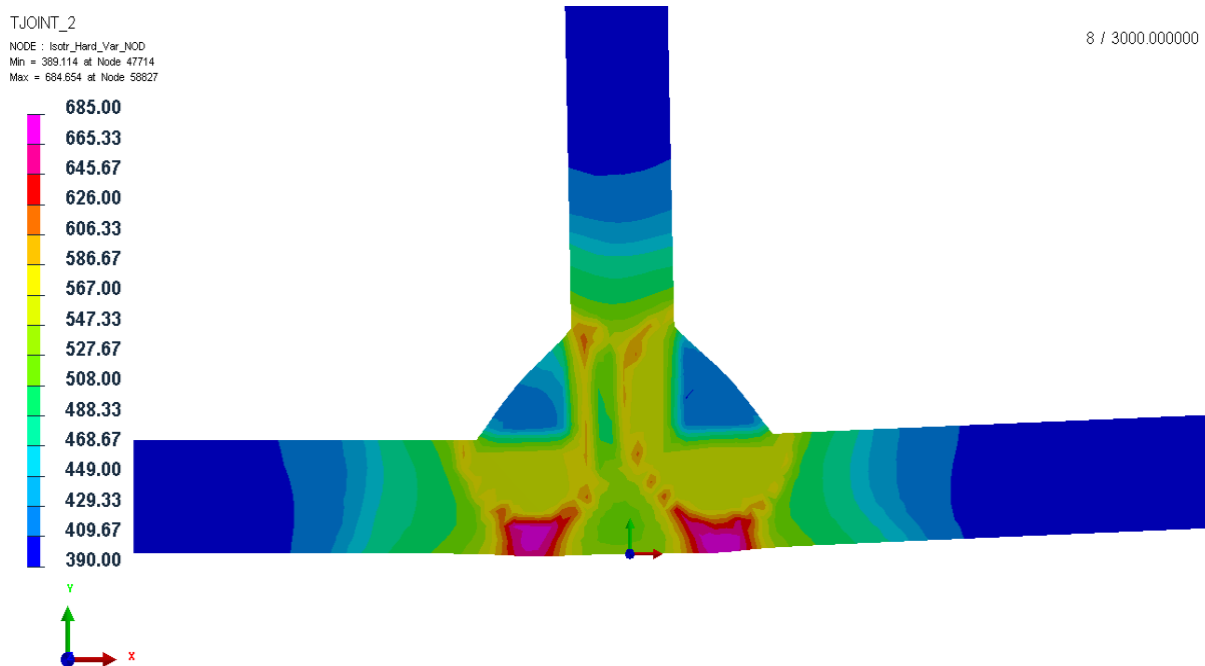
Pretože redukované napätie podľa podmienky HMM nadobúda iba kladných hodnôt, vykreslilo sa aj rozloženie redukovaného napätia Mean (obr. 5.24), ktoré umožňuje rozlíšiť ťahové a tlakové oblasti. Minimálna hodnota tohoto napätia je $-306,8 \text{ MPa}$ a maximálna $363,6 \text{ MPa}$.

Na nasledujúcom obrázku je vidieť detail priebehu redukovaného zvyškového napätia vo zvaru a jeho okolí. Čiernymi čiarami je vyznačená zvislá doska kútového zvaru, modrými čiarami konce jednotlivých zvarových húseníc a zelenými hranice tepelne ovplyvnenej oblasti zvaru.



Obr. 5. 25 Detail priebehu redukovaného zvyškového napätia vo zvaru a jeho okolí.

Obrázok 5.26 zase ukazuje medzu klzu materiálu po zváraní (na deformovanej geometrii). Je možné vidieť, že v miestach ďalej od zvaru je medza klzu s hodnotou základného materiálu, zatiaľ čo v miestach, kde došlo k fázovým transformáciám, došlo aj k zmene hodnoty medze klzu podľa štruktúry, ktorá v danom mieste vznikla.



Obr. 5. 26 Medza klzu materiálu po zváraní.

6 Kúťový zvar ANSYS

Táto kapitola sa venuje rovnakej geometrii zvaru ([obr. 5.1](#)) a rovnakému procesu zvarania ako predošlá kapitola. Rozdielom je, že výpočtové modelovanie prebiehalo v programe ANSYS. Opäť boli vstupné veličiny prebraté z [34]. Postup a výsledky výpočtového modelovania prezentujú nasledujúce kapitoly.

Pri tvorbe tejto kapitoly boli využité poznatky z [35,36,37,38,39,40,41].

6.1 Zjednodušenia pri výpočtovom modelovaní v ANSYS-e

V kapitole 5 sa proces zvarania simuloval pomocou špecializovaného softvéru (SYSWELD-u) priamo určeného na analýzy procesov zvarania a tepelného spracovania. Množstvo javov bolo teda buď automaticky alebo po jednoduchom nastavení zahrnutých v analýze. Naopak pri využití ANSYS-u bolo nutné všetko práčne nastaviť. Preto sa niektoré javy zanedbali, prípadne sa ich simulácia zjednodušila.

Hlavným zjednodušením, použitým pri výpočtovom modelovaní pomocou ANSYS-u bolo, že sa neuvažovali fázové transformácie materiálu. Tie sú vo všeobecnosti významným faktorom, pretože každá štruktúra materiálu má iné vlastnosti. Avšak podľa publikácie [41] by u nízkouhlíkových ocelí (riešená oceľ S355 patrí do tejto kategórie) fázové transformácie nemali mať významný vplyv na veľkosť a rozloženie zvyškových napätí.

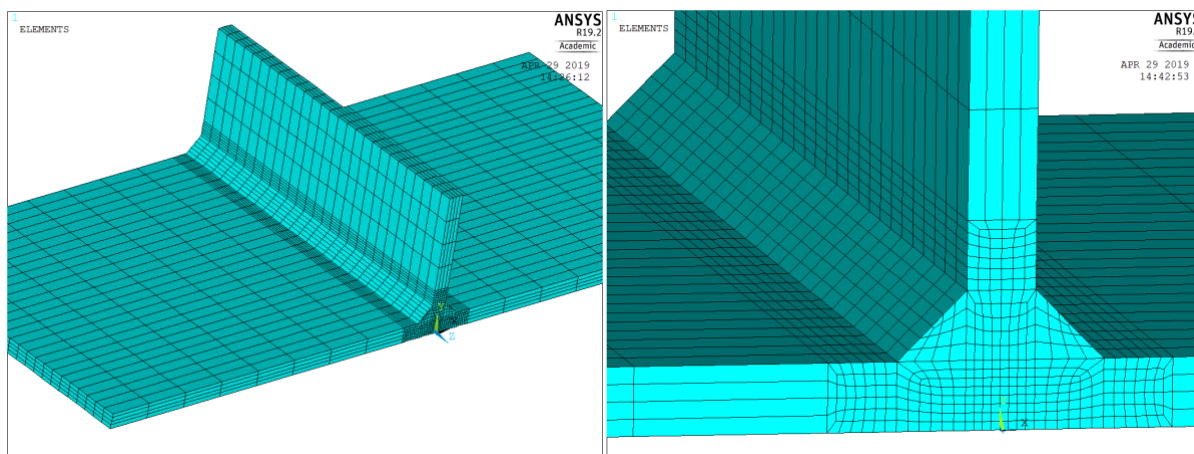
Pri modelovaní v ANSYS-e bol použitý jednoduchší model zdroja tepla. Konkrétne išlo o elipsoidný model ([viď st. 30](#)). Rozdiel oproti dvojelipsoidnému je v tom, že gradient teplôt je na začiatku a konci modelu rovnaký. Elipsoidný model sa zvolil kvôli tomu, že je reprezentovaný iba jednou rovnicou.

Ďalšími použitými zjednodušeniami sú: prestup tepla do okolia uvažovaný iba prúdením (zanedbaná radiácia) a elementy zvaranej húsenice aktivované už od začiatku jej zvarania (v SYSWELD-e sa aktivovali postupne pri prechode tepelného zdroja).

6.2 Geometria a sieť

Geometria bola od začiatku modelovaná ako jedno teleso. Nutné bolo vytvorenie rovnomernej siete zhustenej v okolí zvaru, kvôli veľkým teplotným gradientom. Preto sa najskôr vytvorila rovinná geometria. Jej sieť bola tvorená prvkom PLANE 55. Následne sa vytiahla do 3D modelu a vytvoril sa prvok SOLID 70, ktorého jediným stupňom voľnosti je teplota.

Vykonaná bola citlivostná analýza, kedy sa postupne znižovala hustota siete s cieľom zachovania presných výsledkov a skrátenia výpočtového času. Výsledná geometria a sieť je na obrázku 6.1. Tvorilo ju 11340 elementov.



Obr. 6.1 Vytvorená geometria a sieť: cely model(vľavo) a detail na zvar(vpravo).

6.3 Materiál

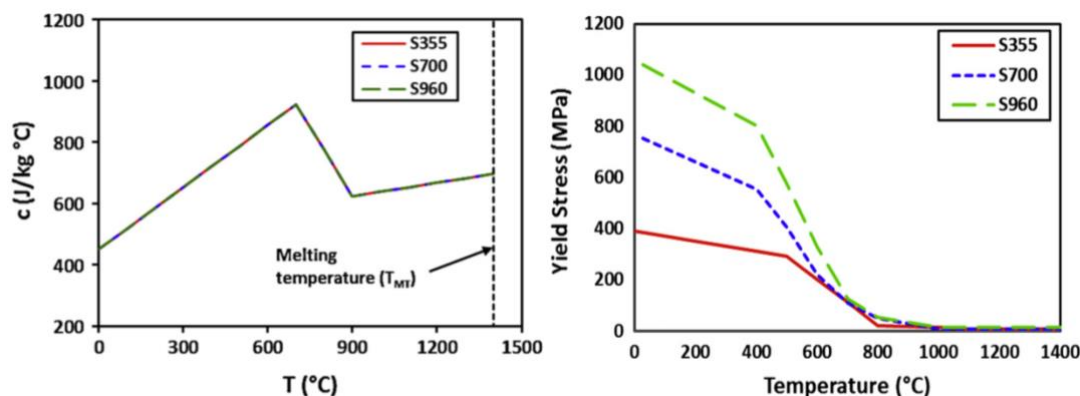
Ako už bolo spomenuté, pri výpočtoch v ANSYS-e nie sú uvažované fázové transformácie. Preto by bolo zbytočné uvažovať prídavný materiál. Celá geometria je teda tvorená materiálom S355. Jeho termofyzikálne a mechanické vlastnosti potrebné pre analýzu (tab. 3.1 a 3.2) sú prevzaté z [34].

V predošlej kapitole boli použité vlastnosti z databázy SYSWELD-u. Preto sa materiálové dáta v kapitole 5 a 6 jemne odlišujú. Ide však o ten istý materiál a na výsledky analýz by to malo mať zanedbateľný vplyv.

Hustota a Poissonovo číslo sú kvôli ich malej závislosti na teplote brané ako konštanty. Ostatné vlastnosti sú zadané v závislosti na teplote. Pre ilustráciu slúži obrázok 6.2, ktorý znázorňuje závislosť mernej tepelnej kapacity na teplote (vľavo) a medze klzu na teplote (vpravo, oceľ S355 reprezentuje červená krivka).

Vlastnosti sú zadávané do teploty 1400 °C. Pre materiál, ktorý túto teplotu počas procesu zvarovania prekročí, sú uvažované posledné zadané vlastnosti.

Na popis chovania materiálu bol použitý plastický model s izotropným spevnením materiálu, pričom modul spevnenia bol určený ako 0,5 % z modulu pružnosti v ťahu pri danej teplote. To aby sa predišlo problémom s konvergenciou. Existuje veľa publikácií, ktoré tvrdia, že je možné s dostatočnou presnosťou použiť aj ideálne pružne-plastický model materiálu.



Obr. 6. 2 Merná tepelná kapacita(vlavo) a medza klzu(vpravo) v závislosti na teplote.[34]

6.4 Proces zvarania

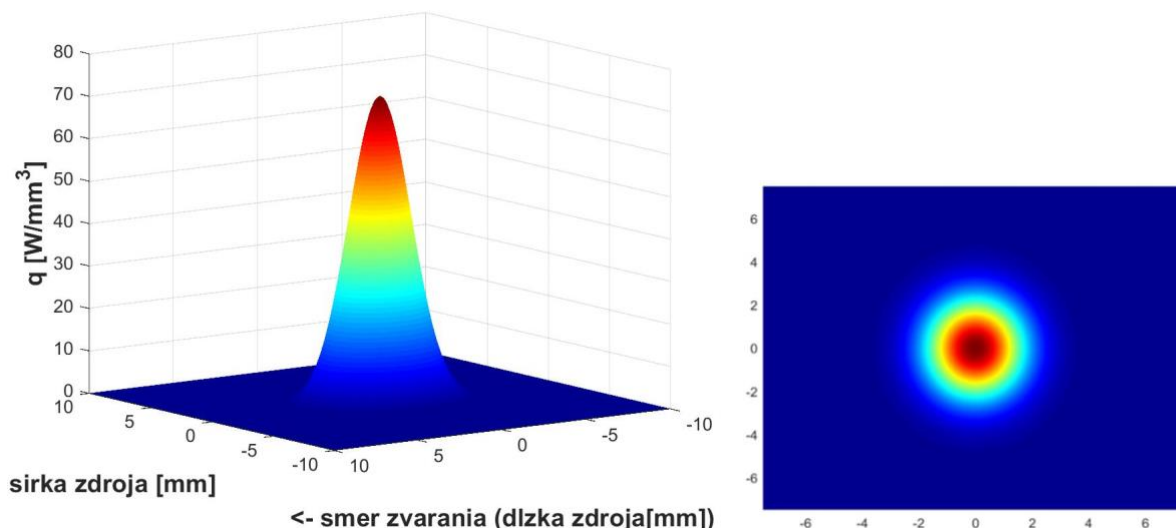
Proces zvarania, a teda aj zvaracie parametre boli zhodné s použitými v kapitole 5 (tab. 5.2). Boli definované ako skalárne parametre.

ANSYS neobsahuje tepelné zdroje ako SYSWELD. Bolo ich nutné definovať. Podľa použitej metódy zvarania (MAG) sa na konečné výpočty vybral elipsoidný model zdroja tepla. Rovnako ako v SYSWELD-e by bolo možné použiť dvojelipsoidný model, no spôsobovalo by to komplikácie, keďže je definovaný dvoma rovnicami (rov. 3.5 a 3.6). Navyše rozdiel medzi nimi je iba v rozložení hustoty tepelného toku (viď obr. 5.6 a obr. 6.3).

Definovanie modelu zdroja tepla v ANSYS-e prebiehalo nasledovne. Na začiatok sa vytvoril lokálny súradnicový systém, ktorý určoval začiatok pohybu tepelného zdroja a jeho natočenie. Potom sa ako funkcia vložila príslušná rovnica, určujúca rozloženie hustoty tepelného toku. Pre použitý elipsoidný model je to rov. 3.4 a toto rozloženie zobrazuje obrázok 6.3. Následne sa pomocou tepelnej okrajovej podmienky HEAT GENERATION, zadanej do objemov a definovanej pomocou tabuľky, ktorú si ANSYS vygeneroval pri vložení funkcie, vytvoril samotný tepelný zdroj. Pre každú zvarovú húsenicu je pritom potrebné definovať vlastný zdroj tepla.

Neznámymi parametrami boli podobne ako v SYSWELD-e rozmery tepelného zdroja (šírka, dĺžka a penetrácia). Na ich určenie bolo nutné vykonať niekoľko desiatok výpočtov. Snahou bolo dosiahnuť čo najlepšiu zhodu s výsledkami zo SYSWELD-u, hlavne tvaru natavenej oblasti. V ANSYS-e je možné upravovať jej tvar iba pomocou zmeny rozmerom tepelného zdroja.

Pri simulácii bola použitá tzv. *Element Birth and Death technique*. Ide o aktiváciu a deaktiváciu elementov. Viac o tejto technike modelovania je v kapitole 9.



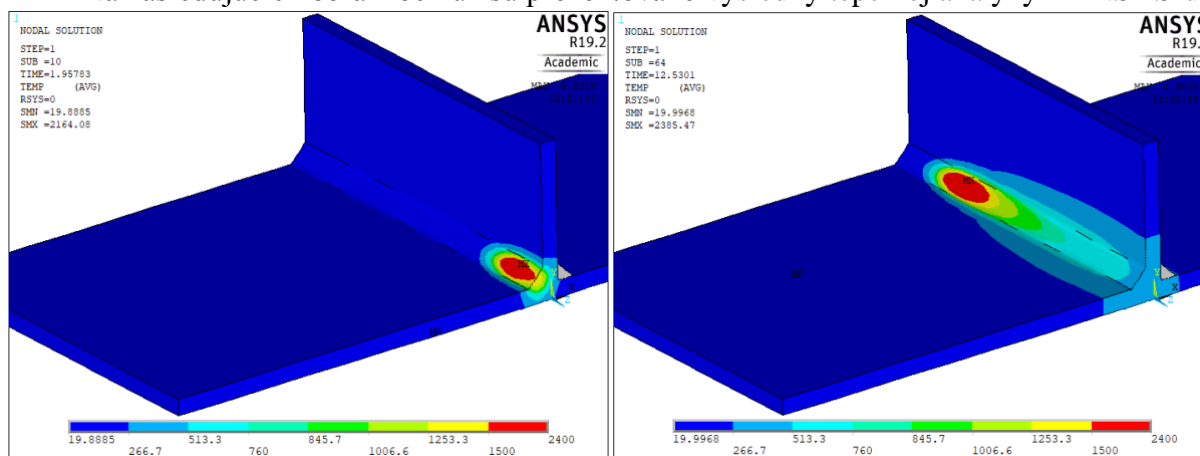
Obr. 6. 3 Objemová hustota tepelného toku elipsoidného zdroja (vpravo pohľad zhora).

6.5 Nastavenia a výsledky tepelnej analýzy

Pred spustením výpočtu sa nastavila počiatočná teplota na 20 °C. Na všetky vonkajšie plochy bola predpísaná konvekcia.

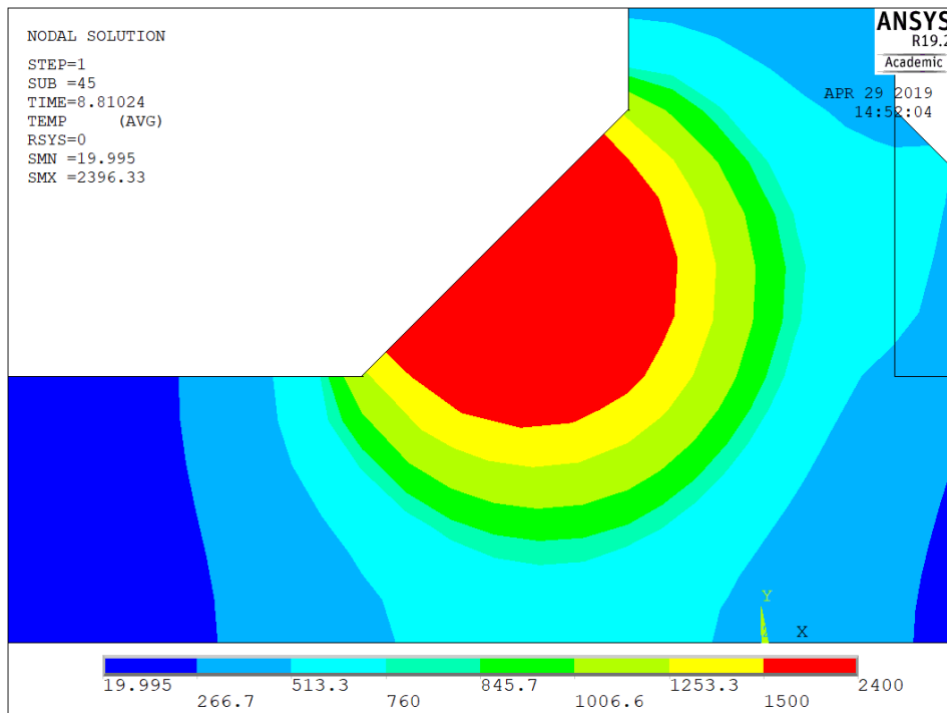
Riešenie tepelnej a aj následnej mechanickej analýzy muselo byť rozdelené na niekoľko častí. Tepelná analýza sa rozdelila na zváranie prvej húsenice, chladnutie materiálu, zváranie druhej húsenice a opäť chladnutie. Procesy chladnutia boli ďalej rozdelené na menšie časti, u ktorých sa postupne kvôli úspore výpočtového času zväčšoval časový krok. Pri zváraní, kedy sú teplotné gradienty najväčšie, bol použitý najjemnejší časový krok. Pred výpočtom zvárania druhej húsenice sa ešte definoval jej tepelný zdroj a zrodili sa elementy patriace jej materiálu. Výpočet končil v čase 3000 s, kedy bola maximálna teplota necelých 21 °C.

Na nasledujúcich obrázkoch už sú prezentované výsledky tepelnej analýzy z ANSYS-u.

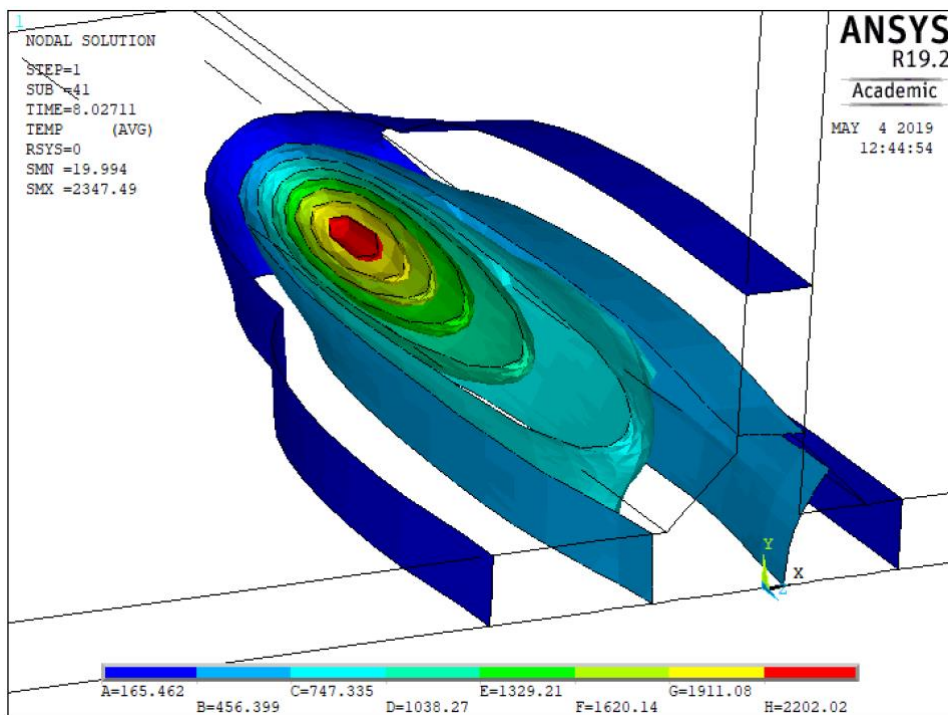


Obr. 6. 4 Prejazd tepelného zdroja v rôznych časoch pri tvorbe prvej húsenice.

Obrázok 6.4 znázorňuje prejazd elipsoidného zdroja tepla v rôznych časoch tvorby prvej zvarovej húsenice. Zdrojom generovaná natavená oblasť je vidieť zase na obrázku 6.5. Maximálna teplota vo zvarovej kúpeli sa pohybovala okolo hodnoty 2380 °C. Zaujímavý je aj obrázok 6.6, na ktorom sú tzv. *isosurfaces*. To sú plochy s rovnakou hodnotou v tomto prípade teploty. Naznačujú priebeh vytvárania zvarovej kúpele a teplotných polí elipsoidným tepelným zdrojom.



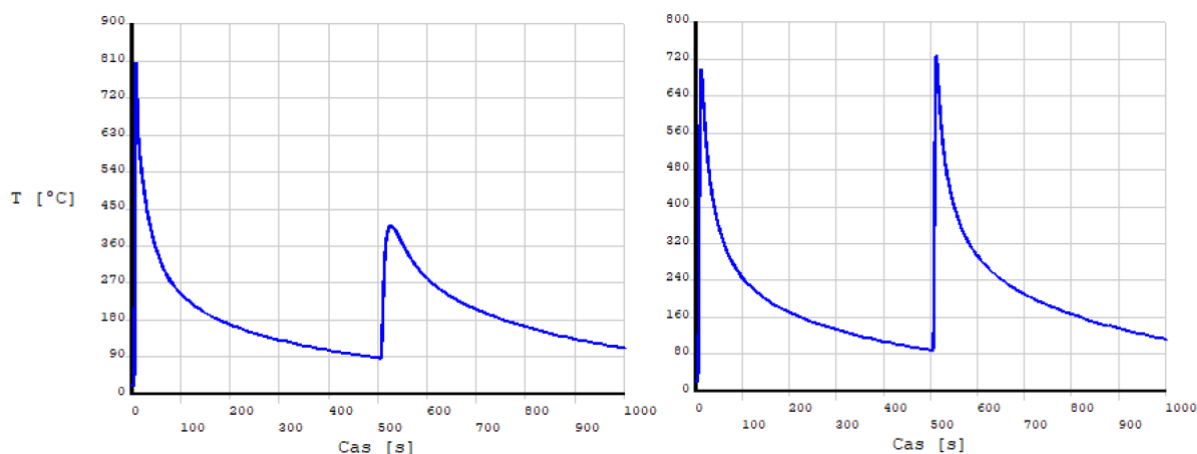
Obr. 6. 5 Tvar zdrojom generovanej natavenej oblasti.



Obr. 6. 6 Plochy s rovnakou hodnotou teploty pri prejazde tepelného zdroja.

Pri porovnaní natavených oblastí z ANSYS-u (obr. 6.5) a SYSWELD-u (obr. 5.8) je vidieť určitá odlišnosť. Lepšiu zhodu však nebolo možné dosiahnuť kvôli tomu, že ANSYS neobsahuje nástroje na úpravu tvaru natavenej oblasti (jedinou možnosťou je zmena rozmerov samotného zdroja tepla).

Na nasledujúcom obrázku sú vykreslené priebehy teplôt do času 1000 s v miestach A a B (ich presná poloha vid' st. 47). Je možné ich porovnať s priebehmi zo SYSWELD-u (obr. 5.10 a obr.5.11) a z publikácie [34] (obr. 5.9), no majú skôr informačný charakter.



Obr. 6. 7 Priebeh teploty počas zvárania v mieste A(vľavo) a mieste B (vpravo).

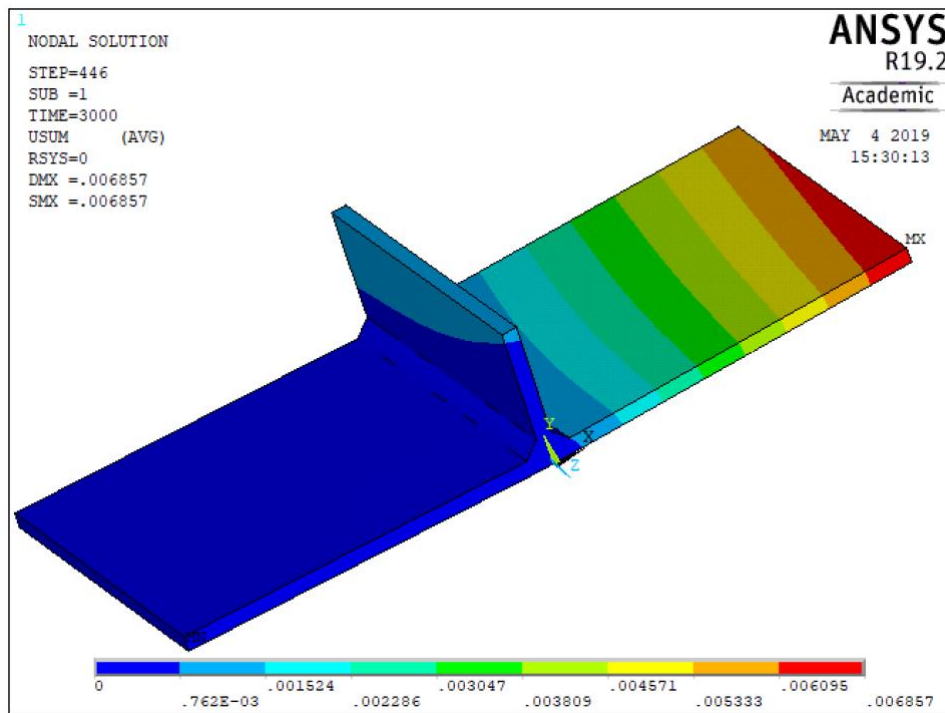
6.6 Nastavenia a výsledky mechanickej analýzy

Na začiatok sa prepol typ analýzy (*thermal to structural*). Tým sa zmenil aj typ prvku zo SOLID 70 (jediným stupňom voľnosti je teplota) na SOLID 185 (stupňami voľnosti sú posuvy v troch osách). Následne sa zamedzilo posuvom na dvoch hranách rovnako ako v kapitole 5 (obr. 5.1).

Počas riešenia mechanickej analýzy sa postupne načítavali výsledky (teplotné polia) z tepelnej analýzy. Tie boli jediným zaťažením. V čase zvárania a tesne po ňom bolo nutné mať časový krok (LOAD STEP) a riešený krok v danom časovom kroku (SUBSTEP) veľmi malé, kvôli veľkým teplotným gradientom. Ako sa čas chladnutia zväčšoval, znižovali sa teplotné gradienty a zväčšovali sa aj kroky výpočtu. Hodnoty LOAD STEP-ov a SUBSTEP-ov sa museli zadávať ručne, pretože pri ich automatickom nastavení by výpočet trval neporovnateľne dlhšie. S ručným zadávaním sa však objavil problém s konvergenciou výpočtov. Na hľadanie vhodných veľkostí krokov sa využili tzv. *Restart Points*. Tie umožnili po neskončovaní výpočtu zmenu veľkosti SUBSTEP-ov a pokračovanie vo výpočte. SYSWELD toto vykonával automaticky.

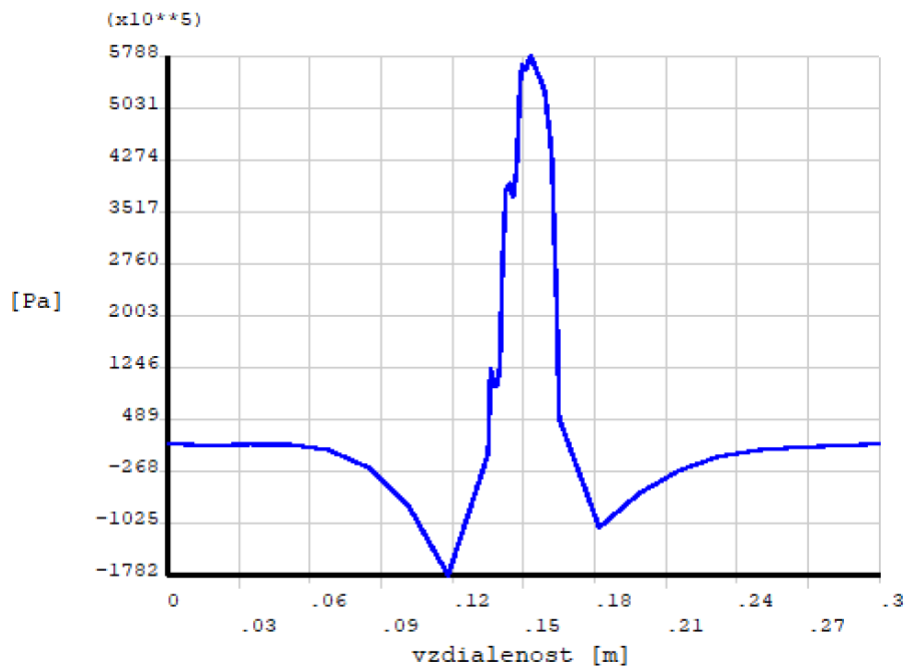
Ďalej sú už prezentované výsledky mechanickej analýzy.

Obrázok 6.8 znázorňuje posuvy po zváraní kútového zvaru. Maximálna hodnota dosahovala takmer 6,9 mm. V mieste experimentálneho merania posuvu ([obr. 5.1](#)) bola jeho hodnota 6,37 mm.

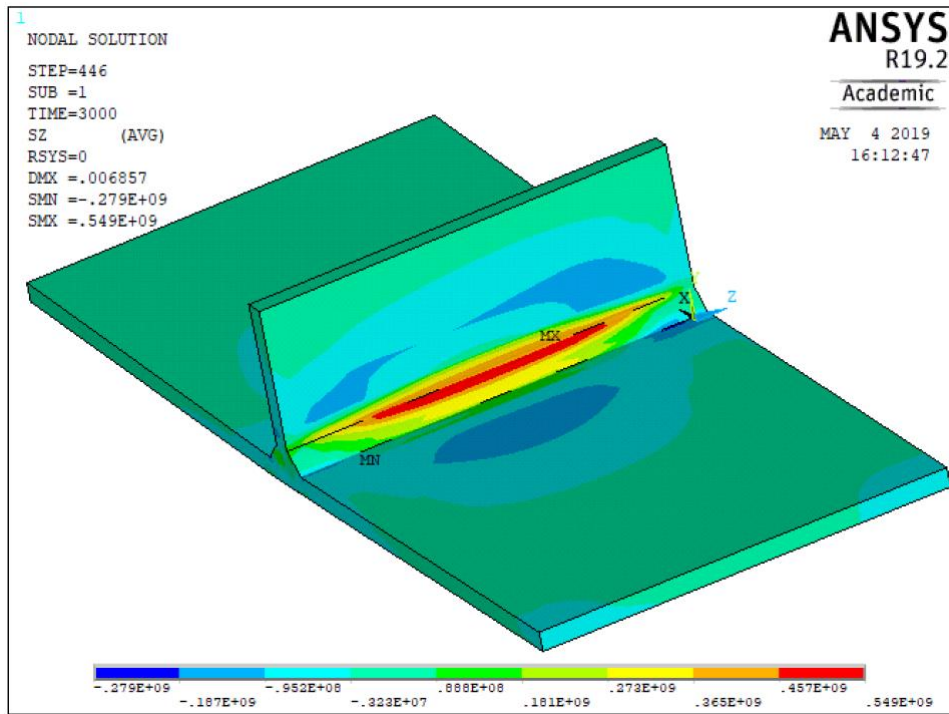


Obr. 6. 8 Posuvy po zváraní kútového zvaru.

Všetky grafy v tejto kapitole (podobne ako v predchádzajúcej) sú vykreslené v strede povrchu základnej vodorovnej dosky zvarenca. Hodnoty napätí sú v Pascaloch a osi sú $\times 10^5$.

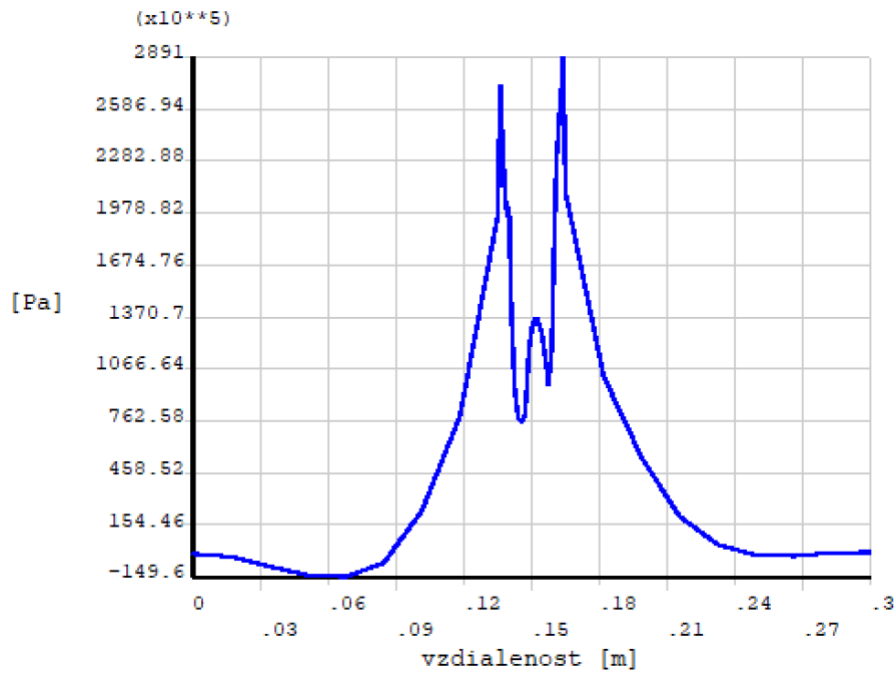


Obr. 6. 9 Priebeh pozdĺžnych zvyškových napätí po zváraní kútového zvaru.

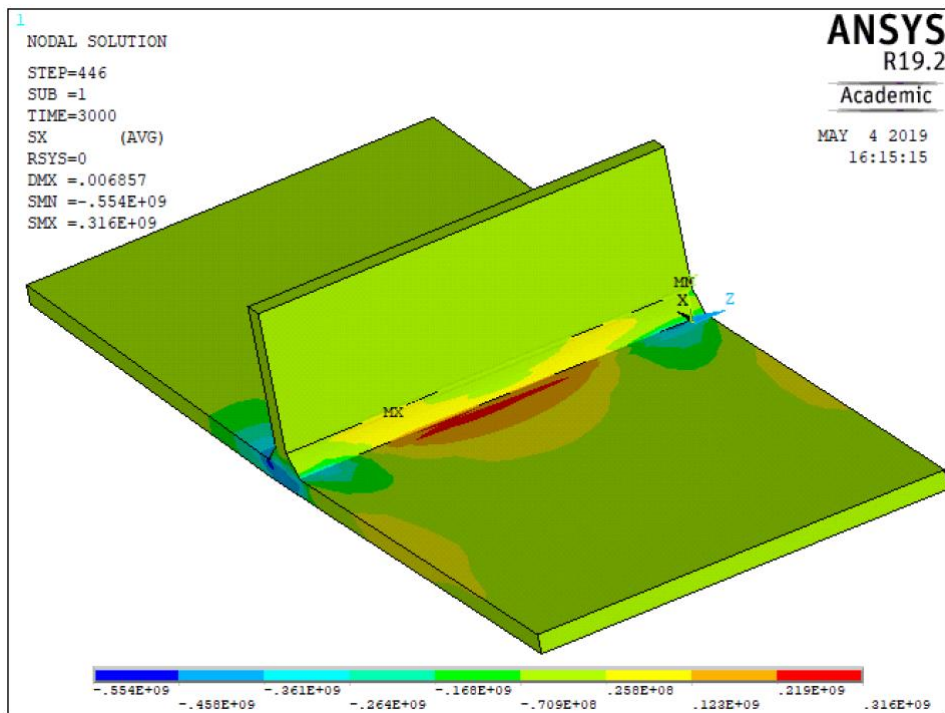


Obr. 6. 10 Pozdĺžne zvyškové napätie po zváraní kútového zvaru.

Predchádzajúce obrázky 6.9 a 6.10 zobrazujú pozdĺžne zvyškové napätia po zváraní kútového zvaru. Obrázok 6.9 je možné porovnať s výsledkami zo SYSWELD-u (obr. 5.18). Je vidieť, že rozdiel je hlavne vo zvare a jeho okolí. Ten je spôsobený najmä neuvažovaním fázových transformácií pri výpočtoch v ANSYS-e.

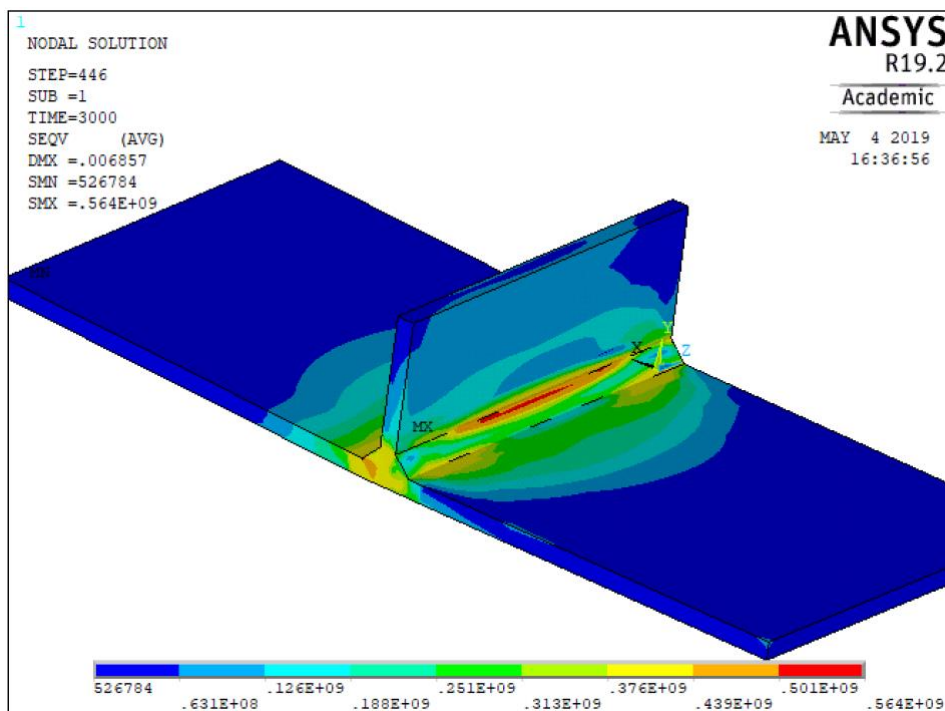


Obr. 6. 11 Priebeh priečných zvyškových napätí po zváraní kútového zvaru.



Obr. 6. 12 Priečne zvyškové napätie po zváraní kútového zvaru.

Obrázky 6.11 a 6.12 znázorňujú priečne zvyškové napätia. Tieto napätia vykreslené v grafe (obr. 6.11) je možné porovnať s výsledkami zo SYSWELD-u (obr. 5.19) a s ich experimentálne určenými hodnotami (obr. 5.20). Rozdiel oproti výsledkom zo SYSWELD-u je spôsobený opäť najmä zanedbaním fázových transformácií.



Obr. 6. 13 Redukované zvyškové napätia podľa podmienky HMM.

Predošlý obrázok (obr. 6.13) reprezentuje redukované zvyškové napätia podľa podmienky HMM. Ich maximálna hodnota je 564 MPa a je možné ich porovnať s [obrázkom 5.22](#). Tieto napätia sú v grafe vykreslené až v nasledujúcej kapitole ([obr. 7.2](#)) kvôli možnosti priameho porovnania s výsledkom zo SYSWELD-u.

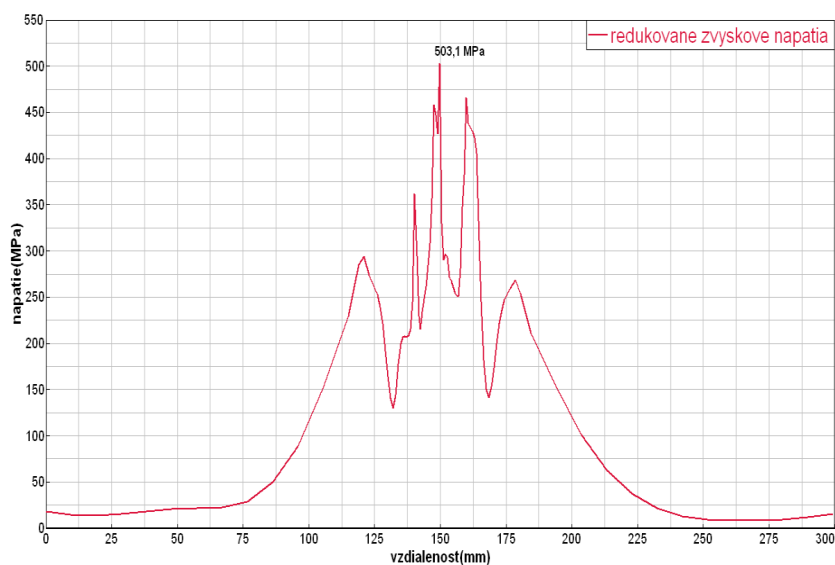
7 Porovnanie výsledkov zvarania kútového zvaru

Pre názornosť sú v tejto kapitole porovnané redukované zvyškové napätia a deformácie (posuvy) po zvaraní kútového zvaru.

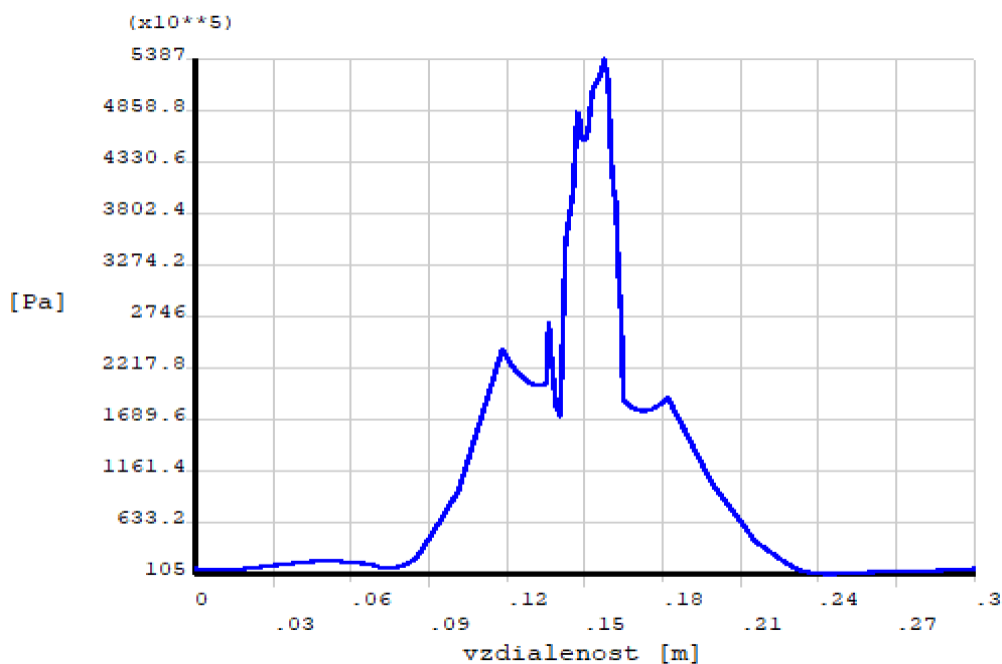
V nasledujúcej tabuľke sú výsledné maximálne posuvy v smere osy y (konkrétne vyhodnocované miesto vidno na [obr. 5.1](#) a smer osy y napríklad na [obr. 5.16](#)).

Určené	Experimentálne	Pomocou SYSWELD-u	Pomocou ANSYS-u
Maximálny posuv	6,2 mm	5,96 mm	6,37 mm

Tab. 7. 1 Porovnanie maximálnych posuvov.



Obr. 7. 1 Redukované zvyškové napätia získané pomocou SYSWELD-u.



Obr. 7. 2 Redukované zvyškové napätia získané pomocou ANSYS-u.

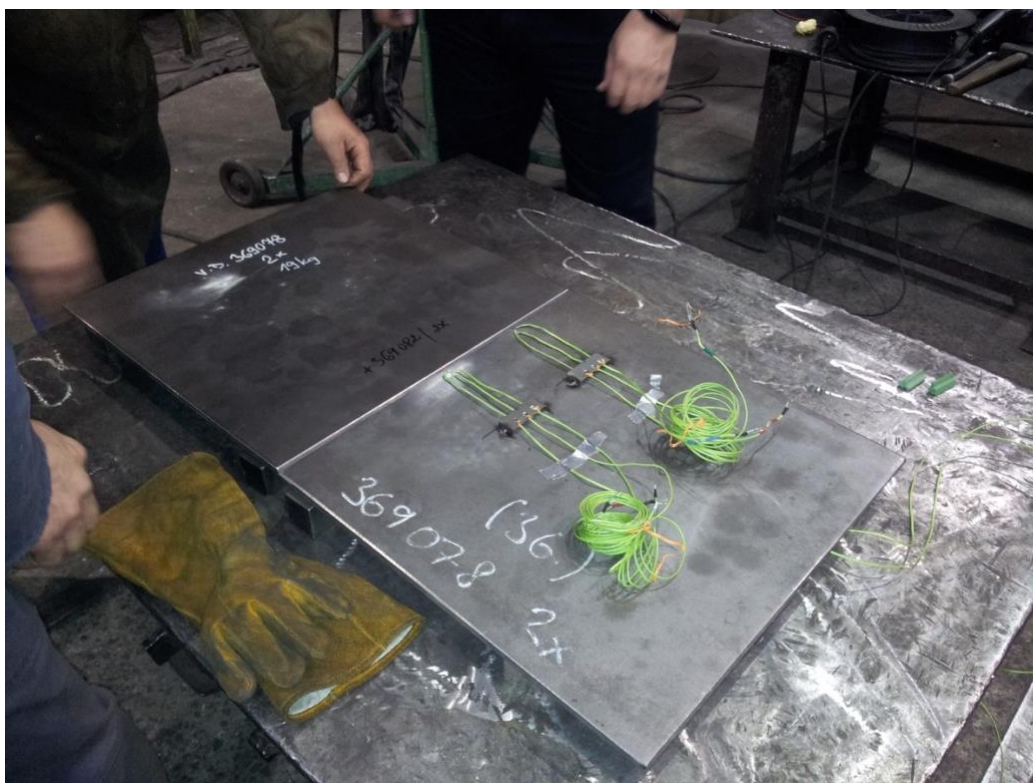
Obrázok 7.1 znázorňuje redukované zvyškové napätia vypočítané pomocou programu SYSWELD a obr. 7.2 pomocou ANSYS-u. Je medzi nimi možné pozorovať relatívne dobrú zhodu. Rozdiely sú najväčšie vo zvare a jeho okolí. Práve tam dochádza k fázovým transformáciám materiálu, ktoré pri výpočtoch v ANSYS-e nie sú uvažované.

Výsledné maximálne posuvy z jednotlivých programov (tab. 7.1) sa aj napriek zjednodušeniam použitým pri výpočtoch v ANSYS-e líšia len o 0,41 mm. Blížia sa aj k experimentálne určenej hodnote.

8 Tupý zvar SYSWELD

Kapitoly 8 a 9 sa zaoberajú modelovaním procesu zvárania tupého zvaru. Dôvodom riešenia tejto geometrie a procesu jej zvárania je projekt firmy ŽĐAS, a.s. a Ústavu mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky VUT. Jeho cieľom je zistiť ako veľmi a či vôbec je možné znížiť zvyškové napätia pomocou vibrácií ([kap. 2.9.2](#)). Skúmané to je práve na danom tupom zvare. Úlohou tejto práce je určiť rozloženie a veľkosť zvyškových napätí po zváraní danej geometrie, ktoré bude potom slúžiť pri riešení projektu.

Reálne zváranie danej geometrie s meraním teplôt pomocou termočlánkov je vidieť na obrázku 8.1. Zvárali sa dve dosky, ktoré však neboli v rovine. Miesto zvaru bolo podložené a oproti krajom dosiek bolo vyššie približne o 10 mm. Modelovanie procesu zvárania v tejto a nasledujúcej kapitole ([kap. 9](#)) je však uskutočnené na rovných doskách. Možný dopad tohoto zjednodušenia je rozobratý v [kap. 10](#).

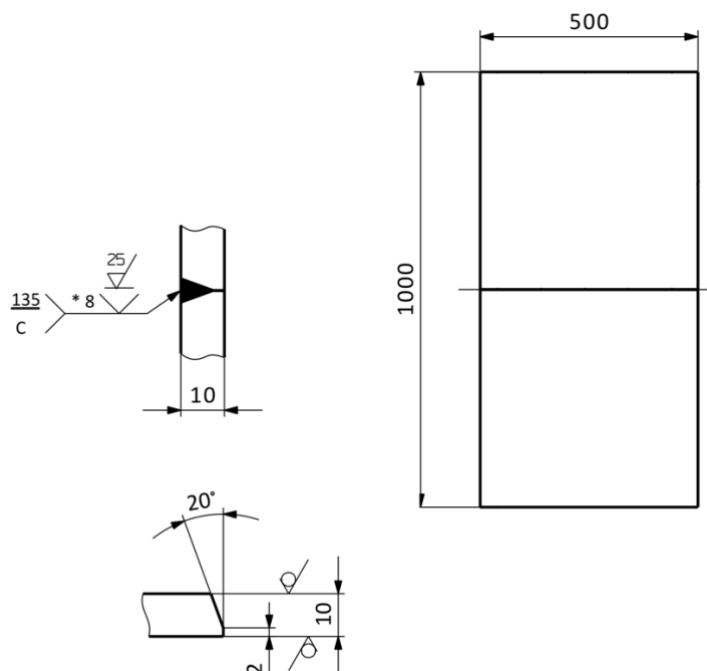


Obr. 8. 1 Reálne zváranie tupého zvaru.

Geometria zvaru (rozмеры zváraných dosiek, zvar a úprava zvarových plôch) je na obrázku 8.2. Hrúbka zváraného materiálu bola 10 mm.

Zvárali sa dve na seba kladené húsenice. Prvou húsenicou sa zvaril koreň zvaru a druhou došlo k vyplneniu celej zvarovej medzery. Zváralo sa ručne metódou MAG.

V tejto kapitole bolo modelovanie zvárania tupého zvaru vykonané v programe SYSWELD. Jeho postup a princíp je obdobný ako v kapitole 5. Preto je táto kapitola zameraná skôr na výsledky.

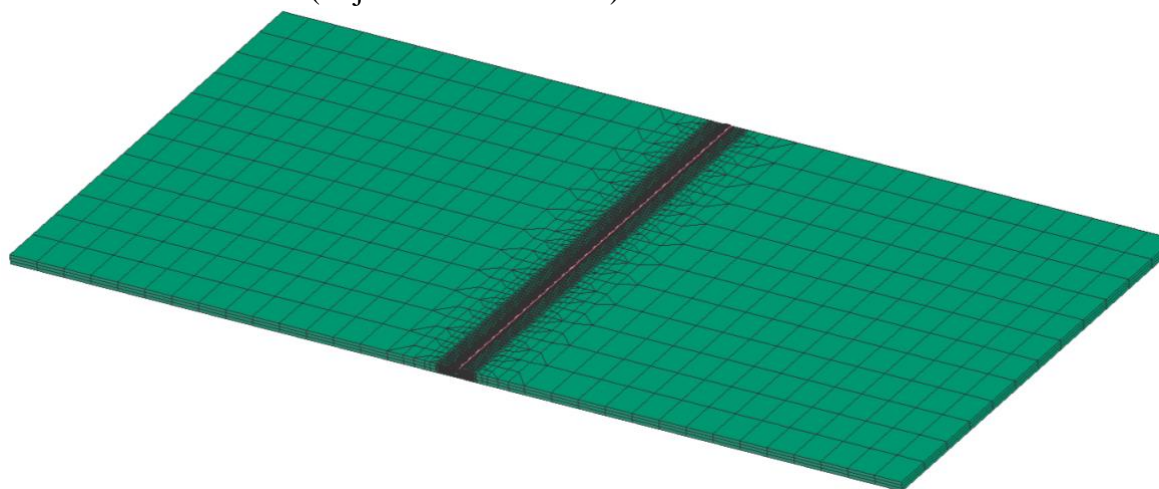


Obr. 8. 2 Geometria tupého zvaru.

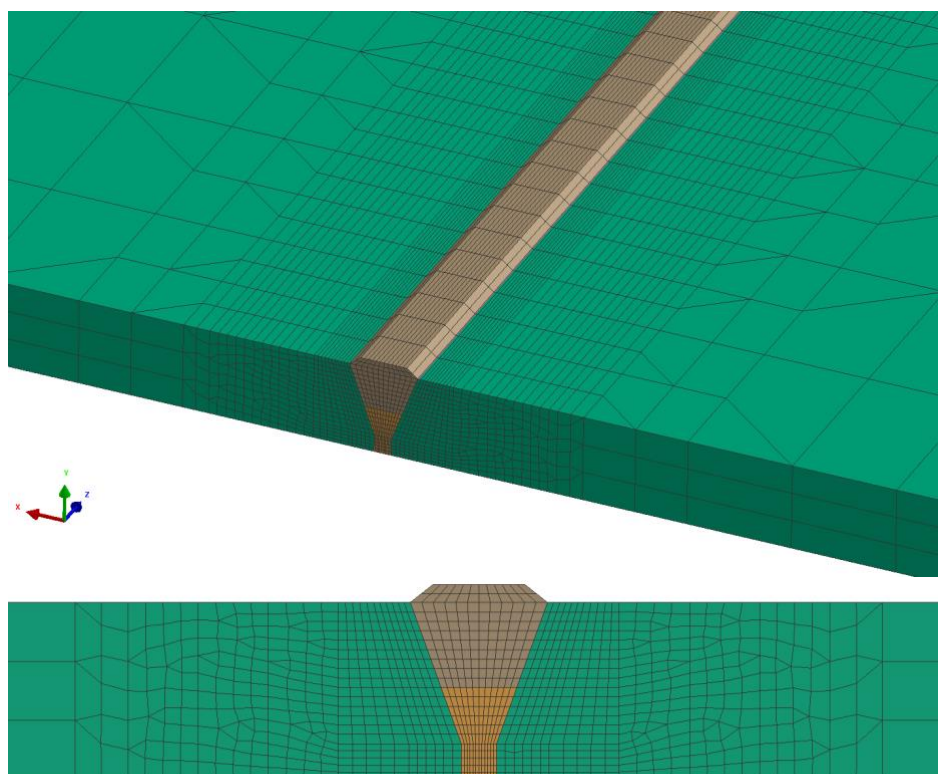
8.1 Geometria a sieť

Ako už bolo spomenuté dosky pred procesom zvránia boli vymodelované v rovine. V poskytnutých výkresoch nebola uvedená vzdialenosť medzi zvránými doskami (šírka zvarovej medzery v koreni zvaru). Táto vzdialenosť sa na základe literatúry zvolila 2 mm. Rovnako nebolo jasné aké prevýšenie oproti základnému materiálu mala zvarová húsenica po zvrání.

Vytvorená geometria a jej sieť použitá pri finálnych výpočtoch je na obr. 8.3 a 8.4. Konečno-prvkovú sieť vo výsledku tvorilo 125 596 elementov, z toho 3D elementov bolo 108 308 (základný a prídavný materiál), 2D elementov bolo 16 888 (obálka pre prestup tepla) a 1D elementov bolo 400 (trajektória a referencia).

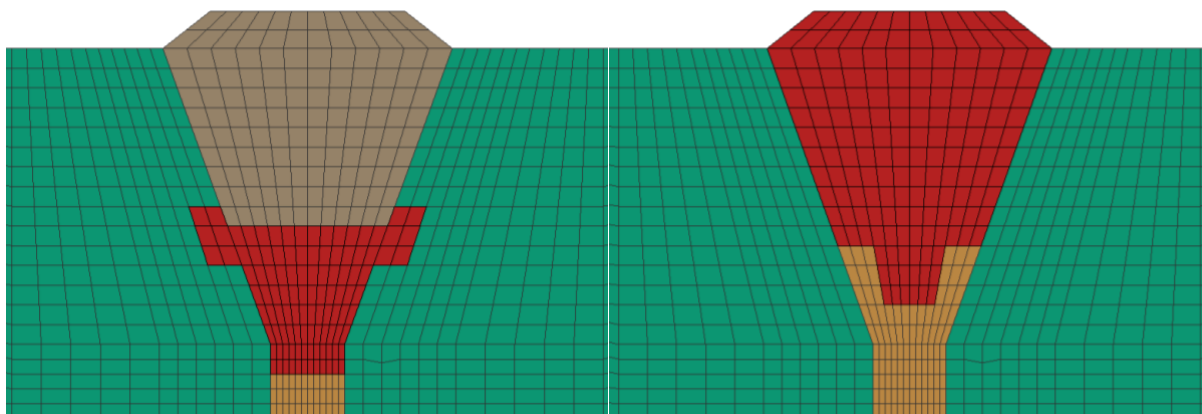


Obr. 8. 3 Geometria a sieť kútového zvaru.



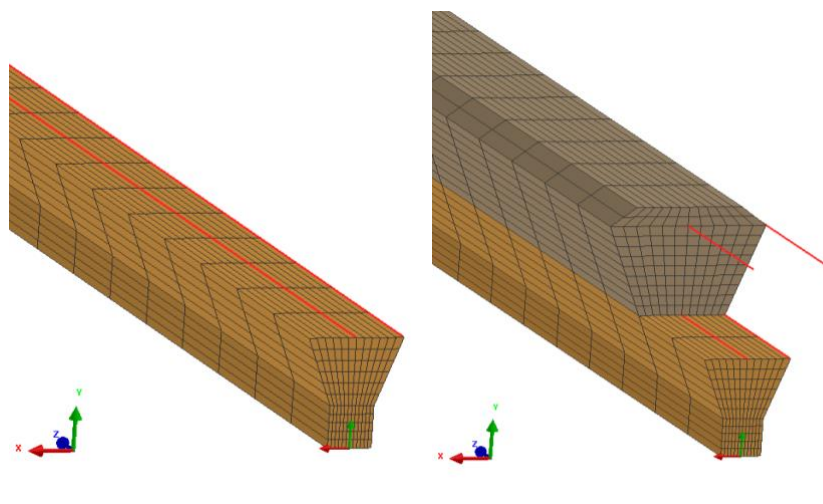
Obr. 8. 4 Detaily na zahustenie siete v okolí zvaru.

Elementy, do ktorých priamo prúdilo teplo z pohyblivého tepelného zdroja danej húsenice, sú vyznačené červeně na nasledujúcom obrázku. Boli skúšané rôzne kombinácie vybraných elementov a ich vplyv na výsledky.



Obr. 8. 5 Elementy, do ktorých teplo prúdilo priamo (vľavo prvá húsenica a vpravo druhá).

Trajektóriu a referenciu (červeně čiary) pre jednotlivé zvarové húsenice zobrazuje obr. 8.6. Je vidieť, že trajektória druhej húsenice (pravá časť obr. 8.6) nie je na povrchu zvarovej húsenice. Je na úrovni výšky základného materiálu. To preto, aby teplo z tepelného zdroja išlo priamo do materiálu vo zvarovej medzere a nie cez prevýšenie vzniknuté po zváraní.



Obr. 8. 6 Trajektória a referencia pre jednotlivé húsenice.

8.2 Materiál

Základným materiálom, ktorý sa zváral, bola oceľ S355J2. Pre výpočet bola preto použitá oceľ S355J2G3 z databázy SYSWELD-u.

Použitý prídavný materiál mal označenie G3Si1 (výrobca firma ESAB VAMBERK s.r.o). Obsahoval 0,078 % uhlíku. Jeho materiálové dáta potrebné na analýzu však neboli dostupné, preto sa použila opäť ako v kap.5 oceľ S460MC s 0,12 % C.

8.3 Proces zvárania

Podľa metódy zvárania (MAG) softvér vybral model zdroja tepla. Parametre reálne vykonaného zvárania oboch húseníc sú v nasledujúcej tabuľke.

Húsenica	Rýchlosť zvárania	Napätie	Prúd	Účinnosť prenosu elektrického oblúku
1.	7,6 mm/s	20 V	170 A	0,85
2.	5,9 mm/s	27 V	200 A	0,85

Tab. 8. 1 Použité parametre zváracieho procesu.

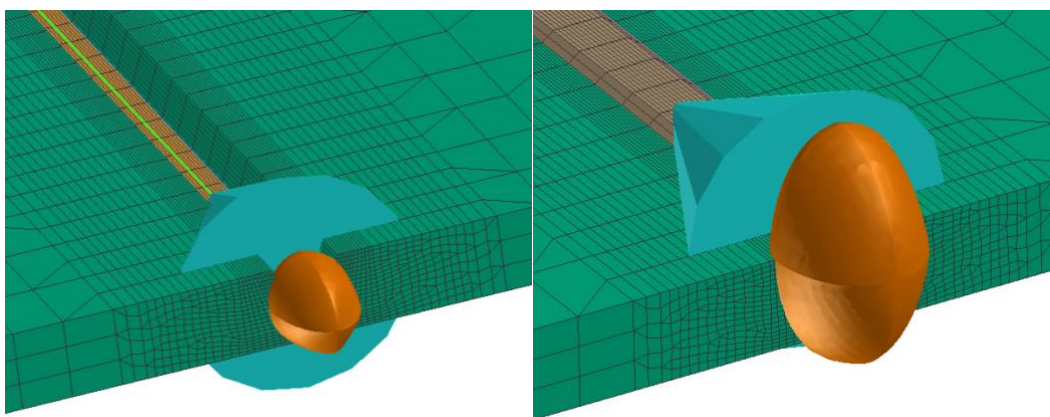
Po zadaní parametrov z tejto tabuľky do SYSWELD-u sa materiál takmer vôbec neroztavil. Bolo to spôsobené tým, že reálne zváranie bolo vykonané ručne. Pri ručnom zváraní sa používajú nižšie zváracie prúdy a napätia ako pri robotickom zváraní. Zvárač tieto nižšie parametre kompenzuje kmitavými pohybmi ruky, čím zvyšuje množstvo privedeného tepla. Preto bolo nutné hľadať také množstvo vneseného tepla, ktoré roztavilo prídavný materiál a čiastočne natavilo kus základného.

Rovnako ako v kapitole 5 bolo nutné hľadať aj vhodné rozmery tepelného zdroja. Navyše pri tomto zvare išlo o dve rozdielne húsenice, to znamená hľadanie parametrov pre každú húsenicu zvlášť.

Keďže nebol dostupný makrovýbrus, nebolo možné ani presne určiť koľko materiálu bolo pridaného pri prvej a koľko pri druhej zvarovej húsenici. Opäť boli skúšané rôzne pomery.

Všetky tieto neznáme parametre komplikovali analýzu. Navyše ide o pomerne veľkú geometriu s dlhým časom zvarovania (prvá húsenica 66 s a druhá 85 s), čo malo za následok aj dlhý výpočtový čas. Preto bol vytvorený krátky model (päťtinová dĺžka v smere zvarovania). Vykonaný kontrolný výpočet s rovnakými nastaveniami dlhého a krátkeho modelu (rozdielna bola iba dĺžka v smere zvarovania). Po porovnaní výsledkov sa zistilo, že zvyškové napätia a deformácie po zvaraní sa nezhodujú. Preto bol krátky model použitý iba na ladenie tepelnej analýzy (hlavne nastavenej oblasti). Na mechanickú analýzu musel byť znova používaný model celej dĺžky.

Použité tepelné zdroje vo finálnom výpočte je vidieť na nasledujúcom obrázku.



Obr. 8. 7 Použité tepelné zdroje (vľavo pre prvú a vpravo pre druhú húsenicu).

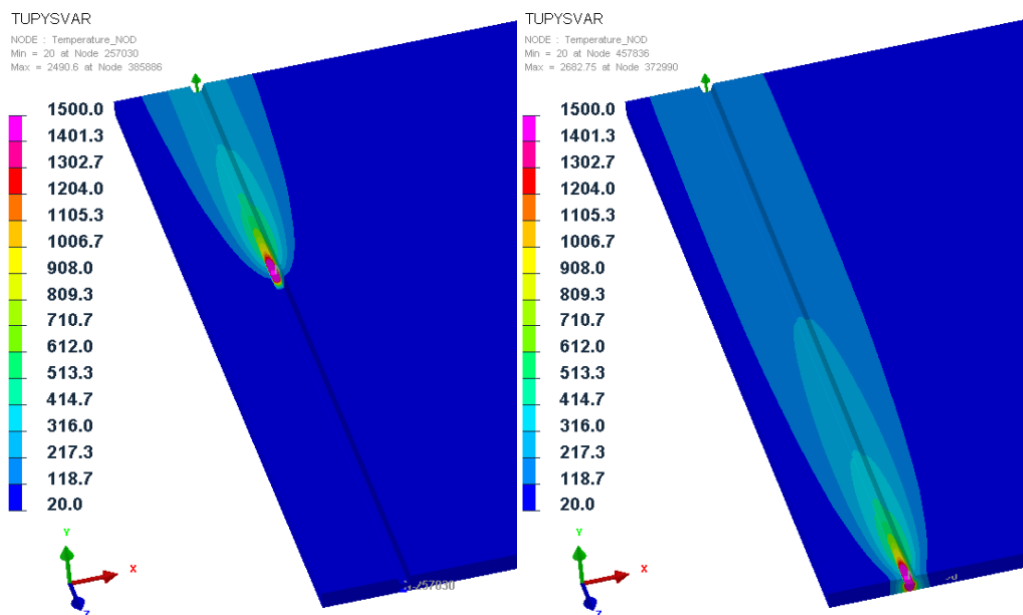
8.4 Okrajové podmienky

Po zvaraní sa chladlo na vzduchu s teplotou 20 °C. Počítalo sa celkovo do času 3000 s od začiatku zvarovania prvej húsenice, kedy došlo k takmer úplnému vychladnutiu zvaru. Druhá húsenica sa pritom začala zvärať v čase 100 s.

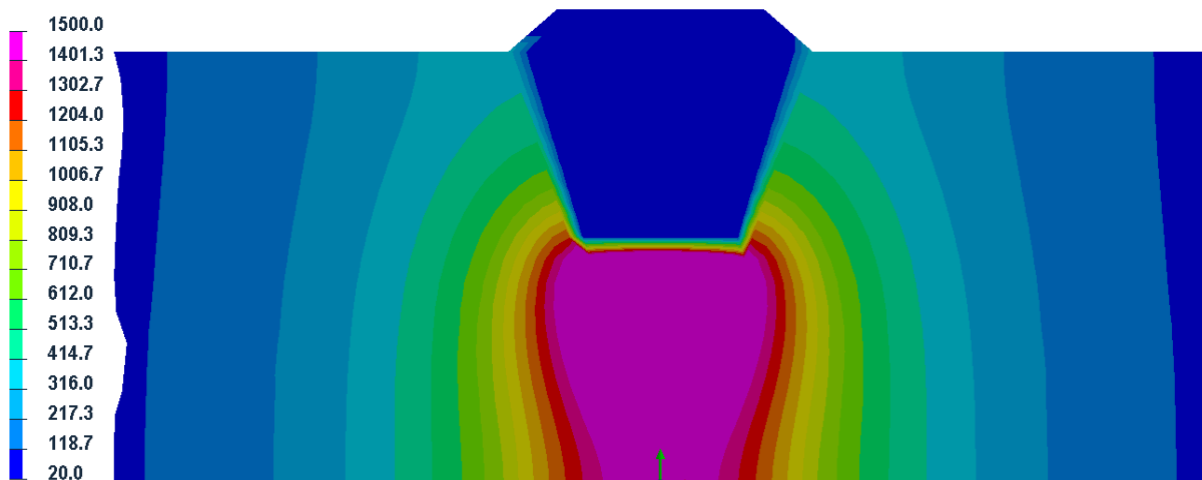
Zvarenec nebol nijako upnutý, a preto sa použili iba väzby zaručujúce jeho statické uloženie.

8.5 Výsledky tepelnej analýzy

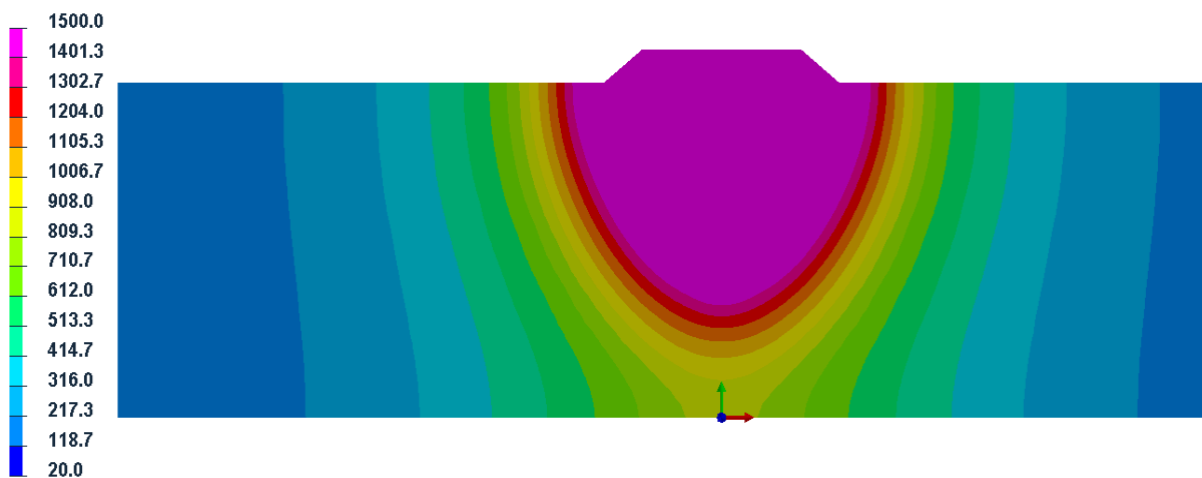
Prejazd tepelného zdroja v rôznych fázach zvarovania prvej húsenice je na obr. 8.8, nim generovaná natavená oblasť je na obr. 8.9. Maximálna teplota sa pohybovala okolo hodnoty 2500 °C. Druhú zvarovú húsenicu, kde bola maximálna teplota približne 2600 °C, reprezentuje obr. 8.10 a obr. 8.11.



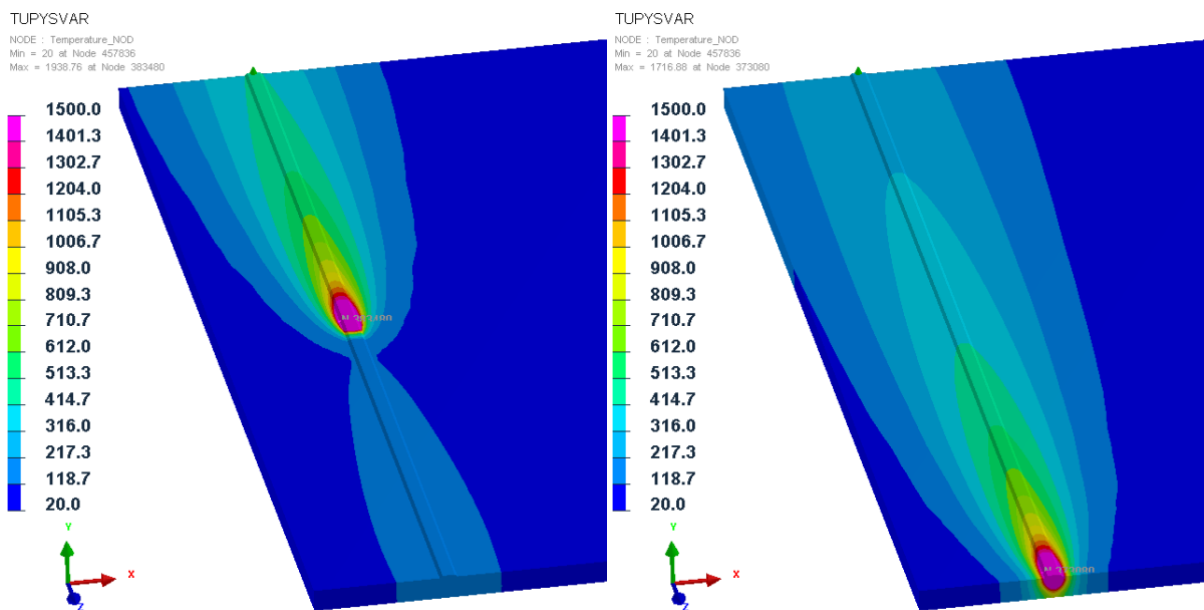
Obr. 8. 8 Tepelný zdroj v různých časech při tvorbě prvej húsenice.



Obr. 8. 9 Tvar natavenej oblasti počas zvárania prvej húsenice.

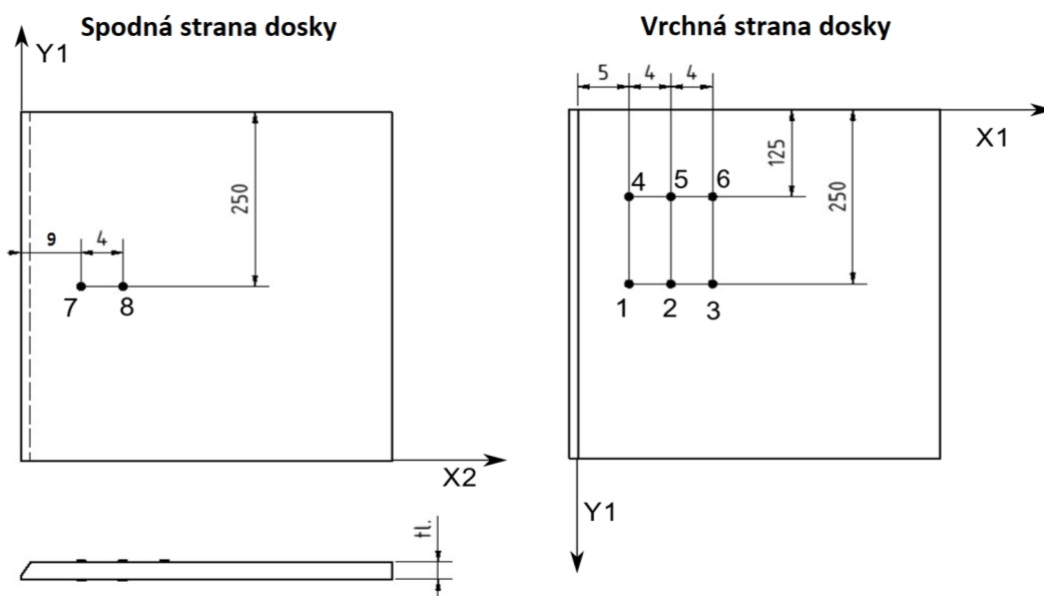


Obr. 8. 10 Tvar natavenej oblasti počas zvárania druhej húsenice.

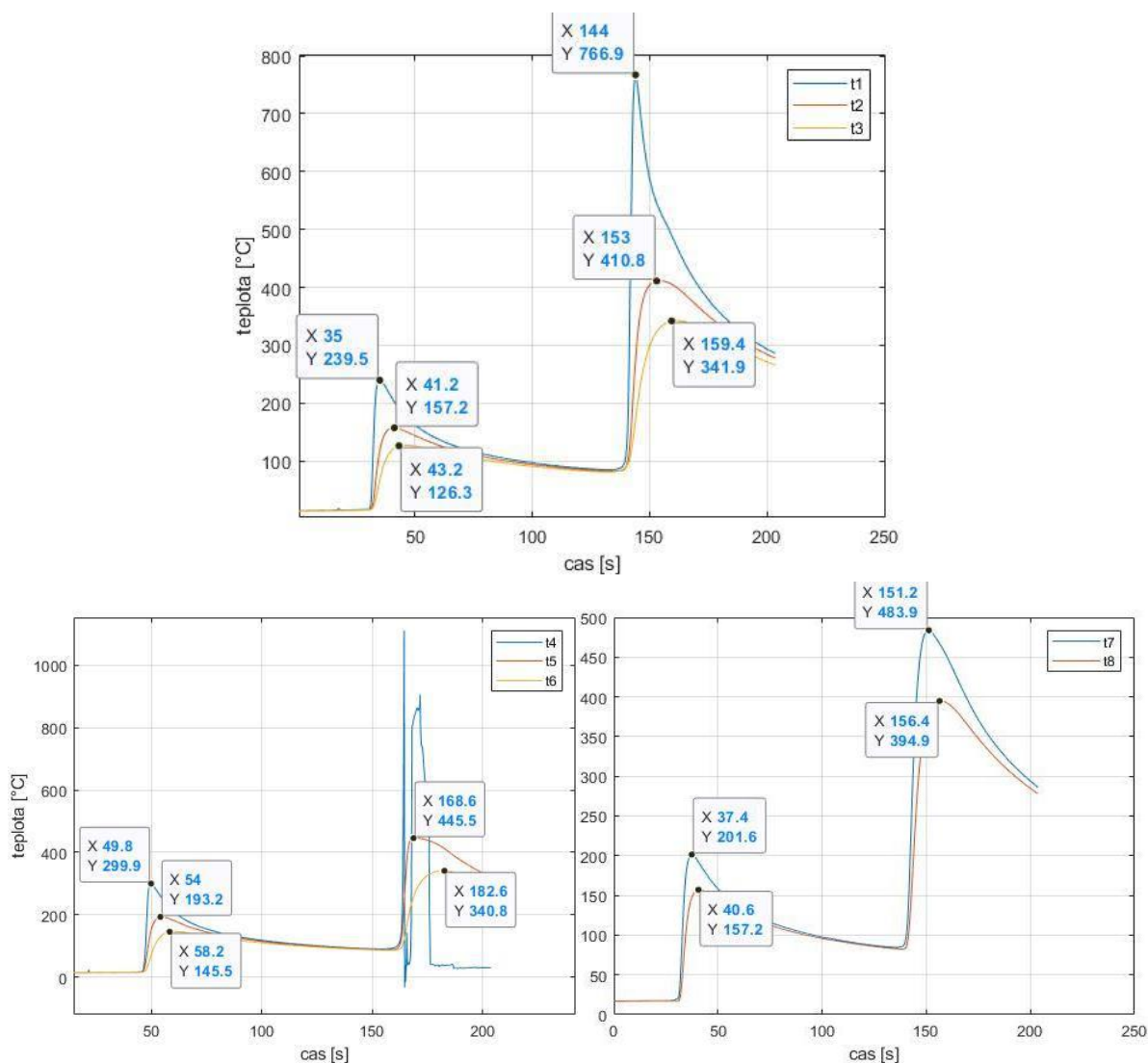


Obr. 8.11 Tepelný zdroj v různých časech při tvorbě druhé hůsenice.

Obr. 8.9 a 8.10 zobrazují natavené oblasti. Ideálně je, ak sa môžu porovnať s makrovýbrusom zvaru a na jeho základe upraviť. Jedinou možnosťou kontroly boli v tomto prípade namerané priebehy teplôt pomocou termočlánkov. Ako boli merané vidieť na [obr. 8.1](#), kde boli merané na obr. 8.12 a ich konkrétne priebehy sú na obr. 8.13. Je vidieť, že celkovo sa použilo osem termočlánkov (6 na vrchnej a 2 na spodnej strane dosky). Označené sú číslami 1-8 a pod týmito číslami sú vykreslené ich priebehy v obr. 8.13. V tomto obrázku sú vyznačené aj maximálne teploty, pričom pre každý priebeh sú označené dve. Prvá odpovedá maximálnej teplote pri zváraní prvej hůsenice a druhá pri zváraní druhej. Termočlánok t4 pri zváraní druhej hůsenice meral nesprávne.



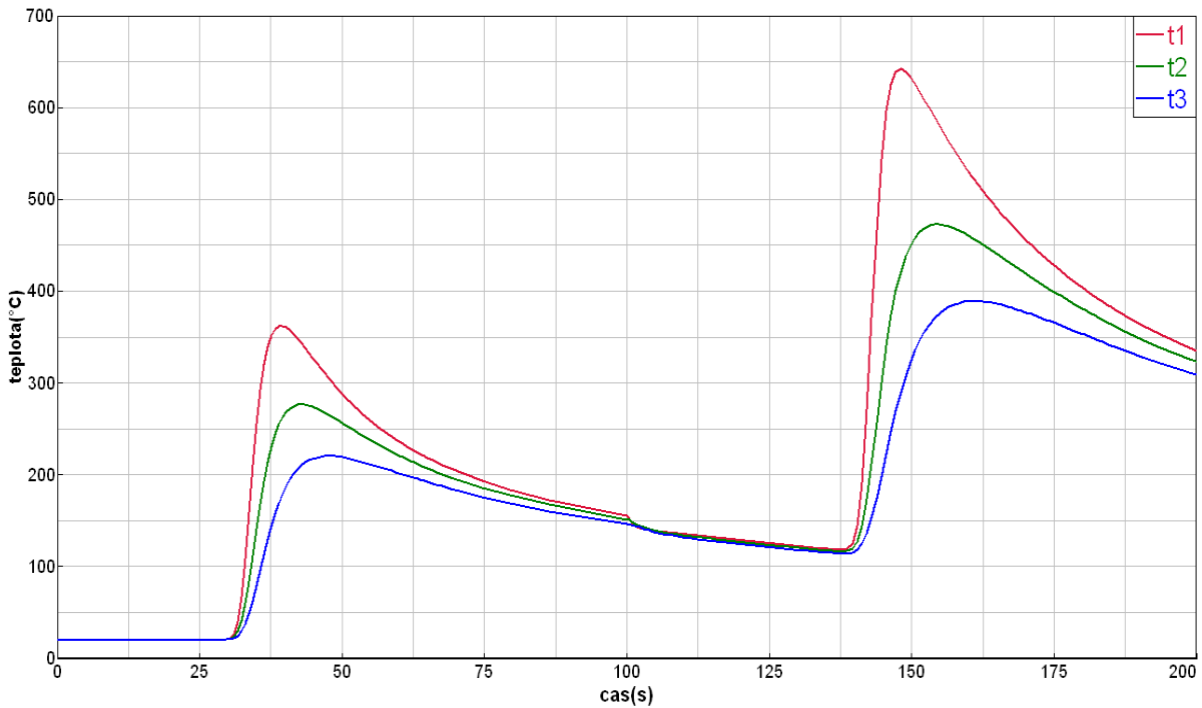
Obr. 8.12 Miesta merania teploty pomocou termočlánkov.



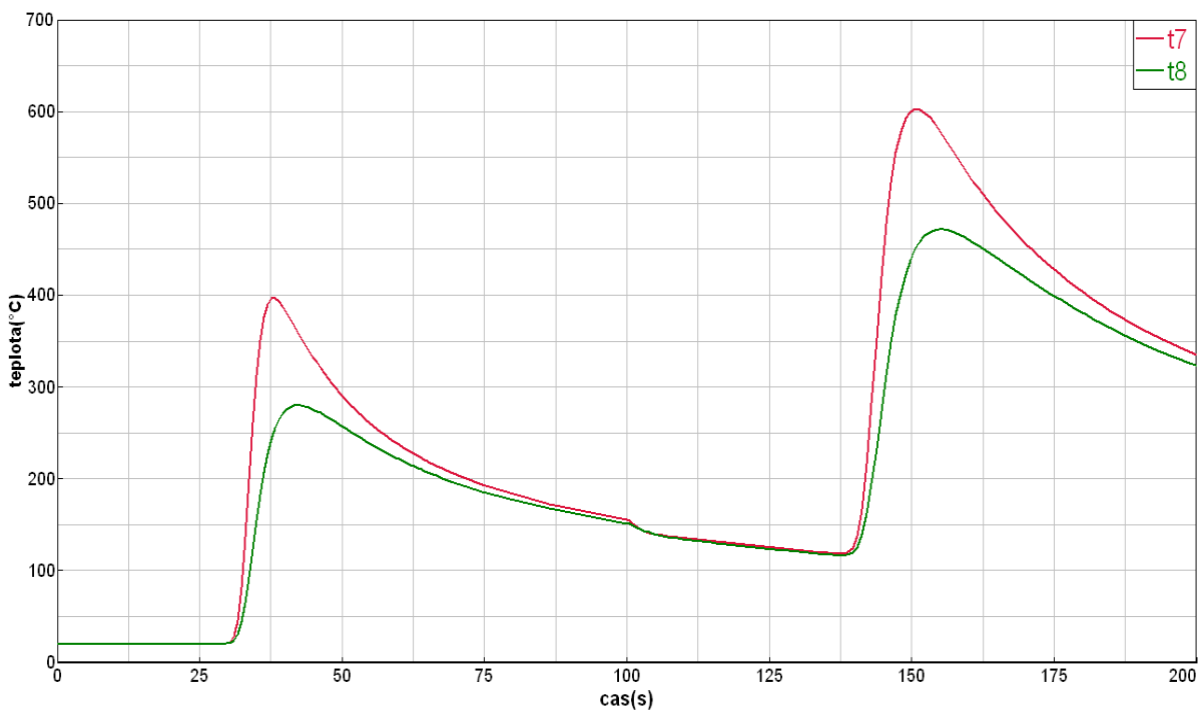
Obr. 8.13 Priebehy teplôt merané pomocou termočlánkov.

Priebehy teplôt získané zo SYSWELD-u, vykreslené v rovnakých miestach ako boli merané pomocou termočlánkov, sú na obr. 8.14 a 8.15. Priebehy v miestach nalepenia termočlánkov t4-t6 nie sú uvedené, pretože tieto termočlánky boli nalepené v rovnakých vzdialenostiach od zvaru (viď obr. 8.12) ako termočlánky t1-t3. Boli iba posunuté v smere zvarovania. Preto priebehy teplôt t4-t6 získané pomocou SYSWELD-u sú rovnaké a majú totožné maximálne teploty ako termočlánky t1-t3. Jediný rozdiel je, že priebeh teplôt t4-t6 je posunutý o časový úsek, za ktorý sa k nim dostal tepelný zdroj. Zaujímavé je, že namerané hodnoty teplôt (obr. 8.13) pri termočlánoch t1-t3 a t4-t6 sú rozdielne. To môže byť spôsobené napríklad ručným zvarovaním, nepresnosťou termočlánkov alebo aj ich nie úplne presným nalepením (gradienty teplôt sú v týchto oblastiach vysoké).

Výsledky z horného grafu obr. 8.13 je možné porovnať s obr. 8.14 a výsledky zo spodného pravého grafu obr. 8.13 zase s obr. 8.15. Sú medzi nimi vidieť určité rozdiely. Na výsledky procesu zvarovania má však najväčší vplyv tvar a veľkosť natavenej oblasti, ktorá by sa mala porovnávať s makrovýbrusom a na ktorej tvar sa prihliadalo. Výsledky z termočlánkov slúžili iba na druhotnú kontrolu (na ich základe nie je možné nastaviť rozmery tepelného zdroja).

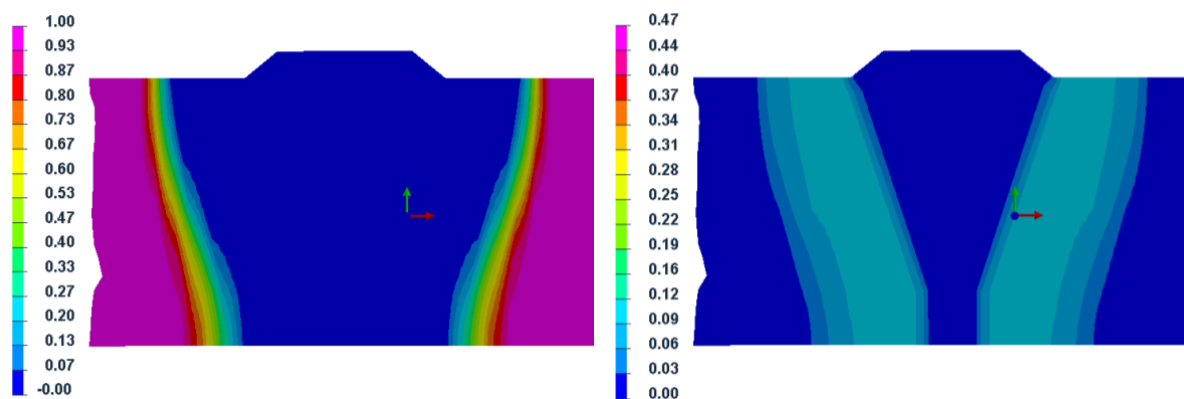


Obr. 8. 14 Priebehy teplôt zo SYSWELD-u v miestach nalepenia termočlánkov t1-t3.

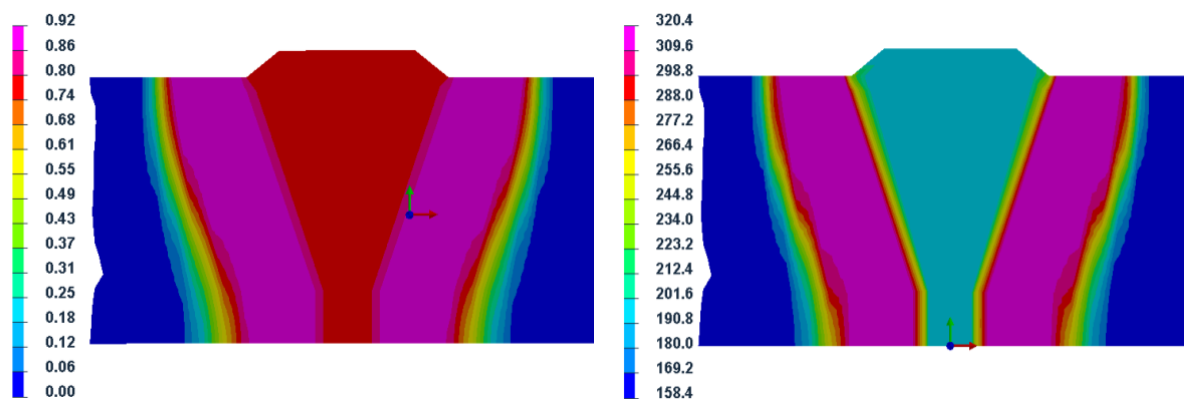


Obr. 8. 15 Priebehy teplôt zo SYSWELD-u v miestach nalepenia termočlánkov t7 a t8.

Rozloženie štruktúr (fáz) po procese zvarania tupého zvaru a výsledná tvrdosť materiálu sú na nasledujúcich obrázkoch. Tieto výsledky (najmä tvrdosť) sú však skôr informačné. Aby výsledky odpovedali experimentu, bolo by nutné zadať presné materiálové dáta pre použitý prídavný materiál (vo výpočtoch je použitý iný ako v experimente vid' [kap. 8.2](#)).



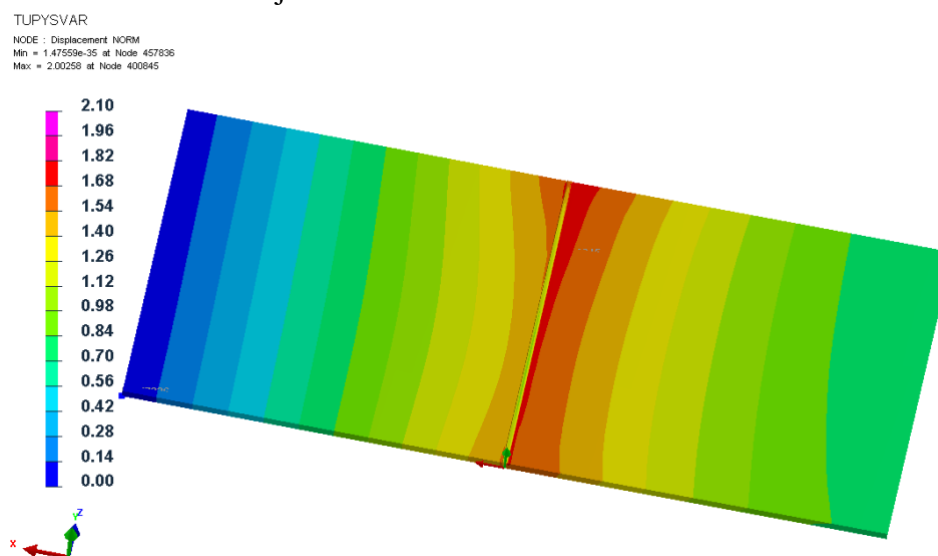
Obr. 8. 16 Vľavo obsah feriticko-perlitickej štruktúry a vpravo obsah martenzitu.



Obr. 8. 17 Vľavo obsah bainitu a vpravo tvrdosť materiálu v jednotkách [HV].

8.6 Výsledky mechanickej analýzy

Obrázok 8.18 ukazuje ako sa zdeformoval tupý zvar po zváraní. Vykreslené sú posuvy s maximálnou hodnotou dosahujúcou 2 mm.



Obr. 8. 18 Posuvy po zváraní tupého zvaru.

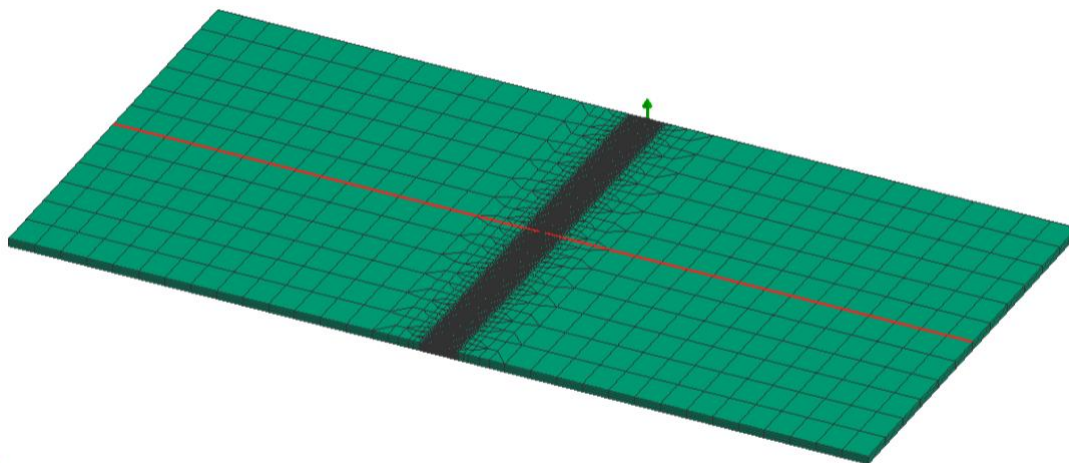
Po reálnom zváraní, kedy bolo miesto zvaru podložené o 10 mm oproti krajom dosiek, došlo k takmer úplnému vyrovnaniu zváraných dosiek. Za predpokladu, že ide o posuv približne o veľkosti 10 mm v mieste zvaru (to bolo podložené), maximálny posuv z obr. 8.18 neodpovedá a je menší.

Bolo vykonaných niekoľko analýz, ktoré menili tvar a veľkosť natavenej oblasti, prevýšenie vzniknutého zvaru nad základným materiálom, množstvo vneseného tepla, pomer množstva prídavného materiálu prvej a druhej húsenice, no v žiadnej nebol dosiahnutý tak veľký posuv.

Reálne zváranie bolo vykonané tak, že pred samotným zváraním húseníc boli konce zváraných dosiek zostehované. To určitým spôsobom zmenilo tuhosť dosiek. Vykonali sa analýzy procesu zvárania aj so stehovaním, no opäť to na veľkosti posuvov nemalo výrazný dopad.

Možným príčinám rozdielu medzi experimentálnym a výpočtovým posuvom sa venuje [kapitola 10](#).

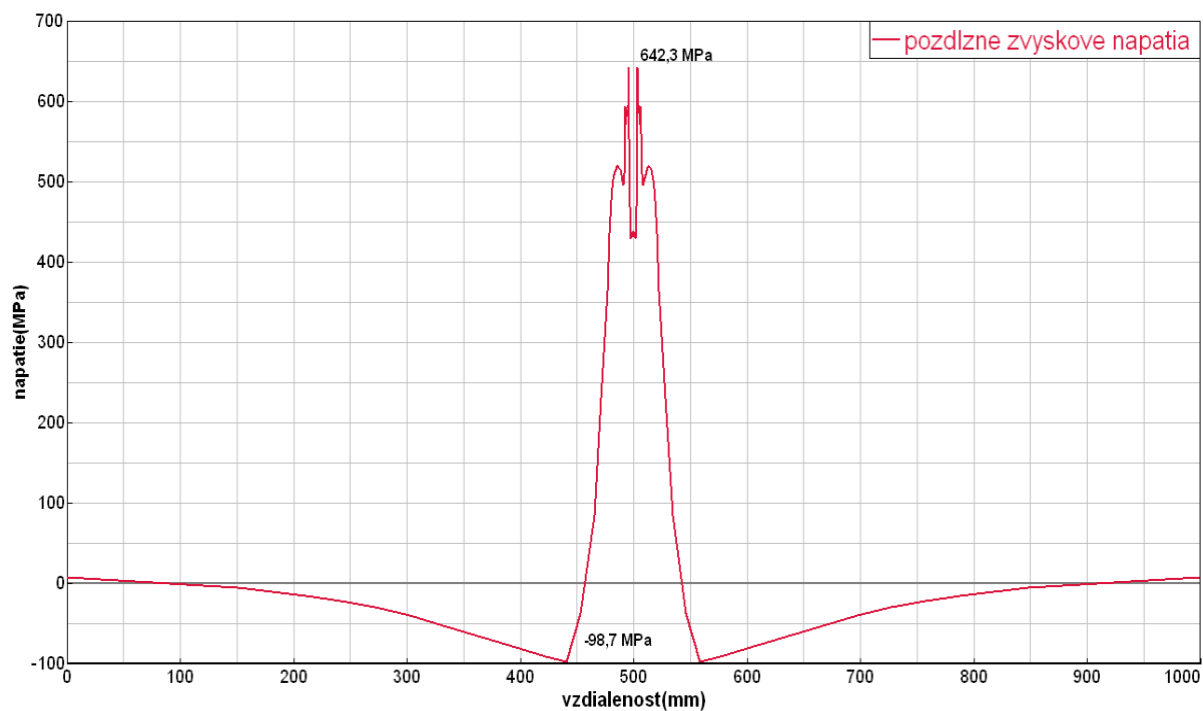
Grafy v tejto a aj nasledujúcej kapitole sú vykreslené na ceste, ktorú ukazuje obr. 8.19.



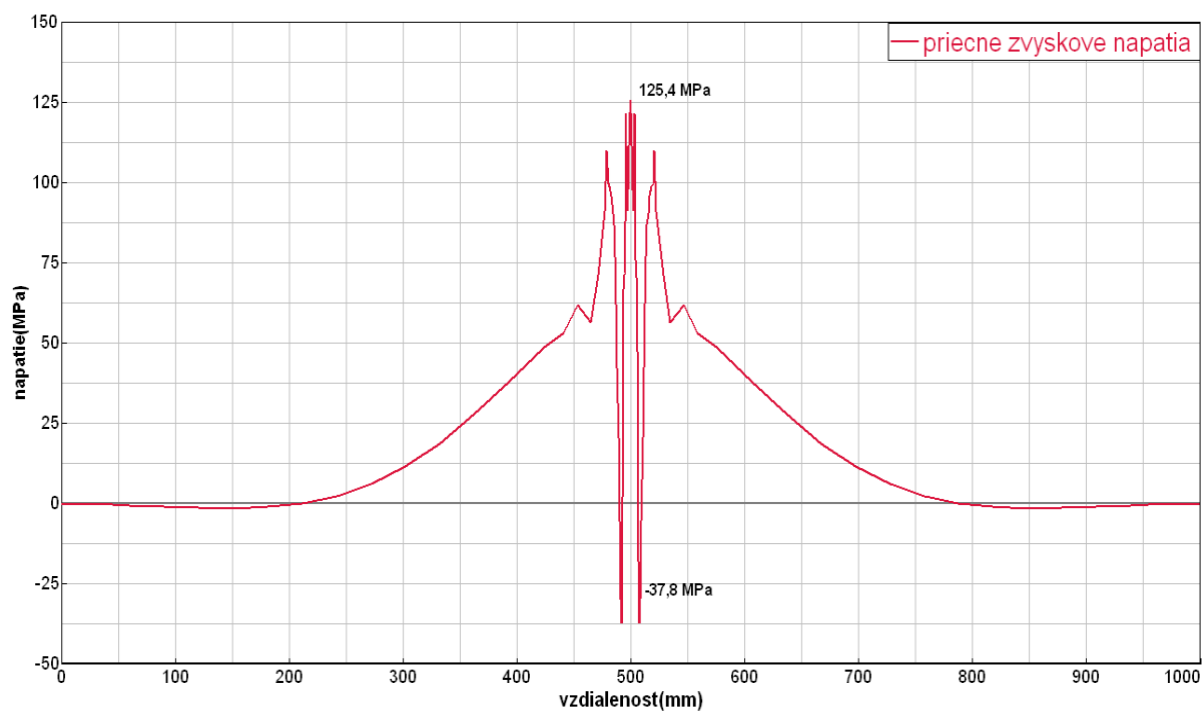
Obr. 8. 19 Cesta, na ktorej sú vykresľované grafy.

Pozdĺžne zvyškové napätie reprezentuje obrázok 8.20, priečne obr. 8.21. Redukované zvyškové napätia podľa podmienky HMH sú zase kvôli názornosti vykreslené na celej geometrii (obr. 8.22), v rezoch geometrie (obr. 8.23) a kvôli možnosti porovnania aj v grafe (obr. 8.24). Ich maximálna hodnota dosahovala takmer 653 MPa.

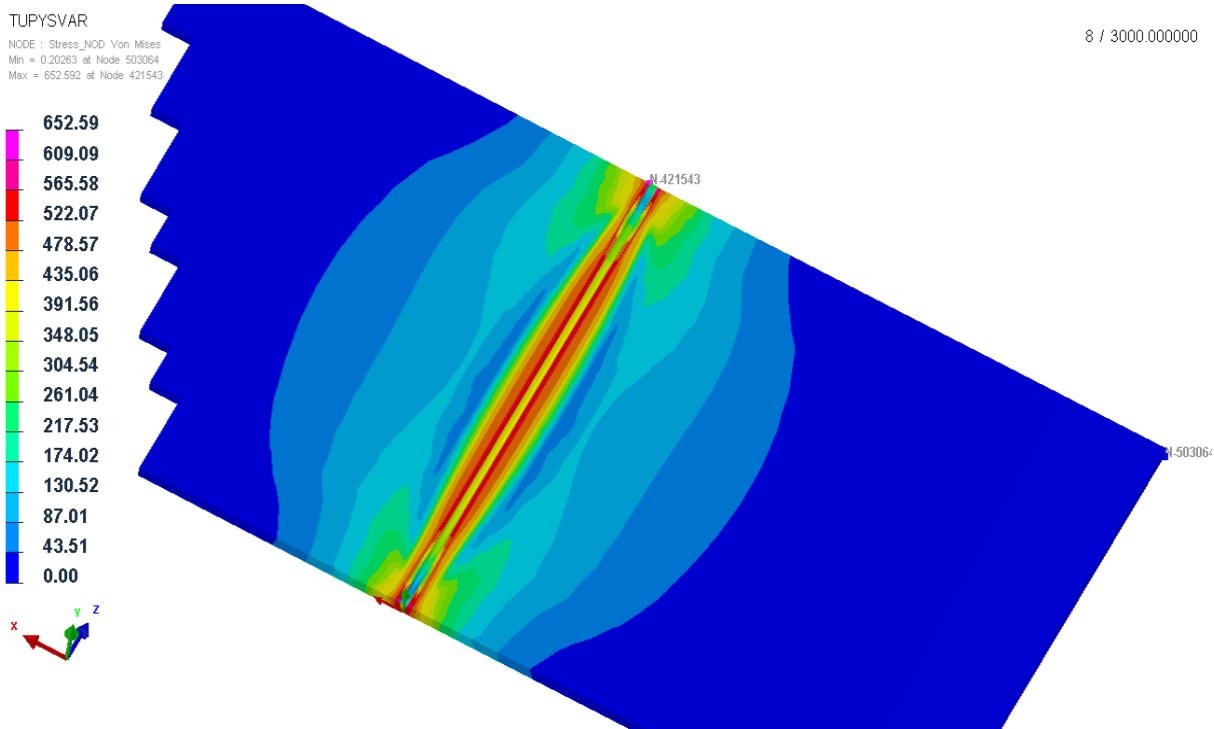
Obrázok 8.25 zobrazuje detail priebehu redukovaného zvyškového napätia vo zvare a jeho okolí. Zvislými čiernymi čiarami je vyznačený zvar a modrými hranice tepelne ovplyvnenej oblasti.



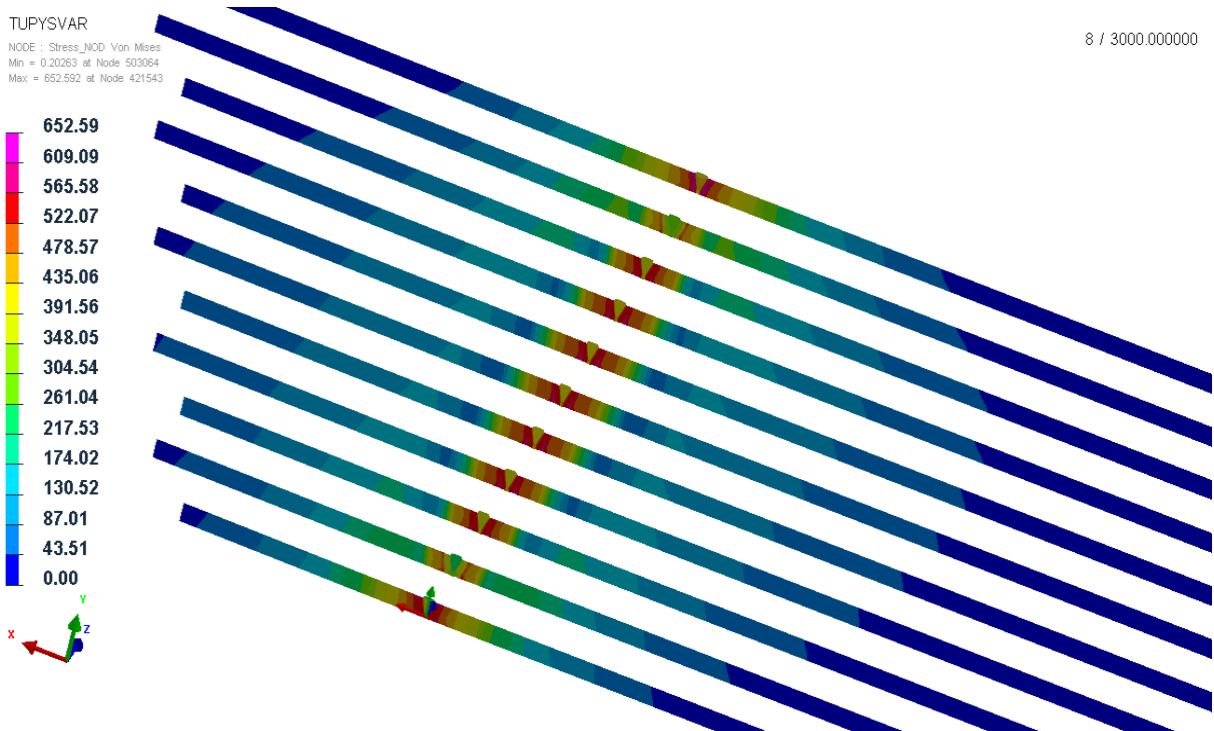
Obr. 8. 20 Priebeh pozdĺžnych zvyškových napätí po zváraní tupého zvaru.



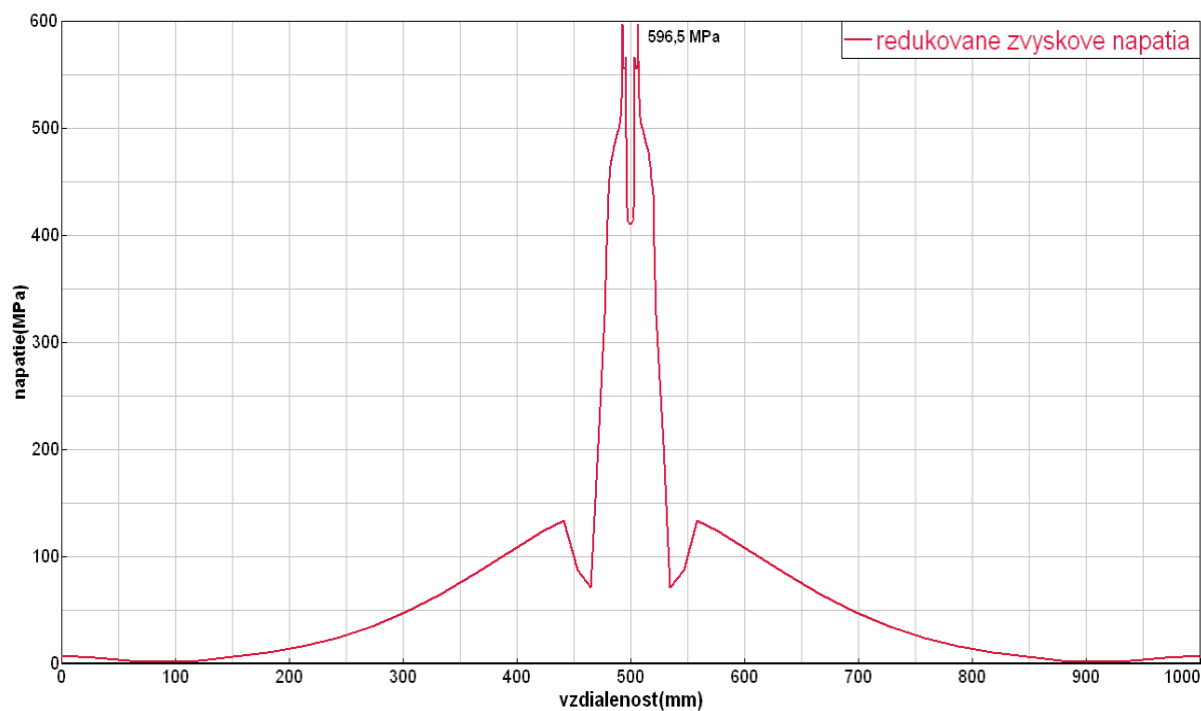
Obr. 8. 21 Priebeh priečných zvyškových napätí po zváraní tupého zvaru.



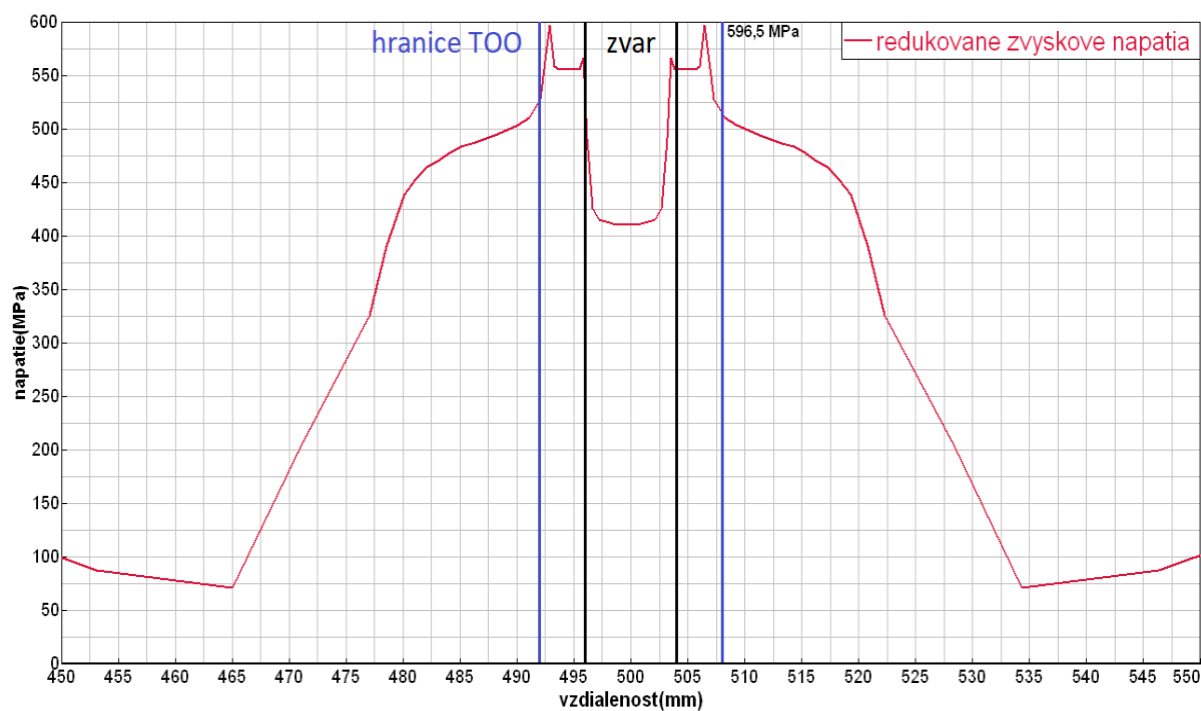
Obr. 8. 22 Redukované zvyškové napätia podľa HMM.



Obr. 8. 23 Redukované zvyškové napätia podľa HMM vykreslené v rezoch.



Obr. 8. 24 Redukované zvyškové napätia podľa HMM vykreslené v grafe.



Obr. 8. 25 Detail priebehu redukovaného zvyškového napätia vo zvare a jeho okolí.

9 Tupý zvar ANSYS

V tejto časti práce je riešená rovnaká geometria a proces zvárania ako v [kapitole 8](#). Výpočtové modelovanie sa vykonalo v programe ANSYS. Jeho princíp je obdobný s [kapitolou 6](#), preto sú prezentované skôr jeho výsledky a rozoberané sú len veci, ktoré sa oproti kapitole 6 líšili.

Hlavný rozdiel, oproti kapitole 6 a v nej riešenej geometrii kútového zvaru, bol v tom, že pri tupom zvare ležali zvarové húsenice na sebe. To spôsobovalo značné komplikácie pri tvorbe a riešení výpočtového modelu v ANSYS-e (v SYSWELD-e sa tieto problémy nevyskytovali).

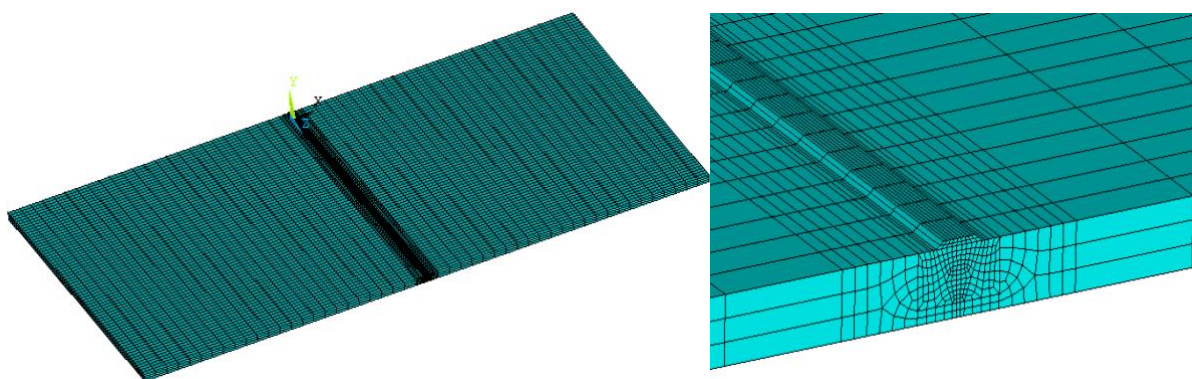
Pri výpočtovom modelovaní procesu zvárania sa už na začiatku vytvára geometria, ktorá obsahuje prídavný materiál (ten tam reálne ešte nie je). Počas prejazdu prvého tepelného zdroja sú teda prítomné aj elementy prídavného materiálu, ktorý vzniká až pri zváraní druhej zvarovej húsenice. Na vyriešenie tohoto problému bola použitá tzv. *Element Birth and Death technique*. Ide o aktiváciu a deaktiváciu elementov, kedy deaktivované elementy majú priradené veľmi malé vlastnosti a tak neovplyvňujú riešenú úlohu. Avšak teplo generované tepelným zdrojom prúdilo aj do deaktivovaných elementov, to malo samozrejme za následok chybné výsledky. Riešenie tohoto problému je popísané už v [kapitole 9.5](#).

9.1 Zjednodušenia pri výpočtovom modelovaní v ANSYS-e

Oproti výpočtom v SYSWELD-e (kap. 8) sú použité rovnaké zjednodušenia ako tie popísané v [kap. 6.1](#). Konkrétne nie sú uvažované fázové transformácie materiálu, použil sa jednoduchší elipsoidný model zdroja tepla, zanedbané sú straty tepla radiáciou a elementy prídavného materiálu sú aktivované naraz (nie postupne).

9.2 Geometria a sieť

Vytvorenú geometriu a sieť tupého zvaru je vidieť na obr. 9.1. Tvorilo ju 27 020 prvkov.



Obr. 9. 1 Vytvorená geometria a sieť: celý model(vľavo) a detail na zvar(vpravo).

9.3 Materiál

Rovnako ako v [kap. 6.3](#) sa neuvažujú fázové transformácie. Preto je celá geometria popísaná jedným materiálom, ocel'ou s označením S355, ktorej termofyzikálne a mechanické vlastnosti potrebné pre analýzu sú prevzaté z [34].

9.4 Proces zvarania

Na popis tepelného zdroja sa použil elipsoidný model. Jeho definovanie v ANSYS-e je popísané v [kap. 6.4](#).

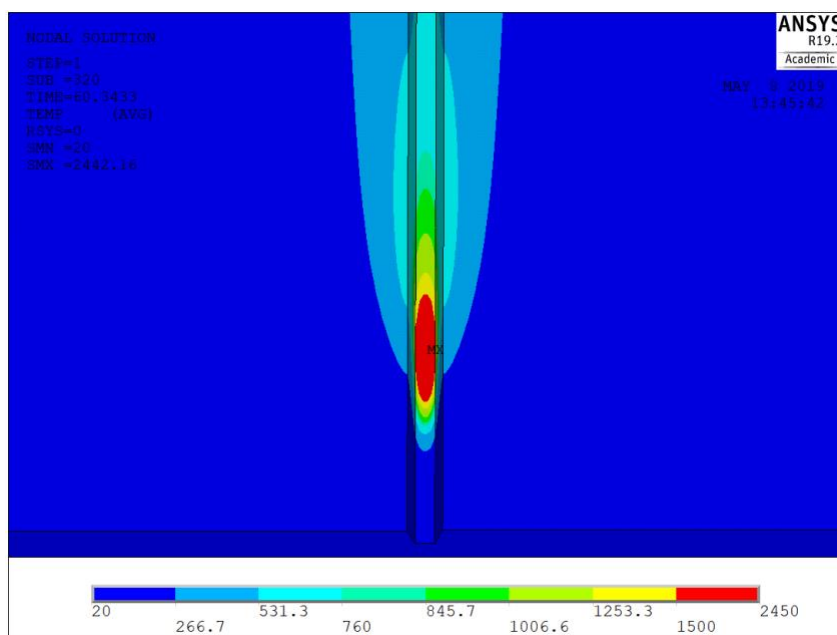
Rovnako ako v [kap. 8.3](#) bolo potrebné určiť nie len rozmery tepelného zdroja, ale aj množstvo vneseného tepla, keďže dostupné zvaracie parametre boli z ručne vykonaného zvarania a neroztavili materiál vo zvare. Navyše zvarali sa dve rozdielne húsenice, takže bolo potrebné hľadať vhodné hodnoty pre každú samostatne.

Výpočty procesu zvarania geometrie plnej veľkosti trvali niekoľko dní, preto bol vytvorený krátky model (v smere zvarania). Ten sa využil na ladenie výsledkov tepelnej analýzy a aspoň na odhad výsledkov analýzy mechanickej.

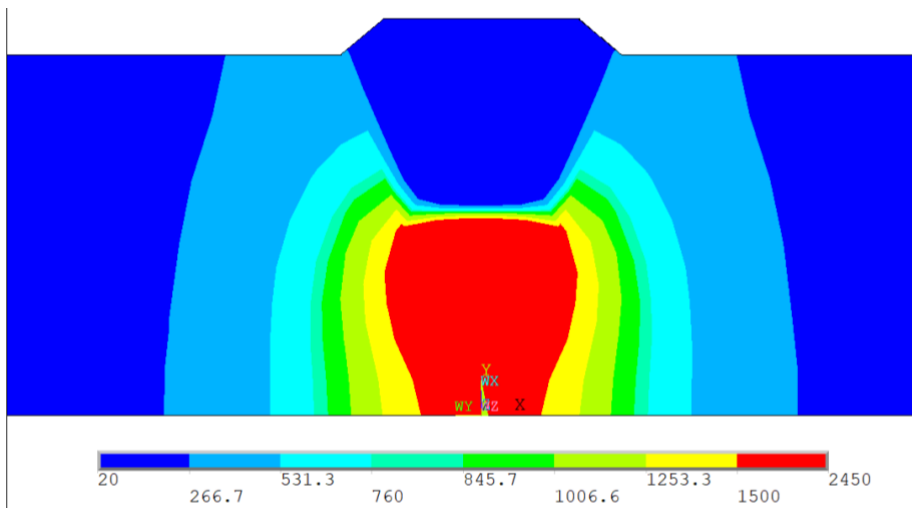
9.5 Nastavenia a výsledky tepelnej analýzy

Nastavenie analýzy prebiehalo obdobne ako v [kap. 6.5](#). Komplikáciou bolo, že zvarové húsenice ležali na sebe a teplo zo zdroja prvej húsenice prúdilo aj do elementov prídavného materiálu druhej húsenice a to aj napriek tomu, že boli deaktivované. Tento problém sa nakoniec vyriešil predpísaním teploty 20 °C (referenčná teplota) do uzlov patriacich prídavnému materiálu druhej húsenice na čas, kedy boli deaktivované.

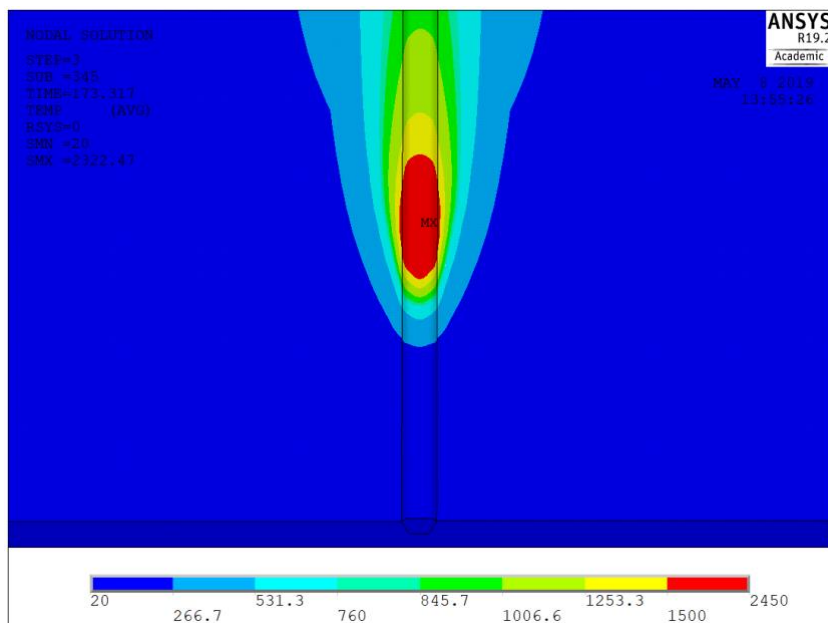
Výsledky tepelnej analýzy sú vidieť na nasledujúcich obrázkoch.



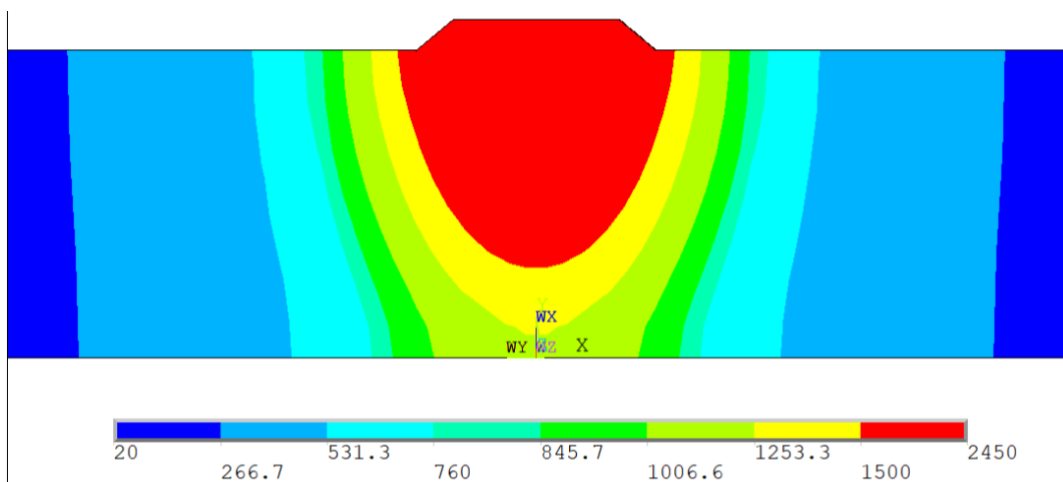
Obr. 9. 2 Tepelný zdroj pri tvorbe prvej zvarovej húsenice.



Obr. 9. 3 Tvar natavené oblasti první hůsenice.



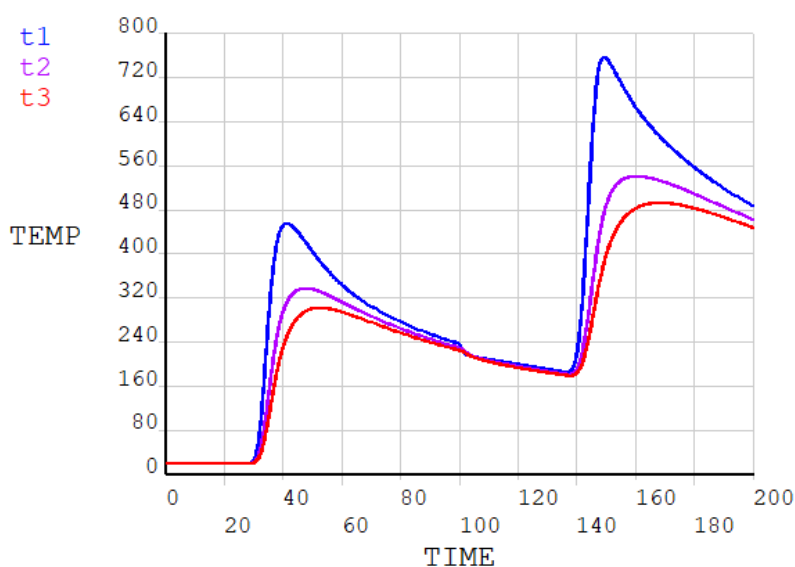
Obr. 9. 4 Tepelný zdroj při tvorbě druhé zvarové hůsenice.



Obr. 9. 5 Tvar natavené oblasti druhé hůsenice.

Obrázok 9.2 ukazuje tepelný zdroj pri tvorbe prvej zvarovej húsenice. Maximálna teplota sa pohybovala okolo hodnoty 2440 °C. Natavenú oblasť vytváranú zdrojom ukazuje obr. 9.3. Porovnať ju je možné s výsledkom zo SYWELD-u (obr. 8.9). Druhej zvarovej húsenice sa týkajú obr. 9.4 a 9.5 (možné porovnať s obr. 8.10). Maximálna teplota bola približne 2350 °C.

Priebehy teplôt získané z ANSYS-u v miestach merania pomocou termočlánkov zobrazuje obr. 9.6. Je možné ich porovnať s obr. 8.13 a obr. 8.14. Vidieť medzi nimi určitú odlišnosť v maximálnych teplotách. Tá je spôsobená tým, že sa prihliadalo hlavne na tvar natavenej oblasti. Navyše priebehy v obr. 9.6 nie sú vykreslené v presných miestach merania pomocou termočlánkov, ale v najbližších uzloch siete k týmto miestam.



Obr. 9. 6 Priebehy teplôt z ANSYS-u v miestach nalepenia termočlánkov t1-t3.

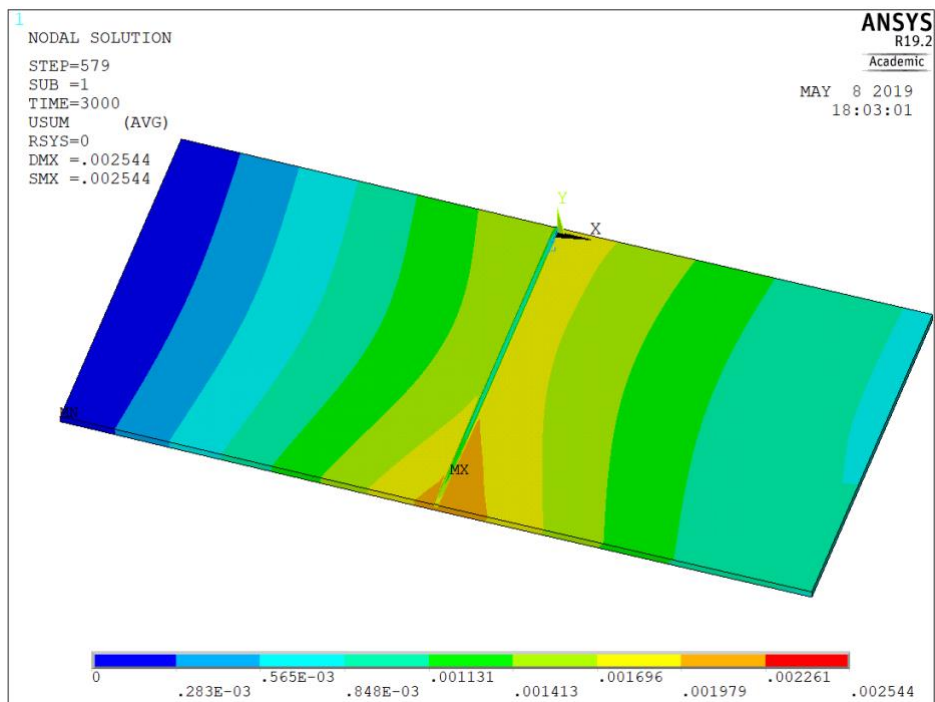
9.6 Nastavenia a výsledky mechanickej analýzy

Nastavenie je opäť obdobné ako v [kap. 6.6](#). Zvarenec nebol nijako upnutý, takže sa použili iba väzby zaručujúce jeho statickú určitosť.

Aby boli dosiahnuté správne výsledky, museli byť, rovnako ako v tepelnej analýze, deaktivované elementy prídavného materiálu druhej húsenice až do času jej zvárania.

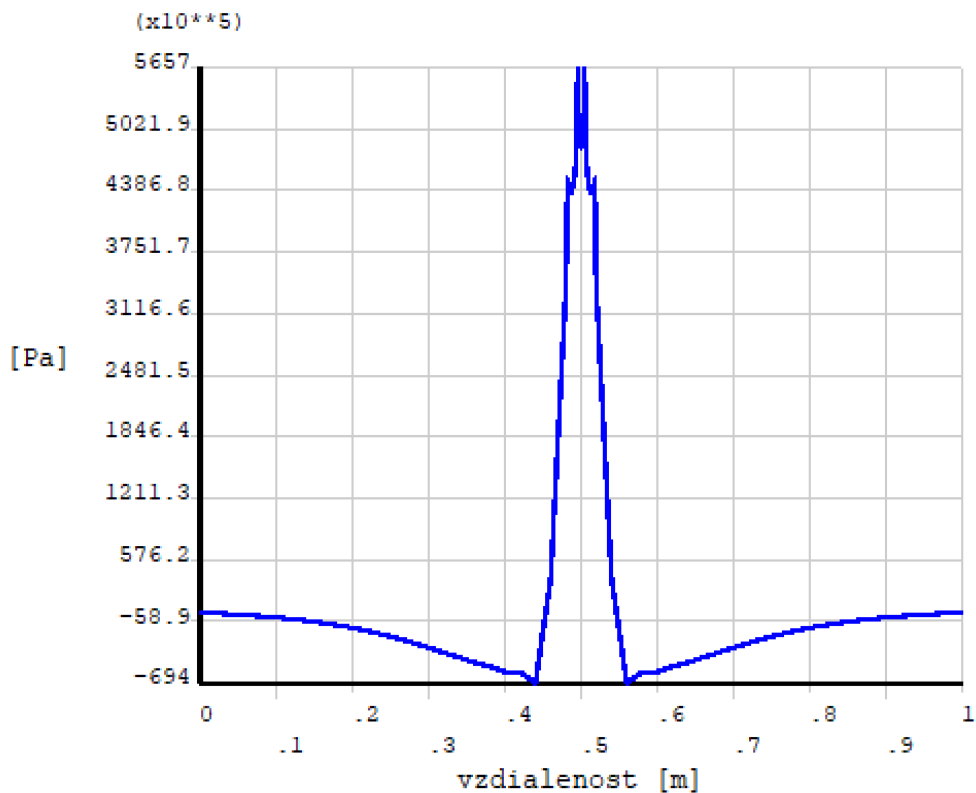
Posuvy po zváraní kútového zvaru zobrazuje obr. 9.7. Ich maximálna hodnota presahovala 2,5 mm.

Grafy tejto kapitoly sú vykreslené na rovnakej ceste ako grafy v predošlej kapitole. Hodnoty napätí na y-ovej osi sú v Pascaloch.

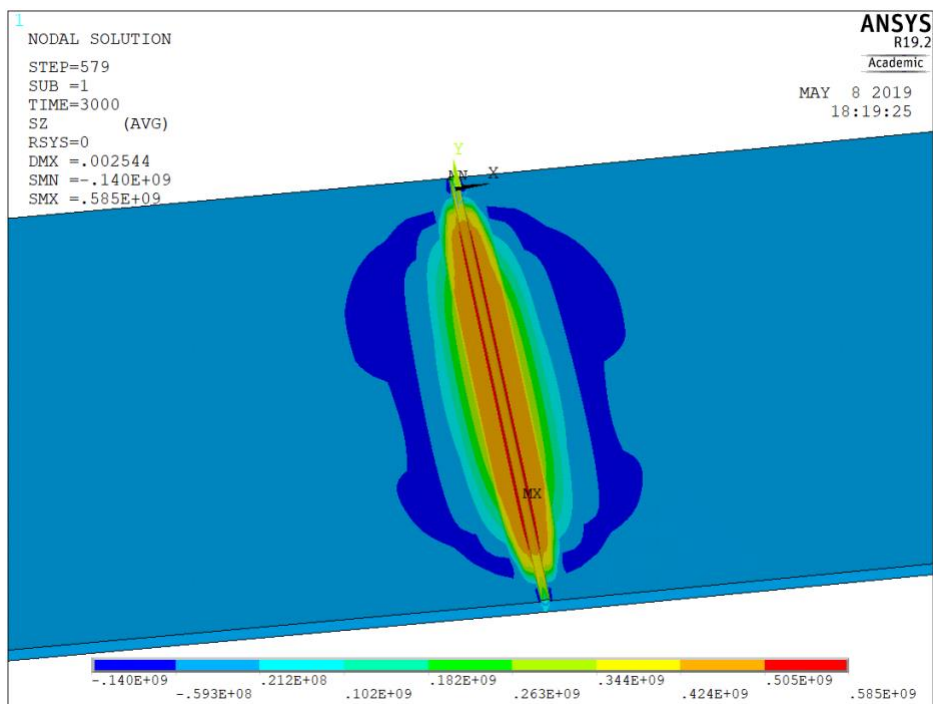


Obr. 9. 7 Posuvy po zváraní tupého zvaru.

Obrázky 9.8 a 9.9 reprezentují pozdĺžne zvyškové napätia. Rovnaké napätia získané pomocou SYSWELD-u zobrazuje [obr. 8.20](#).

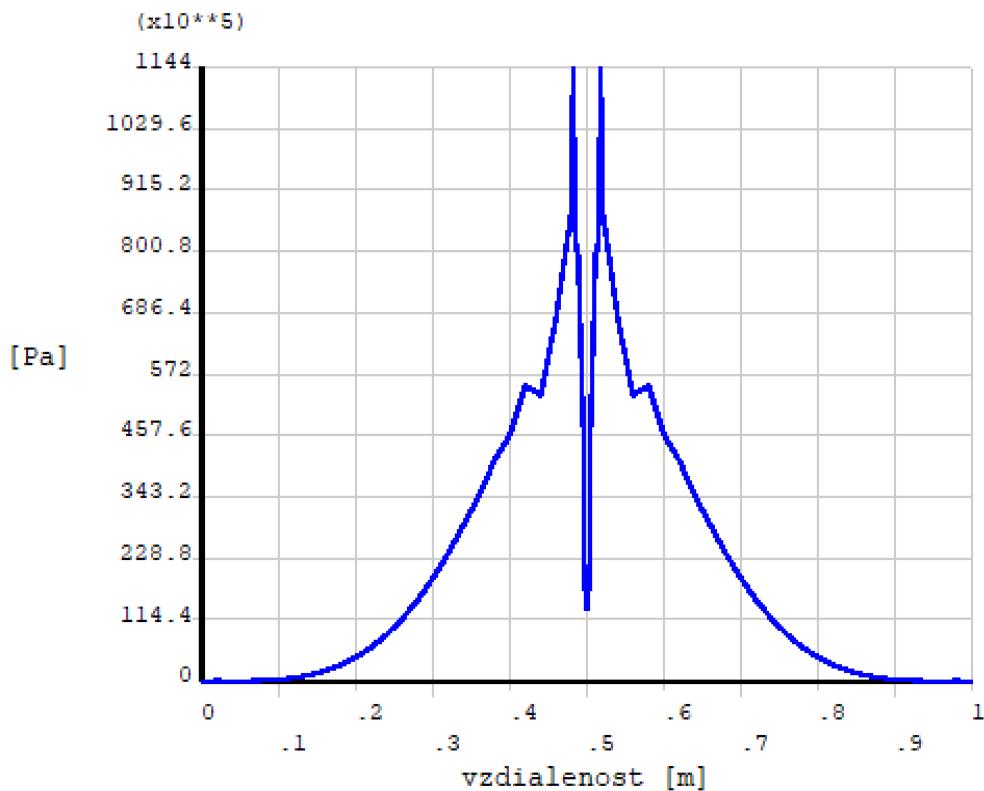


Obr. 9. 8 Priebeh pozdĺžnych zvyškových napätí po zváraní tupého zvaru.

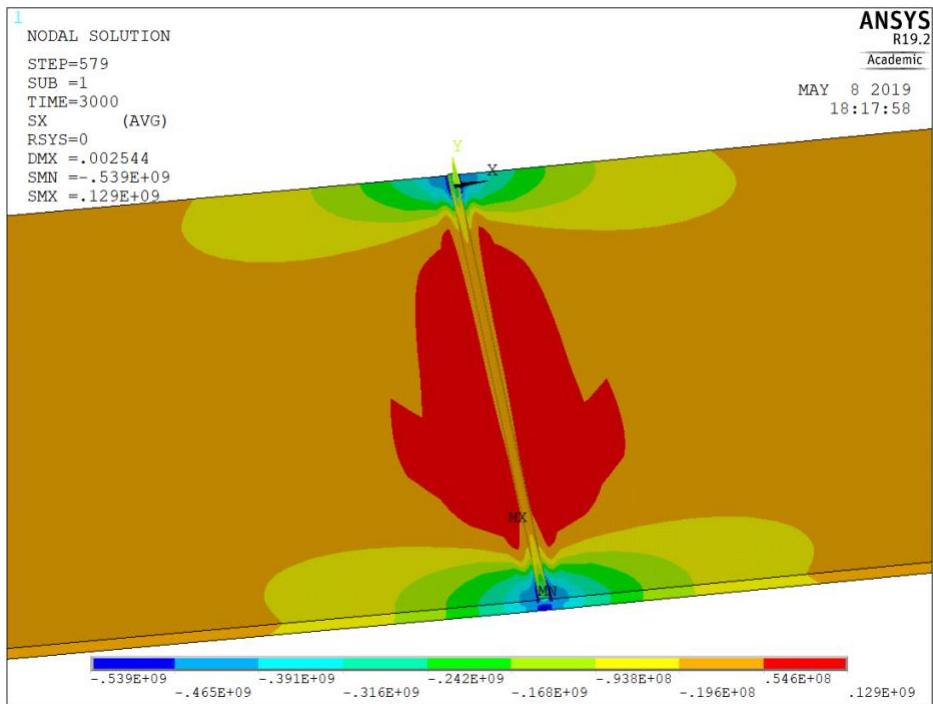


Obr. 9. 9 Pozdĺžne zvyškové napätie po zváraní tupého zvaru.

Obrázky 9.10 a 9.11 ukazujú priečne zvyškové napätia. Ich hodnoty získané pomocou SYSWELD-u zobrazuje [obr. 8.21](#).

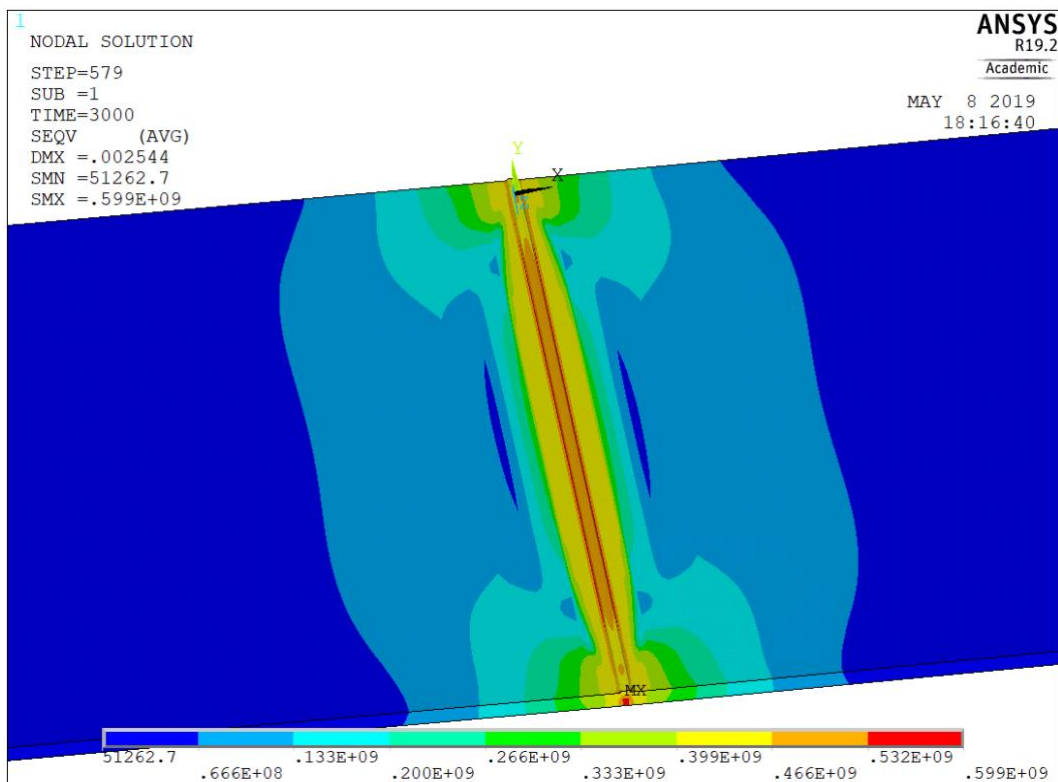


Obr. 9. 10 Priebeh priečných zvyškových napätí po zváraní tupého zvaru.



Obr. 9. 11 Priečne zvyškové napätie po zváraní tupého zvaru.

Redukované zvyškové napätia po procese zvárania tupého zvaru sú na obr. 9.12. Je možné ich porovnať s [obrázkom 8.22](#). Ich maximálna hodnota dosahovala takmer 600 MPa. Graf týchto napätí je prezentovaný až v nasledujúcej kapitole.



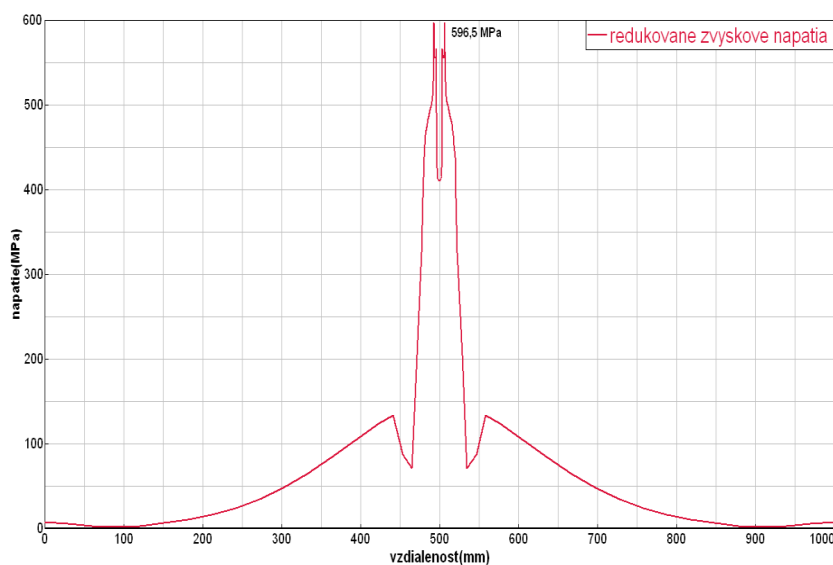
Obr. 9. 12 Redukované zvyškové napätia podľa podmienky HMH.

10 Porovnanie výsledkov zvarania tupého zvaru

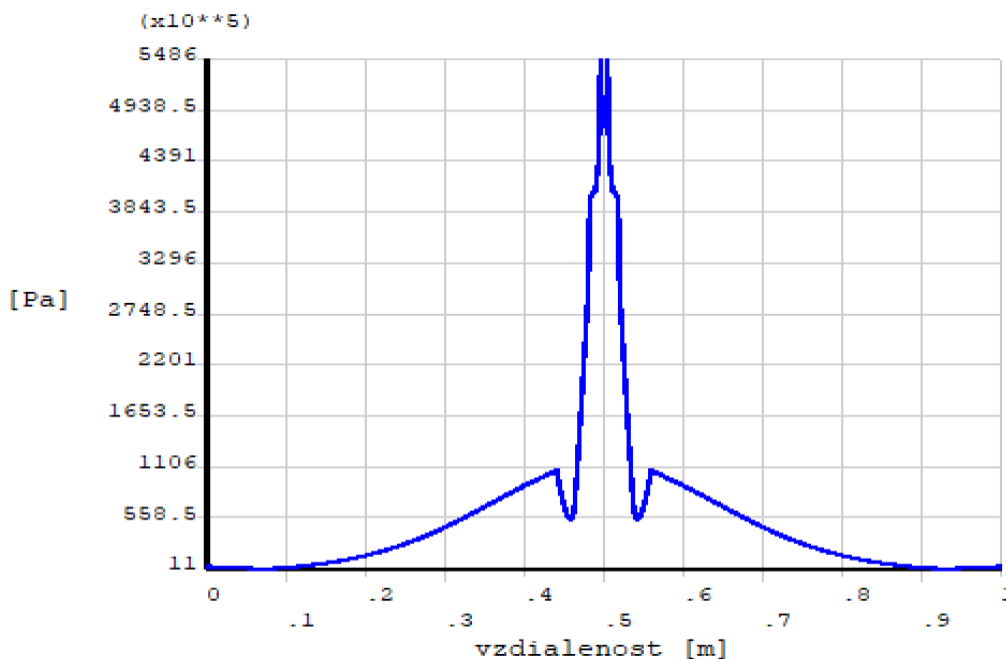
Pre možnosť rýchleho porovnania výpočtových modelovaní v SYSWELD-e a ANSYS-e sú v tejto kapitole prezentované ich najdôležitejšie výsledky. Konkrétne maximálne posuvy po zvaraní (tab. 10.1) a priebehy redukovaných zvyškových napätí (obr. 10.1 a 10.2).

Určené	Pomocou SYSWELD-u	Pomocou ANSYS-u
Maximálny posuv	2,0 mm	2,5 mm

Tab. 10. 1 Porovnanie maximálnych posuvov.



Obr. 10. 1 Redukované zvyškové napätia získané pomocou SYSWELD-u.



Obr. 10. 2 Redukované zvyškové napätia získané pomocou ANSYS-u.

Priebehy redukovaných zvyškových napätí tupého zvaru, získaných pomocou SYSWELD-u (obr. 10.1) a pomocou ANSYS-u (obr. 10.2), sú takmer identické. Minimálny rozdiel je v oblasti zvaru (stredy priebehov), kde dochádza k fázovým transformáciám materiálu, ktoré v ANSYS-e nie sú uvažované. Maximálna hodnota zvyškových napätí z obr. 10.2 sa líši napriek použitým zjednodušeniam iba o 8 % od hodnôt získaných SYSWELD-om (obr. 10.1).

Veľkosti maximálnych posuvov vzniknutých po zváraní tupého zvaru sú v tab. 10.1. Výsledky z jednotlivých výpočtových softvérov sa líšia o 0,5 mm. Tento rozdiel je spôsobený veľkým množstvom neznámych parametrov. Aby boli dosiahnuté rozumné tvary natavených oblastí a teplôt v nich, bolo nutné vykonať niekoľko desiatok výpočtov, kedy sa hľadali hodnoty vneseného tepla a rozmery tepelných zdrojov. Navyše boli zvárané dve rozdielne húsenice, takže bolo potrebné určiť vhodné hodnoty pre každú z nich. Rovnaké hodnoty týchto parametrov nebolo možné použiť v jednotlivých softvéroch, a to z dôvodu ich rozdielnosti a použitých zjednodušení pri výpočtoch v ANSYS-e.

Reálne zváranie riešenej geometrie tupého zvaru bolo vykonané na podložených doskách zvarenca. Zvarová medzera bola o 10 mm vyššie ako kraje dosiek. Po reálnom zváraní došlo k takému posuvu, že dosky boli takmer v rovine. Za predpokladu, že ide o maximálny posuv 10 mm, hodnoty dosiahnuté pomocou výpočtového modelovania sú výrazne nižšie. Dôvodov tejto nezhody môže byť viacero. Keďže maximálne posuvy z jednotlivých softvérov sú relatívne blízko seba, príčina nesúlady výsledkov modelovania a experimentu bude pravdepodobne na strane vstupných parametrov.

Kvôli tomu, že sa zváralo ručne, dostupné hodnoty zväracích parametrov nebolo možné použiť (pri ich použití nedošlo k roztaveniu materiálu). Aby bol dosiahnutý reálny tvar natavenej oblasti museli byť tieto parametre (spolu s rozmermi tepelných zdrojov) vhodne zvolené. Do ukončenia tejto práce neboli dostupné ani makrovýbrusy zvaru, takže natavené oblasti nemali byť s čím porovnané. Je preto otázne či odpovedajú vykonanému experimentu.

Okrem toho, ďalšou možnou príčinou rozdielu oproti experimentu bolo, že pri výpočtovom modelovaní boli zvárané dosky modelované v rovine. Zvarová medzera má pri podložených doskách iný tvar a väčší objem ako pri nepodložených doskách. Preto do nej vojde aj viac prídavného materiálu, pričom jeho zmrštenie pri chladnutí je hlavnou príčinou deformácií pri zváraní.

Je otázne, či a ako sa bude líšiť veľkosť posuvov po zváraní pri podložených a nepodložených zváraných doskách. Vplyv podloženia dosiek na výsledok deformácií (posuvov) by bolo vhodné preskúmať v budúcnosti. Aby však boli výpočty porovnateľné, bolo by nutné použitie rovnakého množstva vneseného tepla, rovnakého tepelného zdroja a hlavne vnesenie tohoto tepla do rovnakého objemu materiálu.

ZÁVER

Zváranie je z fyzikálneho hľadiska komplexný a zložitý proces. Na jeho popis je potrebné veľké množstvo parametrov a je sprevádzaný vznikom nežiadúcich zvyškových napätí a deformácií. Hlavným cieľom diplomovej práce bolo pomocou výpočtového modelovania tento proces nasimulovať a zistiť ich veľkosti a rozloženie. Konkrétne je v práci riešený kútový a tupý zvar dvoch dosiek. Simulácie zvárania oboch geometrií sú vykonané pomocou špecializovaného softvéru SYSWELD-u a pomocou ANSYS-u. Na overenie dosiahnutých výsledkov bola použitá odborná literatúra a experiment.

Kvôli pochopeniu problematiky, je prvou časťou tejto práce rešeršná štúdia. V nej je okrem iného rozoberaná podstata vzniku zvyškových napätí a deformácií po zváraní. Za ňou nasleduje kapitola popisujúca princíp a postup výpočtového modelovania procesu zvárania.

Kapitoly 5 a 6 sú venované geometrií kútového zvaru. Išlo o zváranie oceli S355 taviacou sa elektródou v ochrannom plyne metódou MAG. Výsledkami tepelnej analýzy boli teplotné polia a natavené oblasti vznikajúce počas zvárania. V SYSWELD-e sa k nim pridalo aj rozloženie štruktúr a tvrdosť materiálu po zváraní.

Hlavné výsledky, redukované zvyškové napätia a deformácie (posuvy), sú v kapitole 7 porovnané medzi jednotlivými softvérmi a tiež s experimentálnymi výsledkami. Dosiahnutá bola dobrá zhoda. Rozdiel v priebehoch zvyškových napätí sa vyskytol vo zvare a jeho okolí, kde dochádza k fázovým transformáciám materiálu, ktoré v ANSYS-e neboli uvažované.

Kapitoly 8 a 9 sa zaoberajú modelovaním procesu zvárania tupého zvaru. Dôvodom riešenia tejto geometrie a procesu jej zvárania je projekt firmy ŽĎAS, a.s. a Ústavu mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky VUT. Jeho cieľom je zistiť ako veľmi a či vôbec je možné znížiť zvyškové napätia pomocou vibrácií. Skúmané to je práve na danom tupom zvare.

Najdôležitejšie výsledky a ich porovnanie je v kapitole 10. Porovnávané sú výsledné redukované zvyškové napätia a maximálne posuvy z výpočtov v jednotlivých softvéroch. Vzhľadom na použité zjednodušenia pri výpočtovom modelovaní v ANSYS-e a množstve neznámych parametrov bola dosiahnutá veľmi dobrá zhoda výsledkov. Rozdiel v maximálnej hodnote redukovaných zvyškových napätí v ANSYS-e oproti výpočtom zo SYSWELD-u tvoril 8 %. Rozloženie zvyškových napätí u tupého zvaru bude ďalej slúžiť pri overovaní znižovania zvyškových napätí pomocou vibrácií.

Maximálne posuvy z jednotlivých softvérov sa líšili o 0,5 mm. Avšak pri ich porovnaní s reálne vykonaným zváraním nebola dosiahnutá zhoda. Možné príčiny sú rozobraté v kapitole 10.

V konečnom dôsledku sa výsledky procesu zvárania z jednotlivých softvérov podobajú. Je možné konštatovať, že čím bude geometria zvarenca a jej proces zvárania zložitejšie a čím väčšiu úlohu u daného materiálu budú zohrávať fázové transformácie, tým sa budú výsledky zo SYSWELD-u a ANSYS-u viac líšiť. Pritom SYSWELD dáva presnejšie výsledky a tvorba výpočtových modelov aj samotné výpočtové časy sú neporovnateľne kratšie ako v prípade ANSYS-u.

ZOZNAM POUŽITÉJ LITERATURY

- [1] MUSIL, Miloslav a Jaromír MORAVEC. *Výroba a aplikované inženýrství ve svařování: výukové materiály pro kurzy Mezinárodní svářečský inženýr IWE, Mezinárodní svářečský technolog IWT*. Česká Třebová: DOM-ZO 13, 2017. ISBN 978-80-906720-0-0.
- [2] KUBÍČEK, Jaroslav. *Technologie svařování [online]*. Brno, 2007 [cit. 7.4.2019]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/technologie_svarovani_5te_etv_etv-k_kubicek.pdf
- [3] WELDING. *SteelConstruction.info [online]*. 2011 [cit. 7.4.2019]. Dostupné z: <https://www.steelconstruction.info/Welding>
- [4] JARÝ, Milan. *Výpočtové modelování procesu svařování a tepelného zpracování ocelí s využitím elasto-viskoplastického modelu materiálu*. Brno, 2013.
- [5] PILIPENKO, A. *Computer Simulation of Residual Stress and Distortions of Thick Plates in Multi-electrode Submerged arc Welding - Their mitigation Techniques*. Dissertation Thesis, Department of Machine Design and Materials Technology Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 2001.
- [6] VOSS, O., DECKER, I., WOHLFAHRT, H.. *Consideration of microstructural transformations in the calculation of residual stresses and distortion of larger weldments, Mathematical modelling of weld phenomena 4*. Graz University of Technology, 1998. ISBN 1-86125-060-6.
- [7] MESSLER, Robert. *Principles of Welding: Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy*. New York, USA: John Wiley & Sons, 1999, 662 s. ISBN 04-712-5376-6.
- [8] VANĚK, Mojmír. *Predikce deformací svarových spojů pomocí počítačová simulace*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012, 98 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc.
- [9] HUDEC, Zdeněk. *Deformace a napětí při svařování*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 1998, 76 s. ISBN 80-7083-313-0.
- [10] KUČERA, Jan. *Teorie svařování*. Ostrava: VŠB Ostrava Technická univerzita, 1994, 408 s. 1181.
- [11] HUABAO. *Vrsuperfinishing.com [online]*. 2017 [cit. 10.4.2019]. Dostupné z: <http://www.vrsuperfinishing.com/content/?180.html>
- [12] NEUMANN, Heinz. *Teorie svařování a pájení. Část 1, Tavné svařování*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2014. ISBN 978-80-7494-171-9.
- [13] DONG, P. *Residual stresses and distortions in welded structures: a perspective for engineering applications. Science and Technology of Welding and Joining [online]*. Taylor & Francis, 2005. [cit. 2019-04-12]. DOI: 10.1179/174329305X29465. ISSN 1362-1718.
- [14] ESIGROUP. *SYSWELD 2013: Reference Manual*. 2013, 334 s. GL/SYWE/12/03/00/A.
- [15] TEIXEIRA, P. R. de F., DE ARAÚJO, D. B., & DA CUNHA, L. A. B. *Study of the gaussian distribution heat source model applied to numerical thermal simulations of TIG welding processes*. Ciência, 2014. Dostupné: <https://doi:10.14393/19834071.2014.26140>
- [16] MORAVEC, Jaromír. *Vliv procesních parametrů na geometrii svarové lázně při svařování v ochranných atmosférách*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2011, 101 s. ISBN 978- 80-7372-805-2.

- [17] DIVIŠ, V.. *Numerické analýzy MKP v oblasti technologie svařování*. Disertační práce, Vysoké učení technické v Brně, 2007, 93 s.
- [18] GOLDAK, John A. a Mehdi AKHLAGHI. *Computational Welding Mechanics*. 1. New York, USA: Springer US, 2005. ISBN 978-0-387-23287-4.
- [19] BRADÁČ, Josef. *Calibration of heat source model in numerical simulations of fusion welding*[online]. 2013. [cit. 2019-04-15]. ISSN 1313-0226. Dostupné z: http://mech-ing.com/journal/Archive/2013/11/76_Bradac.pdf
- [20] PAVELIC, V., TANBAKUCHI, R., UYEHARA, A. and O. MYERS. *Experimental and computed temperature histories in gas tungsten arc welding of thin plates*. Welding Journal Research Supplement, Vol. 48. pp 295s-305s, 1969.
- [21] CLAIN, Fernanda mazuco, Paulo roberto de freitas TEIXEIRA a Douglas bezerra de ARAÚJO. *Two Heat Source Models to Simulate Welding Processes with Magnetic Deflection*. *Soldagem & Inspeção* [online]. Associação Brasileira de Soldagem, 2017. [cit. 2019-04-15]. DOI: 10.1590/0104-9224/si2201.10. ISSN 1980-6973. Dostupné z: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S010492242017000100099&lng=en&tng=en
- [22] FLINT, Thomas. *Analytical solutions of the transient thermal field induced in finite bodies with insulating and convective boundary conditions subjected to a welding heat source* [online]. 2013. [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <http://www.lib.ncsu.edu/resolver/1840.20/32826>
- [23] JOSHI, Suraj, Jörg HILDEBRAND, Abdulkareem s. ALORAIER a Timon RABCZUK. *Characterization of material properties and heat source parameters in welding simulation of two overlapping beads on a substrate plate*. *Computational Materials Science* [online]. Elsevier B.V, 2012. [cit. 2019-04-15]. DOI: 10.1016/j.commatsci.2012.11.029. ISSN 0
- [24] GOLDAK, John, Aditya CHAKRAVARTI a Malcolm BIBBY. *A new finite element model for welding heat sources*. *Metallurgical Transactions B* [online]. New York: Springer-Verlag, 1984. [cit. 2019-04-15]. DOI: 10.1007/BF02667333. ISSN 0360-2141.
- [25] HONGYUAN, Fang, Meng QINGGUO, Xu WENLI a Ji SHUDE. *New general double ellipsoid heat source model*. *Science and Technology of Welding and Joining* [online]. Taylor & Francis, 2005. [cit. 2019-04-15]. DOI: 10.1179/174329305X40705. ISSN 1362-1718.
- [26] HASHEMZADEH, M, Chen B-Q, GUEDES SOARES, C. *Comparison between different heat sources types in thin-plate welding simulation*. In: Guedes Soares C, Lopez Pena F, editors. *Devel-opments in Maritime Transportation and Exploitation of Sea Resources*. UK: Francis & Taylor Group London, 2013. DOI: 10.13140/2.1.3250.1123
- [27] VANĚK, Mojmír. *Vývoj modelů chování Al slitin pro aplikace v numerických simulacích svařování a tepelného zpracování*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav, 2017. 144 s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc.
- [28] KOLEKTIV AUTORŮ. *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 2., upr. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001, 292 s. ISBN 80-85771-85-3.

- [29] JUNEK, L.. *Výpočet zbytkových napětí při svařování a tepelném zpracování*. Disertační práce, Vojenská akademie v Brně, 1997.
- [30] SLOVÁČEK, M.. *Numerické simulace svařování výpočet a hodnocení distorzí a zbytkových napětí*. Disertační práce, Univerzita Obrany, 2005.
- [31] GOLDAK, J., M. BIBBY, J. MOORE, R. HOUSE a B. PATEL. *Computer modeling of heat flow in welds*. *Metallurgical Transactions B* [online]. New York: Springer-Verlag, 1986. [cit. 2019-04-17]. DOI: 10.1007/BF02670226. ISSN 0360-2141.
- [32] SGS MSI. *msitesting.com* [online]. 2014. [cit. 17.4.2019]. Dostupné z: <http://www.msitesting.com/macro-vickers-testing.html>
- [33] JANÍČEK, Přemysl. *Systémová metodologie: brána do řešení problémů*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2014. ISBN 978-80-7204-887-8.
- [34] BHATTI, Ayjwat a., Zuheir BARSOUM, Hidekazu MURAKAWA a Imad BARSOUM. *Influence of thermo-mechanical material properties of different steel grades on welding residual stresses and angular distortion*. *Materials and Design* [online]. Elsevier, 2015. [cit. 2019-04-21]. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.10.019. ISSN 0261-3069.
- [35] CAPRICCIOLI, Andrea a Paolo FROSI. *Multipurpose ANSYS FE procedure for welding processes simulation*. *Fusion Engineering and Design* [online]. Elsevier B.V, 2009. [cit. 2019-05-03]. ISSN 0920-3796.
- [36] FUGLSANG, Lars a Kgs. LYNGBY. *Residual Stresses and Deformations in Steel Structures*. Denmark : Technical University of Denmark (DTU), 2001. 226 p.
- [37] ANCA, Andrés, Alberto CARDONA, José RISSO a Víctor d. FACHINOTTI. *Finite element modeling of welding processes*. *Applied Mathematical Modelling* [online]. Elsevier, 2011. [cit. 2019-05-03]. DOI: 10.1016/j.apm.2010.07.026. ISSN 0307-904X.
- [38] DENG, Dean & MURAKAWA, Hidekazu. *Numerical Simulation of Temperature Field and Residual Stress in Multi-Pass Welds in Stainless Steel Pipe and Comparison with Experimental Measurements*. *Computational Materials Science*, 37. 269-277, 2006.
- [39] HWANG, Se-Yun, LEE, Janghyun, KIM, Sung-Chan & VISWANATHAN, K. K. *Numerical Simulation of Welding Residual Stress Distribution on T-joint Fillet Structure*. *International Journal of Ocean System Engineering* 2. 2012.
- [40] QURESHI, Muhammad Ejaz. *Analysis of residual stresses and distortions in circumferentially welded thin-walled cylinders*. PhD thesis, College of Electrical and Mechanical Engineering National University of Science and Technology, 2008.
- [41] DENG, Dean. *FEM prediction of welding residual stress and distortion in carbon steel considering phase transformation effects*. *Materials & Design*, 30. 359-366, 2009.

ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK

Symbol	Popis	Jednotka
Δl	Zmena dĺžky	[m]
l_0	Počiatočná dĺžka	[m]
α	Súčiniteľ teplotnej rozťažnosti	[K ⁻¹]
ΔT	Zmena teploty	[K]
σ	Napätie	[MPa]
ε	Deformácia (pretvorenie)	[-]
E	Youngov modul	[MPa]
λ	Koeficient tepelnej vodivosti	[W · m ⁻¹ · K ⁻¹]
c	Merná tepelná kapacita	[J · kg ⁻¹ · K ⁻¹]
ρ	Hustota	[kg · m ⁻³]
β	Koeficient prestupu tepla	[W · m ⁻² · K ⁻¹]
I	Zvárací prúd	[A]
U	Zváracie napätie	[V]
v_s	Rýchlosť zvárania	[m · s ⁻¹]
Q_v	Merné vnesené teplo	[J · m ⁻¹]
η_0	Efektivita (účinnosť) prenosu elektrického oblúku	[-]
$q(r)$	Plošná hustota tepelného toku	[W · m ⁻²]
R	Radiálna vzdialenosť od stredu zdroja	[m]
q_m	Maximálna plošná hustota tepelného zdroja	[W · m ⁻²]
$q(x,y,z,t)$	Objemová hustota tepelného toku	[W · m ⁻³]
Q	Celkový výkon	[W]
a,b,c	Poloosi elipsoidu	[m]
k,l,m	Koeficienty na modifikáciu tvaru zdroja tepla	[-]
f_1, f_2	Parametre určujúce rozloženie toku energie	[-]
ε_e	Elastické pretvorenie	[-]
ε_{th}	Teplotné pretvorenie	[-]
ε_p	Plastické pretvorenie	[-]
ε_{tp}	Transformačná plasticita	[-]
μ	Poissonovo číslo	[-]
Re	Medza klzu	[MPa]
Et	Modul spevnenia	[Pa]
KV	Nárazová práca	[J]
TOO	Tepelne ovplyvnená oblasť	

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 1. 1 Vzťah medzi deformáciou a zvyškovými napätiami pri zváraní [1]	12
Obr. 2. 1 Kútový zvar vytvorený tavným zváraním.[3].....	13
Obr. 2. 2 Princíp zvárania taviacou sa elektródou v inertnom alebo aktívnom plyne- MIG/MAG. [2].....	15
Obr. 2. 3 Princíp vzniku napätia pri nestacionárnom teplotnom poli a)ohrev b)chladnutie. [1].....	16
Obr. 2. 4 Priebeh vývoja zvyškovej napätosti v objemovom elemente. [5]	18
Obr. 2. 5 Všeobecný priebeh pozdĺžnej zvyškovej napätosti. [6].....	20
Obr. 2. 6 Priebeh pozdĺžnej zvyškovej napätosti pri simulácii zvárania pod tavidlom. [5]	20
Obr. 2. 7 Všeobecný priebeh priečnej zvyškovej napätosti. [6]	21
Obr. 2. 8 Priebeh priečnej zvyškovej napätosti pri simulácii zvárania pod tavidlom. [5]	21
Obr. 2. 9 Zariadenie na odstraňovanie napätí pomocou vibrácií[11].....	24
Obr. 2. 10 Deformácie spôsobené zváraním [12]	26
Obr. 3. 1 Náčrt rozloženia tepla s Gaussovým rozdelením (vľavo)[21] a výsledok použitia modelu kruhového disku v ANSYS-e (vpravo).....	30
Obr. 3. 2 Dvojelipsoidný model zdroja tepla. [23]	31
Obr. 3. 3 Spôsob zisťovania parametrov natavenej oblasti a, b, c1, c2. [16]	32
Obr. 3. 4 Vplyv teplotných účinkov zvárania na štruktúru zvarového spoja. [28]	33
Obr. 3. 5 Príklad merania tvrdosti na makrovýbruse zvaru. [32].....	36
Obr. 3. 6 Porovnanie natavenej a teplotne ovplyvnenej oblasti: vľavo- numerická simulácia vpravo- makrovýbrus. [15]	36
Obr. 5. 1 Riešený kútový zvar s vyobrazenými základnými rozmermi, smerom zvárania a pozíciou experimentálneho merania zvyškových napätí a deformácií.....	39
Obr. 5. 2 Vytvorená konečno-prvková sieť (hore) a detail na jej zahustenie v okolí zvaru (dole).	40
Obr. 5. 3 Vybrané elementy, do ktorých teplo prúdi priamo z tepelného zdroja.....	41
Obr. 5. 4 Trajektória- červená čiara v strede prídavného materiálu, referencia- čiara na okraji prídavného materiálu.....	42
Obr. 5. 5 Tepelný zdroj.	44
Obr. 5. 6 Objemová hustota tepelného toku použitého zdroja (vpravo pohľad zhora).	44
Obr. 5. 7 Prejazd tepelného zdroja v rôznych časoch.	46
Obr. 5. 8 Tvar natavenej oblasti počas zvárania.	47
Obr. 5. 9 Priebeh teplôt v čase (bod A grafy vľavo, bod B grafy vpravo). [34].....	48
Obr. 5. 10 Priebeh teploty v mieste A.....	48
Obr. 5. 11 Priebeh teploty v mieste B.	49
Obr. 5. 12 Obsah feriticko-perlitickej štruktúry po zváraní.	49
Obr. 5. 13 Obsah martenzitu po zváraní	50
Obr. 5. 14 Obsah bainitu po zváraní.	50
Obr. 5. 15 Tvrdosť materiálu po zváraní.	51
Obr. 5. 16 Posuvy po zváraní kútového zvaru.	51
Obr. 5. 17 Experimentálne zmeraná hodnota maximálneho posuvu po zváraní. [34]	52
Obr. 5. 18 Priebeh pozdĺžnych zvyškových napätí po zváraní kútového zvaru.	52
Obr. 5. 19 Priebeh priečných zvyškových napätí po zváraní kútového zvaru.	53

Obr. 5. 20	Priebeh priečných zvyškových napätí určených experimentálne (čierne body). [34]	53
Obr. 5. 21	Redukované zvyškové napätia podľa HMH vykreslené v grafe.	54
Obr. 5. 22	Redukované zvyškové napätia podľa HMH vykreslené na celej geometrii.	54
Obr. 5. 23	Redukované zvyškové napätia podľa HMH vykreslené v rezoch geometrie.	55
Obr. 5. 24	Rozloženie redukovaných zvyškových napätí - Mean.	55
Obr. 5. 25	Detail priebehu redukovaného zvyškového napätia vo zvaru a jeho okolí.	56
Obr. 5. 26	Medza klzu materiálu po zváraní.	57
Obr. 6. 1	Vytvorená geometria a sieť: celý model (vľavo) a detail na zvar (vpravo).	59
Obr. 6. 2	Merná tepelná kapacita (vľavo) a medza klzu (vpravo) v závislosti na teplote. [34]	60
Obr. 6. 3	Objemová hustota tepelného toku elipsoidného zdroja (vpravo pohľad zhora).	61
Obr. 6. 4	Prejazd tepelného zdroja v rôznych časoch pri tvorbe prvej húsenice.	61
Obr. 6. 5	Tvar zdrojom generovanej natavenej oblasti.	62
Obr. 6. 6	Plochy s rovnakou hodnotou teploty pri prejazde tepelného zdroja.	62
Obr. 6. 7	Priebeh teploty počas zvárania v mieste A (vľavo) a mieste B (vpravo).	63
Obr. 6. 8	Posuvy po zváraní kútového zvaru.	64
Obr. 6. 9	Priebeh pozdĺžnych zvyškových napätí po zváraní kútového zvaru.	64
Obr. 6. 10	Pozdĺžne zvyškové napätie po zváraní kútového zvaru.	65
Obr. 6. 11	Priebeh priečných zvyškových napätí po zváraní kútového zvaru.	65
Obr. 6. 12	Priečne zvyškové napätie po zváraní kútového zvaru.	66
Obr. 6. 13	Redukované zvyškové napätia podľa podmienky HMH.	66
Obr. 7. 1	Redukované zvyškové napätia získané pomocou SYSWELD-u.	68
Obr. 7. 2	Redukované zvyškové napätia získané pomocou ANSYS-u.	68
Obr. 8. 1	Reálne zváranie tupého zvaru.	70
Obr. 8. 2	Geometria tupého zvaru.	71
Obr. 8. 3	Geometria a sieť kútového zvaru.	71
Obr. 8. 4	Detaily na zahustenie siete v okolí zvaru.	72
Obr. 8. 5	Elementy, do ktorých teplo prúdilo priamo (vľavo prvá húsenica a vpravo druhá).	72
Obr. 8. 6	Trajektória a referencia pre jednotlivé húsenice.	73
Obr. 8. 7	Použitie tepelné zdroje (vľavo pre prvú a vpravo pre druhú húsenicu).	74
Obr. 8. 8	Tepelný zdroj v rôznych časoch pri tvorbe prvej húsenice.	75
Obr. 8. 9	Tvar natavenej oblasti počas zvárania prvej húsenice.	75
Obr. 8. 10	Tvar natavenej oblasti počas zvárania druhej húsenice.	75
Obr. 8. 11	Tepelný zdroj v rôznych časoch pri tvorbe druhej húsenice.	76
Obr. 8. 12	Miesta merania teploty pomocou termočlánkov.	76
Obr. 8. 13	Priebehy teplôt merané pomocou termočlánkov.	77
Obr. 8. 14	Priebehy teplôt zo SYSWELD-u v miestach nalepenia termočlánkov t1-t3.	78
Obr. 8. 15	Priebehy teplôt zo SYSWELD-u v miestach nalepenia termočlánkov t7 a t8.	78
Obr. 8. 16	Vľavo obsah feriticko-perlitickej štruktúry a vpravo obsah martenzitu.	79
Obr. 8. 17	Vľavo obsah bainitu a vpravo tvrdosť materiálu v jednotkách [HV].	79
Obr. 8. 18	Posuvy po zváraní tupého zvaru.	79
Obr. 8. 19	Cesta, na ktorej sú vykresľované grafy.	80
Obr. 8. 20	Priebeh pozdĺžnych zvyškových napätí po zváraní tupého zvaru.	81
Obr. 8. 21	Priebeh priečných zvyškových napätí po zváraní tupého zvaru.	81
Obr. 8. 22	Redukované zvyškové napätia podľa HMH.	82
Obr. 8. 23	Redukované zvyškové napätia podľa HMH vykreslené v rezoch.	82

Obr. 8. 24 Redukované zvyškové napätia podľa HMM vykreslené v grafe.	83
Obr. 8. 25 Detail priebehu redukovaného zvyškového napätia vo zvaru a jeho okolí.	83
Obr. 9. 1 Vytvorená geometria a sieť: celý model(vľavo) a detail na zvar(vpravo).....	84
Obr. 9. 2 Tepelný zdroj pri tvorbe prvej zvarovej húsenice.	85
Obr. 9. 3 Tvar natavenej oblasti prvej húsenice.....	86
Obr. 9. 4 Tepelný zdroj pri tvorbe druhej zvarovej húsenice.	86
Obr. 9. 5 Tvar natavenej oblasti druhej húsenice.....	86
Obr. 9. 6 Priebeh teplôt z ANSYS-u v miestach nalepenia termočlánkov t1-t3.....	87
Obr. 9. 7 Posuvy po zváraní tupého zvaru.	88
Obr. 9. 8 Priebeh pozdĺžnych zvyškových napätí po zváraní tupého zvaru.	88
Obr. 9. 9 Pozdĺžne zvyškové napätie po zváraní tupého zvaru.	89
Obr. 9. 10 Priebeh priečných zvyškových napätí po zváraní tupého zvaru.	89
Obr. 9. 11 Priečne zvyškové napätie po zváraní tupého zvaru.	90
Obr. 9. 12 Redukované zvyškové napätia podľa podmienky HMM.	90
Obr. 10. 1 Redukované zvyškové napätia získané pomocou SYSWELD-u.....	91
Obr. 10. 2 Redukované zvyškové napätia získané pomocou ANSYS-u.	91

ZOZNAM TABULIEK

Tab. 3. 1 Potřebné termofyzikálne vlastnosti materiálu.	28
Tab. 3. 2 Potřebné mechanické vlastnosti materiálu.	34
Tab. 5. 1 Porovnanie chemického zloženia oceli S355J2G3.....	42
Tab. 5. 2 Použité parametre zvaracieho procesu.	43
Tab. 7. 1 Porovnanie maximálnych posuvov.....	68
Tab. 8. 1 Použité parametre zvaracieho procesu.....	73
Tab. 10. 1 Porovnanie maximálnych posuvov.....	91