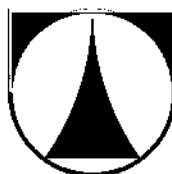


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie



DISERTAČNÍ PRÁCE

**STANOVENÍ SVAŘOVACÍHO POSTUPU ALUMINIDU ŽELEZA
ZA PODPORY SIMULAČNÍCH VÝPOČTŮ V PROGRAMU
SYSWELD**

Doktorand: Ing. Josef Bradáč

Školitel: Doc. Ing. Heinz Neumann, CSc.

Vedoucí katedry: Prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld

Liberec, 2009



Poděkování:

Rád bych poděkoval svému školiteli Doc. Ing. Heinzí Neumannovi, CSc. za cenné rady, odborné diskuze a vedení v průběhu celého doktorského studia.

Děkuji také Ing. Jaromíru Moravcovi, Ph.D. za mimořádnou ochotu, cenné rady a připomínky v průběhu vytváření práce a Ing. Josefu Tejcovi z firmy MECAS ESI, za konzultace při řešení dílčích úkolů v programu SYSWELD.



ANOTACE DISERTAČNÍ PRÁCE

Předmětem této disertační práce je za podpory simulačních výpočtů stanovit vhodný svařovací postup pro aluminid železa tak, aby bylo dosaženo svarů bez výskytu trhlin. Jde o obtížně svařitelný materiál vzhledem k mechanickým a tepelně-fyzikálním vlastnostem. Z těchto důvodů je nutný předehřev před svařováním a také následný dohřev. V práci jsou uvedeny návrhy svařovacího postupu v simulačním programu SYSWELD. Tyto návrhy jsou následně ověřeny při experimentálních zkouškách, což je velice důležitý předpoklad pro získání relevantních výsledků ze simulací. Výsledná data jsou podrobena analýze kritických míst pomocí vyhodnocovacího programu MOVYPRO 07, která umožňuje získat širší přehled o výskytu potenciálních kritických míst v průběhu svařování a chladnutí. Díky tomu lze stanovit a optimalizovat svařovací postup a dosáhnout svarů bez výskytu trhlin.

Práce je rozdělena do dvou částí, teoretické a experimentální. Teoretická část se věnuje především aluminidu železa a jeho mechanickým a tepelně-fyzikálním vlastnostem ovlivňujícím výslednou svařitelnost. Dále se zabývá teplotním a deformačním účinkem svařovacího procesu, jakož i různými způsoby snižování vnitřních pnutí a deformací po svařování. Je zde také podrobně vysvětlen a popsán simulační program SYSWELD a program MOVYPRO 07, zabývající se srovnávací analýzou.

Experimentální část se věnuje získání a zadávání materiálových vstupních dat aluminidu železa do simulačního programu SYSWELD. Dále jsou zde navrženy vhodné svařovací postupy aluminidu železa na základě simulačních výpočtů. To se týká především volby vhodné teploty předehřevu a následného dohřevu. Je zde podrobně popsán průběh experimentálních zkoušek a jejich vyhodnocení včetně analýzy svařovacích parametrů. Na závěr je stanovena metodika přípravy a vyhodnocení simulačního výpočtu s využitím podkladů z experimentálního měření. Zvláštní pozornost je věnována analýze potenciálních kritických míst v průběhu svařovacího procesu a chladnutí pomocí programu MOVYPRO 07.

Na základě simulací a experimentů se podařilo stanovit takový svařovací postup aluminidu železa, který zajistil svary bez výskytu trhlin. Velmi se osvědčilo i použití programu MOVYPRO 07 jako doplňkového nástroje k ověření svařovacího postupu.

Klíčová slova: aluminid železa, svařovací postup, předehřev, SYSWELD, MOVYPRO 07

ANNOTATION OF DISSERTATION THESIS

The aim of this thesis is to set up an appropriate welding procedure for an iron aluminide by means of simulation computations, which would prevent creation of cracks in welds. Iron aluminides are considered difficult to weld materials owing to their mechanical and thermal-physical characteristics. Because of these, a preheating before welding and a subsequent post heat treatment are required. The present paper introduces suggestions for a welding procedure in the SYSWELD simulation programme. These suggestions are consequently proved by experimental tests, which is a very important presumption for the acquisition of relevant results from the simulations. The resulting data are then used for the analysis of critical places in the MOVYPRO 07 evaluation programme, which makes it possible to acquire a broader outline about the possible occurrences of critical places during the welding and cooling processes. Thanks to this, we are able to determine and optimise the welding procedure as well as prevent creation of cracks in welds.

The thesis is divided in two a theoretical and an experimental section. The theoretical section is mostly dedicated to iron aluminides and their mechanical and thermal-physical characteristics which affect weldability. Further it deals with the thermal and deformation effect of the welding process, as well as with different methods of decreasing inner stresses and deformations caused by welding. It also provides a detailed description of the SYSWELD programme and the MOVYPRO 07 programme dealing with a comparative analysis.

The experimental section is dedicated to the acquisition and introduction of the iron aluminide material input data into the SYSWELD programme. It also introduces suitable welding procedures for the iron aluminide on the basis of simulations computations; which is mainly linked to the choice of the correct temperature for the preheating and post heating phases. The experimental section further provides a detailed description of the course of experimental tests together with their evaluation, incl. an analysis of welding parameters. In conclusion, we set up a special methodology for the preparation and evaluation of simulation computation while using data from experimental measurements. A particular attention is paid to the analysis of the potential occurrences of critical places in the course of welding and the cooling processes, with the aid of MOVYPRO 07 programme.

Based on the simulations and experiments we managed to set up such a welding procedure for the iron aluminide which prevented any cracks in welds. Application of the MOVYPRO 07 programme, as an additional instrument for the verification of the welding procedure, proved to be very useful.

Key words: iron aluminide, welding procedure, preheating, SYSWELD, MOVYPRO 07

**OBSAH**

Seznam symbolů	6
Seznam zkratk	8
1. Úvod	9
2. Vlastnosti slitin na bázi Fe₃Al	11
2.1. Struktura fází aluminidu železa v okolí složení Fe ₃ Al	11
2.2. Mechanické vlastnosti slitin na bázi Fe ₃ Al	12
2.3. Výhody slitin na bázi Fe ₃ Al	15
2.4. Svařitelnost slitin na bázi Fe ₃ Al	16
2.5. Výroba a zpracování slitin na bázi Fe ₃ Al	18
3. Teplotní procesy při svařování	20
3.1. Sdílení tepla vedením	20
3.2. Sdílení tepla prouděním	21
3.2.1. Sdílení tepla prouděním v neomezeném prostoru	22
3.3. Sdílení tepla sáláním	23
3.4. Teplotní pole	25
4. Pnutí a deformace při svařování	27
4.1. Vztah mezi vnitřním pnutím a deformací	27
4.2. Činitelé ovlivňující vnitřní pnutí a deformace	29
4.3. Rozdělení a velikost vnitřních pnutí a deformací	31
4.4. Možnosti snižování vnitřních pnutí a deformací	34
4.5. Jednotlivé způsoby snižování vnitřních pnutí a deformací	35
4.6. Metody experimentálního zjišťování zbytkových napětí	39
4.7. Magnetoelastická metoda	40
5. Předehřev při svařování	43
5.1. Stanovení teploty předehřevu	43
5.2. Měření teploty předehřevu	45
5.3. Zařízení používaná pro předehřev	46
6. Simulace v programu SYSWELD	47
6.1. Materiálová vstupní data	48
6.2. Definice a popis tvaru tepelného zdroje	50
6.3. Vytvoření prostorového modelu	53
6.4. Vlastní výpočet v programu SYSWELD	56
6.5. Nedostatky výstupních dat	61



7.	Program MOVYPRO 07	62
7.1.	Výstupy z programu MOVYPRO 07	64
8.	Shrnutí teoretické části a stanovení cílů disertační práce	68
9.	Realizace cílů disertační práce	71
9.1.	Příprava vzorků pro experimenty	71
9.2.	Mechanické zkoušky	73
9.2.1.	Tahové zkoušky za různých teplot	73
9.3.	Získání a vkládání vstupních dat do simulačních výpočtů	73
9.3.1.	Vstupní data pro teplotně-metalurgickou analýzu	74
9.3.2.	Vstupní data pro mechanickou analýzu	78
9.4.	Simulační výpočty pro návrh experimentálních prací	81
9.4.1.	Simulační model	82
9.4.2.	Vliv stehování	82
9.4.3.	Simulace různého způsobu upnutí	83
9.4.4.	Simulace přehřevů	85
9.5.	Reálné experimenty	94
9.5.1.	Svařovací pracoviště	94
9.5.2.	Svařování zkušebních vzorků	98
9.5.3.	Svařování vzorků	100
9.6.	Metodika přípravy a vyhodnocení simulačního výpočtu	115
9.6.1.	Vytvoření simulačního modelu	115
9.6.2.	Určení natavené oblasti	116
9.6.3.	Kontrola teplotního pole	117
9.6.4.	Analýza zbytkových napětí po svařování	120
9.6.5.	Analýza kritických míst programem MOVYPRO 07	122
10.	Vědecký přínos pro rozvoj technologických oborů a aplikace pro praktické využití	128
11.	Závěr	130
12.	Seznam použité literatury	133
13.	Seznam autorských publikací k dané problematice	136
	Přílohy	137

**Seznam symbolů**

T	-	termodynamická teplota	[K]
TC	-	kritická teplota	[K]
ΔT	-	teplotní spád	[K]
λ	-	součinitel tepelné vodivosti	[W . m ⁻¹ . K ⁻¹]
α	-	součinitel přestupu tepla	[W . m ⁻² . K ⁻¹]
σ	-	Stefan-Boltzmanova konstanta ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$)	[W . m ⁻² . K ⁻⁴]
c	-	měrné teplo	[J . kg ⁻¹ . K ⁻¹]
c_p	-	měrná tepelná kapacita při stálém tlaku	[J . kg ⁻¹ . K ⁻¹]
$\vec{q}$	-	vektor hustoty tepelného toku	[W.m ⁻²]
E	-	celková vyzařovaná energie	[J]
$Q(x,y,z)$	-	tepelný tok	[W]
q_o	-	tepelný výkon vnitřních zdrojů	[W]
$\dot{Q}$	-	celkový výkon zdroje	[W]
$\underline{Q}$	-	teplo	[J]
m	-	hmotnost	[kg]
t	-	čas	[s]
τ	-	celkový čas svařování	[s]
t	-	okamžitý čas svařování	[s]
ρ	-	hustota	[kg.m ⁻³]
η	-	dynamická viskozita,	[Pa.s]
ν	-	kinematická viskozita	[m ² .s ⁻¹]
v_s	-	rychlost svařování	[m .s ⁻¹]
α	-	součinitel teplotní vodivosti	[m ² .s ⁻¹]
l_0	-	charakteristický rozměr objektu	[m]
ξ	-	poloha zdroje v závislosti na době svařování	[m]
z_k	-	souřadnice osy z při ukončení svařování	[m]
r_e, r_i	-	poloměry 3D Gaussianu	[m]
z_e, z_i	-	určují délku kužele 3D Gaussianu	[m]
f_1, f_2	-	konstanty ovlivňující rozložení intenzity toku energie do mat.	[-]
Nu	-	číslo Nusseltovo	[-]
Re	-	číslo Reynoldsovo	[-]
Pr	-	číslo Prandtlovo	[-]



Gr	- číslo Grashoffovo	[-]
R_m	- mez pevnosti materiálu při dané teplotě	[Pa]
α	- součinitel teplotní roztažnosti	[K ⁻¹]
ν	- Poissonovo číslo	[-]
ε	- poměrné prodloužení	[-]
L	- koeficient daný podílem obsahu a obvodu vyzařující plochy	[m]
k, n	- koeficienty stanovené na základě součinu ($Gr \cdot Pr$)	[-]
β	- součinitel objemové roztažnosti vzduchu	[K ⁻¹]
l	- charakteristický rozměr vyzařující plochy	[m]
T_1	- teplota vyzařující plochy	[K]
T_2	- teplota okolního prostředí	[K]
Ψ_{1-2}	- radiační úhel	[rad]
A_1	- plocha ozařovaného tělesa	[m ²]
$T_{urč.}$	- určovací přechodová teplota mezi vyzařující plochou a okolím	[K]
QS	- specifické vnesené teplo na jednotku délky svaru	[J·mm ⁻¹]
η	- účinnost svařovacího procesu	[-]
U	- svařovací napětí	[V]
I	- svařovací proud	[A]
R	- střední poloměr potrubí	[mm]
h	- tloušťka stěny	[mm]
E	- Yongův modul pružnosti	[Pa]
Re	- mez kluzu materiálu	[Pa]
H	- deformační zpevnění	[Pa]
ε_{th}	- teplotní deformace	[-]



Seznam zkratek

- APB* - antiphase boundary (antifázové rozhraní)
AIM - air induction melting (tavení na vzduchu)
VIM - vacuum induction melting (tavení v indukčních pecích ve vakuu)
VAR - vacuum arc remelting (tavení v obloukových pecích ve vakuu)
ESR - electroslag remelting (elektrostruskové přetavování)
TIG - thursten inert gas (technologie svařování netavící se elektrodou v inertním plynu)
RSP - rapid solidification processing (procesy rychlého tuhnutí)
TOO - tepelně ovlivněná oblast
WPS - technologický postup svařování
MKP - metoda konečných prvků
MKD - metoda konečných diferencí
HMH - teorie pevnosti (Huber, Mise, Hencky)
TUL - Technická univerzita v Liberci
VŠB - Vysoká škola báňská, Technická univerzita Ostrava
MFF - Matematicko-fyzikální fakulta, Univerzita Karlova v Praze

1. ÚVOD

Dnešní doba je charakteristická neustále se zvyšujícími požadavky na kvalitu výrobních procesů, aplikaci nových technologií, a to zejména při svařování jiných než běžných materiálů. Mezi tyto materiály lze bezesporu zařadit intermetalické sloučeniny, které se v posledních letech dostávají do popředí zájmu na celém světě. K nejsledovanějším intermetalikům se řadí aluminidy železa, niklu a titanu. Zatímco některé z nich jsou již průmyslově využívány, jiné se nachází ve stádiu základního či aplikovaného výzkumu. Intermetalické sloučeniny na bázi železo-hliník označované jako aluminidy železa jsou předmětem zájmu již od třicátých let minulého století (De Van, Ziegler 1932), kdy byla poprvé zaznamenána výborná odolnost proti korozi u sloučenin s více než 18% Al. Tyto slitiny mají relativně nízké materiálové náklady, zaručují úsporu prvků jako Cr, Ni a mají nižší specifickou hmotnost než vysokolegované slitiny železa a niklu. Jejich pevnost v tahu je porovnatelná s mnoha ocelmi. Aluminidy železa mají dále dobrou otěruvzdornost, odolnost vůči kavitaci, vynikající odolnost vůči síře a jejím sloučeninám, a proto se předpokládá jejich použití např. na lopatky pro turbíny a kompresory tryskových motorů, konstrukční součásti v letectví, topné články, výměníky tepla, vybavení pro chemickou výrobu, pro aplikace v roztavených solích, komponenty jaderných reaktorů, regenerátorové desky, výfukové systémy a jiné součástky spalovacích motorů. Výše uvedené klady jsou však vykoupeny ne příliš příznivými specifickými vlastnostmi těchto materiálů z hlediska technologického zpracování a obtížná je i jejich samotná výroba. Především křehkost a s tím související nízké hodnoty tažnosti za normálních teplot způsobují ve svém důsledku problémy při obrábění, tváření i svařování. Jde tedy o materiály s obtížnou svařitelností. Z toho důvodu se jeví simulace svařování jako velice výhodný nástroj pro podporu a návrh vhodného svařovacího postupu.

Tyto skutečnosti jsou motivem pro výzkum zaměřený na svařitelnost aluminidu železa, který toho času probíhá na katedře strojírenské technologie Technické univerzity v Liberci. V jeho rámci vznikla předložená disertační práce: **Stanovení svařovacího postupu aluminidu železa za podpory simulačních výpočtů v programu SYSWELD.**

Zásadní otázkou bylo nalézt a zajistit takové podmínky a postupy během a po svařování, aby bylo dosaženo co nejnižších zbytkových napjatostí po svaření. Dalším úkolem bylo na základě simulací detekovat kritická místa ve svarku a následně navrhnout možnosti odstranění těchto míst, a to buď optimalizací parametrů, případně změnou technologického postupu.

V několika posledních letech byla většina publikací týkajících se aluminidů železa zaměřena výhradně na možnosti zlepšování materiálových vlastností a užití nových



postupů při výrobě a následném tepelném a mechanickém zpracování. Tento trend platí i v současnosti. Jednotlivé články je proto možné podle jejich obsahu rozdělit do následujících oblastí:

1. Výzkum vlivu přísad jednotlivých prvků na výsledné vlastnosti aluminidů, především na křehkost – McKamey [3], Kuruvilla [4].
2. Studium mechanických vlastností zejména chování při creepu, zjišťování podmínek pro použití za vysokých teplot, zlepšování creepových vlastností – Baker [5], Zacharia [6].
3. Práce zabývající se jednak určením podmínek pro výrobu polotovarů z aluminidů tvářením za tepla, jednak vlivem tepelného zpracování – Bordeaux [7], McKamey [8].
4. Využití příměsí pro úpravu mechanických vlastností pro vysoko i nízkoteplotní použití Liu, McKamey [9].
5. Studium vlivu procentuálního zastoupení jednotlivých prvků na svařitelnost a výslednou mikrostrukturu – Regina [10], Banovic [11].

Poslední nejnovější vývoj se týká vlivu různého obsahu chrómu na svařitelnost a mikrostrukturu slitin Fe-Cr-Al [33], dále na korozní únavu svarových spojů vystavených oxidačnímu prostředí [27].

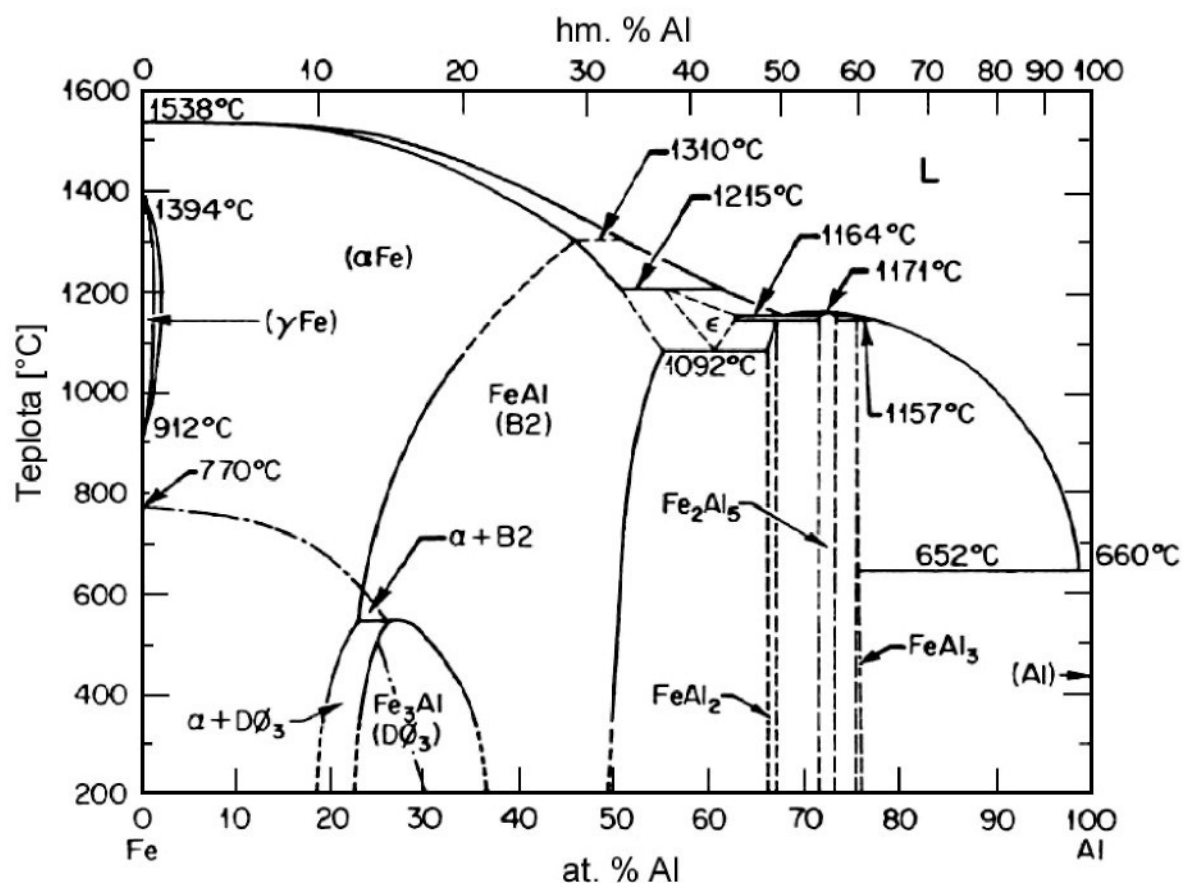
2. Vlastnosti slitin na bázi Fe_3Al

2.1. Struktura fází aluminidu železa v okolí složení Fe_3Al

Intermetalické sloučeniny (též intermetalické fáze nebo intermetalika) tvoří speciální skupinu materiálů. Z hlediska strukturního jsou to tuhé roztoky nebo sloučeniny, ve kterých jsou jednotlivé atomy pod určitou kritickou hodnotou T_c uspořádány na dlouhou vzdálenost. Většinou existují v relativně úzkém rozmezí koncentrací kolem jednoduchých stechiometrických složení.

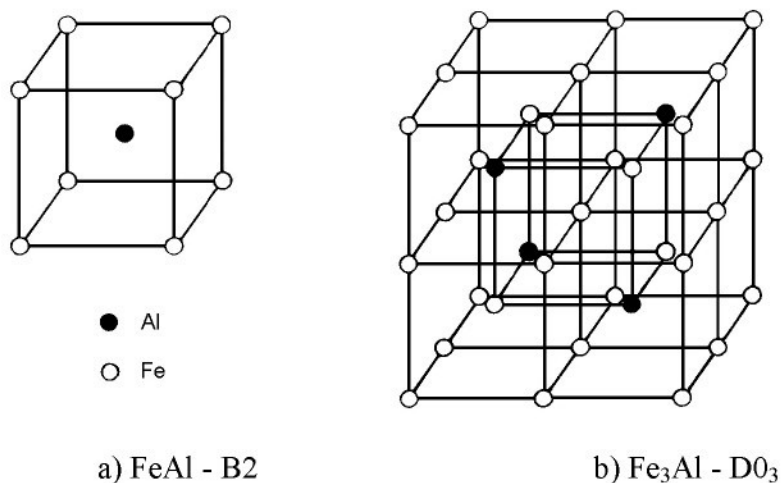
Struktura intermetalik souvisí s velmi silnou vazbou mezi nestejnými atomy a odtud vycházejí i mechanické vlastnosti intermetalik. Jejich tvrdost a vysoká pevnost při vysokých teplotách tvoří z intermetalik slibnou variantu při vývoji nových materiálů pro použití za vysokých teplot.

Fázový diagram (obr. 2.1) binárního systému Fe-Al obsahuje řadu intermetalických fází, z nichž z hlediska praktického jsou zajímavé: tuhý roztok α a uspořádané struktury B2 a D_{03} [2]. V okolí stechiometrického složení Fe_3Al nabývá slitina různých struktur v závislosti na teplotě a složení. Jsou to neuspořádaný tuhý roztok hliníku v železe (α -ferit) při vysokých teplotách a dvě uspořádané fáze (D_{03} a B2) při teplotách nižších [25].



Obr. 2.1 Fázový diagram Fe – Al

Uspořádané krystalové struktury $D0_3$ a $B2$, jejichž základní buňky jsou na obr. 2.2, vycházejí z prostorově středěné krychlové struktury [2]. Mřížka $B2$ má ve středu krychle atom hliníku a v rozích atomy železa. Jde o průnik dvou prostých krychlových mříží obsazených železem a hliníkem s mřížkovým parametrem a_0 . Elementární buňka $D0_3$ je složena z osmi elementárních buněk $B2$ se střídavým umístěním atomů Fe a Al v prostorově středěné poloze, s mřížkovým parametrem $a_0' = 2a_0$ ($B2$).

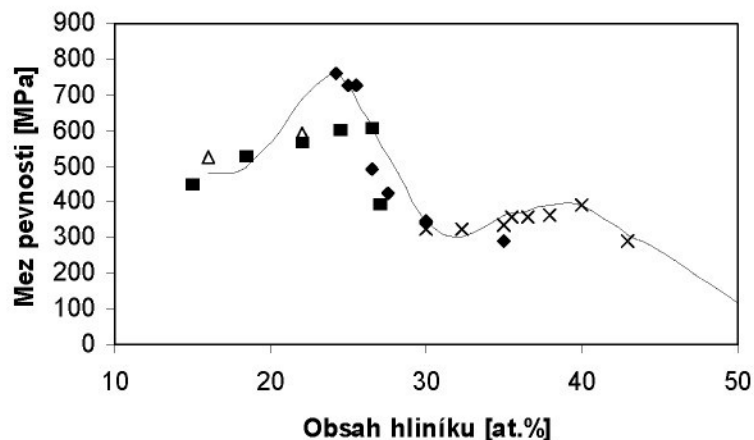


Obr. 2.2 Základní buňka struktury $B2$ a $D0_3$

V uspořádaném stavu $B2$ je každý atom A obklopen osmi nejbližšími atomy B a naopak. Plocha, podél níž je toto uspořádání nejbližších sousedů narušeno, se nazývá antifázové rozhraní (APB). Tato rozhraní rozdělují nadmřížku na domény. V Fe_3Al existují nad teplotu T_C domény $B2$, při podchlazení pod tuto teplotu dochází ke vzniku jemnějších domén $D0_3$ uvnitř dřívějších domén $B2$ [2].

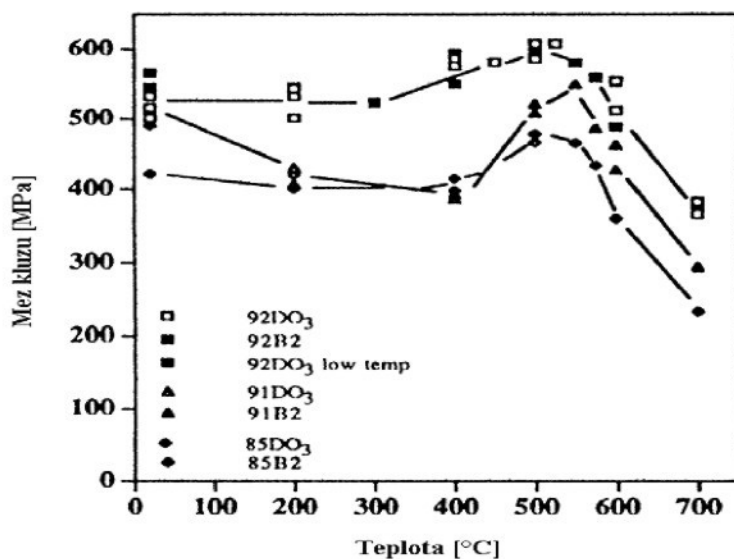
2.2. Mechanické vlastnosti slitin na bázi Fe_3Al

Mechanické vlastnosti aluminidů železa jsou velmi citlivé na mnoho faktorů, mezi něž patří obsah železa (stechiometrie), uspořádání (typ, množství, velikost uspořádaných domén), tepelné zpracování, teplota tváření, slitinové přísady, prostředí, mikrostruktura. Při pokojové teplotě mez pevnosti v tahu dosahuje maxima blízko stochiometrického složení Fe_3Al (obr. 2.3). Podobný trend byl pozorován i u tvrdosti. Důvod pro vyšší pevnost je mnohem vyšší stupeň uspořádání $D0_3$ při tomto složení. APB slouží jako bariéry pohybu dislokací. Superdislokace $D0_3$ obtížně překonává APB šplháním nebo příčným skluzem. To přispívá ke zvýšení hodnot meze pevnosti.



Obr. 2.3 Průběh meze pevnosti v závislosti na obsahu hliníku

Maximum meze pevnosti v závislosti na teplotě pro většinou používané binární slitiny s 28at% Al leží blízko přechodové teploty $D0_3$ -B2 ($\sim 550^\circ\text{C}$). Tato skutečnost se popisuje jako anomálie skluzového napětí (obr. 2.4) [25]. Na obrázku jsou závislosti pro materiály s různou strukturou (B2 a $D0_3$), které lze připravit různým tepelným zpracováním. Anomálie meze kluzu je uváděna do souvislosti s existencí tepelných vakancí. Tento model je založen na představě o zpevňování spolupůsobením termálních vakancí při středních teplotách a dislokačního creepu při vysokých teplotách [2,3].



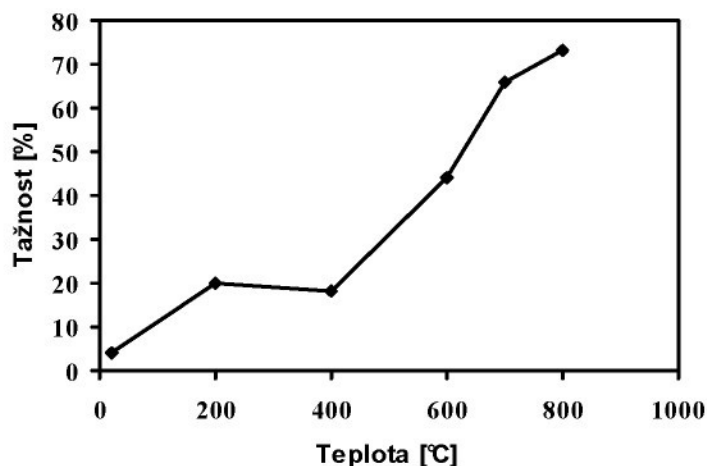
Slitina 85 – Fe-28%Al-5%Cr-1%Nb s 0,5%Si a 0,5%B

Slitina 91 – Fe-28%Al-5%Cr-1%Nb s 1%Si a 0,5%B

Slitina 92 – Fe-28%Al-5%Cr-1%Nb s 2%Si a 2%B

Obr. 2.4 Závislost meze kluzu na teplotě pro slitiny s 28at% Al

Pro Fe_3Al je charakteristická omezená tažnost a křehký lom při pokojové teplotě a nízkých teplotách. Typické hodnoty prodloužení při pokojové teplotě jsou menší než 10% (obr. 2.5). S rostoucí teplotou tažnost narůstá na hodnoty umožňující tvářet materiál za tepla.

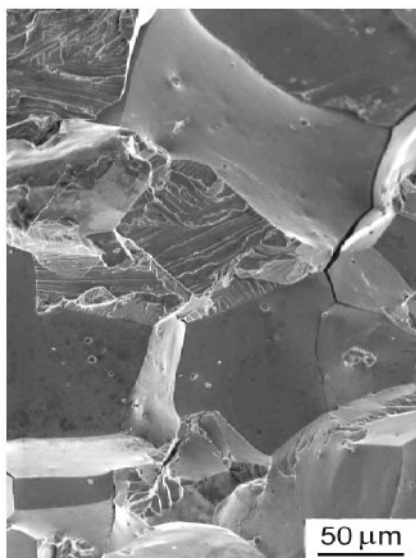


Obr. 2.5 Závislost tažnosti na teplotě

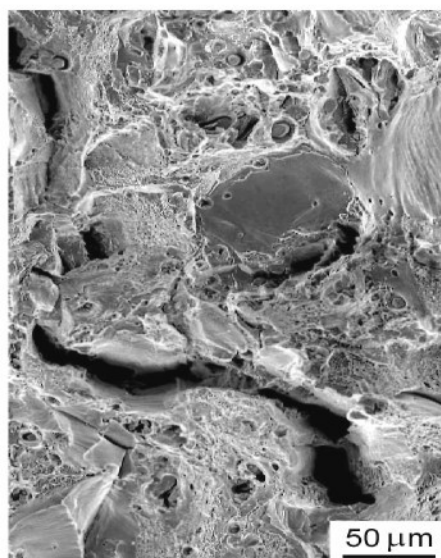
U aluminidu železa se při pokojové teplotě pozoruje interkrystalický lom (obr. 2.6a). Jeho příčinou je malá pevnost podél hranic zrn a vysoké hodnoty skluzového napětí. S rostoucí teplotou jeho hodnoty klesají a lomové plochy při porušení obsahují i transkrystalické partie [25].

Lom je z velké části podmíněn interakcí s okolním prostředím. V zásadě se jedná o interakci:

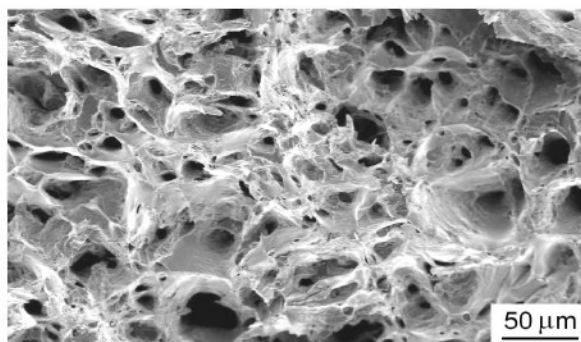
- A) pozitivní s kyslíkem v ovzduší, při němž se vytváří ochranná vrstva Al_2O_3 .
- B) negativní s vodní párou, při níž vzniká vodík, to vede k tzv. vodíkové křehkosti.



a) Převážně interkrystalický lom při pokojové teplotě



b) Výrazný podíl transkrystalického lomu o při 520°C



c) Tvárný lom pozorovaný při teplotě 700°C

Obr. 2.6 Lomové plochy aluminidu železa Fe₂₈Al₄Cr

Lomová plocha tělesa porušeného při pokojové teplotě má charakter křehkého lomu. Při lomu často dochází k interkrystalické dekohezi současně s porušením jednotlivých zrn transkrystalickým lomem (obr. 2.6a). V oblasti D0₃ (200-520°C) dochází ke snížení podílu interkrystalického lomu a zvýšení podílu transkrystalického lomu. Zvyšování teploty vede ke vzniku výrazných trhlin na lomové ploše (obr. 2.6b). Lomová plocha v oblasti B2 (550-700°C) se výrazně mění od předchozích oblastí. Plocha má charakter transkrystalického tvárného lomu. Se zvyšující se teplotou se podíl fazetek značně zmenšuje a zmenšuje se i množství trhlinek. U vzorku deformovaného při 700°C má celá lomová plocha tvárný charakter se zřetelnou plastickou deformací a na lomové ploše se již nevyskytují žádné trhliny (obr. 2.6c).

Tažnost může být zlepšena také tepelným zpracováním konkrétně žiháním nebo použitím příměsí. Ternární příměsi, jak intersticiální tak substituční, způsobují změny především mechanických vlastností aluminidů a některé ovlivňují kritickou teplotu T_C . Vhodným použitím příměsí můžeme potlačit křehkost při nízkých teplotách a zlepšit tvařitelnost při pokojové teplotě [3,25].

2.3. Výhody slitin na bázi Fe₃Al

Mezi výhody těchto slitin patří především výborná odolnost proti korozi, relativně nízké materiálové náklady, úspora prvků jako Cr, Ni a nižší specifická hmotnost než vysokolegované slitiny železa a niklu. Jejich pevnost v tahu je porovnatelná s mnoha ocelmi. Aluminidy železa mají dobrou otěruvzdornost, odolnost vůči kavitaci, vynikající odolnost vůči síře a jejím sloučeninám, proto se předpokládá jejich použití např. na konstrukční součásti v letectví, výměníky tepla, topné články, vybavení pro chemickou výrobu, pro aplikace v roztavených solích, komponenty jaderných reaktorů, regenerátorové desky a

součástky spalovacích motorů. Na obr. 2.7 je vidět filtr z aluminidu železa Fe_3Al používaný při zpracování fosilních paliv [8].



Obr. 2.7 Příklad součásti vyrobené z aluminidu železa Fe_3Al

2.4. Svařitelnost slitin na bázi Fe_3Al

Svařitelnost aluminidů železa je velice obtížná. Svůj podíl má na tom především vysoká křehkost za normální teploty a s tím související nízké hodnoty tažnosti, které se v závislosti na prostředí pohybují od 4 do 12% viz tab. 1. Přitom například legované oceli mají hodnoty tažnosti okolo 20% a u austenitických dokonce převyšují 50%. Dalším problémem je vysoký koeficient lineární teplotní roztažnosti viz. tab. 2, která uvádí teplotní závislost koeficientu teplotní roztažnosti pro aluminid a ocel. Z tabulky je zřejmé, že hodnoty tohoto koeficientu jsou nejvyšší právě pro aluminid. Oproti tomu součinitel tepelné vodivosti je nízký jak uvádí tab. 3, kde jsou vidět hodnoty součinitele tepelné vodivosti opět pro aluminid a ocel. Důsledkem výše uvedeného jsou vysoké vnitřní napjatosti po svařování. Ne příliš příznivé jsou dále vysoké hodnoty meze kluzu za zvýšených teplot čímž se snižuje možnost odbourání vnitřních napětí ve fázi ochlazování svaru a při dohřevu na teplotách pod 700°C .

Tab. 1 Mechanické vlastnosti aluminidu železa v závislosti na výběru prostředí

	Tažnost [%]	Mez kluzu [MPa]	Mez pevnosti [MPa]
Vzduch	4,1	387	559
Vakuum ($1 \cdot 10^{-4}$ Pa)	12,8	387	851
Kyslík ($6,7 \cdot 10^{-4}$ Pa)	12,0	392	867
Ar + 4% H_2 ($6,7 \cdot 10^{-4}$ Pa)	8,4	385	731
Vodní pára (67 Pa)	2,1	387	475



Tab. 2 Teplotní roztažnost aluminidu železa v porovnání s ocelí

Teplota (°C)	Součinitel teplotní roztažnosti (K^{-1})		
	Aluminid	Legovaná ocel	Vysokolegovaná ocel
473	17,1	13,8	16
673	23,1	14,4	17,3
873	24,6	15	18,5
1073	28,7	15,6	19,8
1273	24,5	-	-
1473	24,7	-	-

Tab. 3 Tepelná vodivost aluminidu železa v porovnání s ocelí

Teplota (°C)	Součinitel tepelné vodivosti ($W.m^{-1}.K^{-1}$)		
	Aluminid	Uhlíkové oceli	Vysokolegované oceli
200	13,5	46 - 80	15 - 27
400	15,8	40 - 60	18 - 29
600	17,8	33 - 39	21 - 30
800	19,4	25 - 36	
1000	21,8	30 - 35	

Studie svařitelnosti aluminidů identifikovaly náchylnost na tvorbu trhlin za studena a specifickou závislost teplých trhlin na sebemenších změnách chemického složení slitiny (David, McKamey) [8,9].

Dále bylo zjištěno, že studené trhliny jsou spojené s citlivostí aluminidů na prostředí vodíku a mohou vznikat jednak bezprostředně po svařování, ale také i v průběhu několika hodin případně dnů po svařování. Tepelné zpracování v průběhu svařování (předehřev, dohřev) může tak ve většině případů snížit zbytková napětí a to díky rozdílu teplotní expanze a menšímu množství zbytkového vodíku (McKamey).

Předběžné ověřovací testy k náchylnosti na tvorbu trhlin za tepla byly provedeny užitím tzv. sigma jig testu (Goodwin). Užitím testu bylo zjištěno, že dobrá svařitelnost aluminidů z hlediska odolnosti vůči trhlínám za tepla, je silně závislá na množství a druhu

legovacích přísad. Obecně bylo dokázáno, že niob, chróm a malé množství uhlíku svařitelnost zlepšují, zatímco bór a TiB_2 zhoršují [1,8].

2.5. Výroba a zpracování slitin na bázi Fe_3Al

Studie z poslední doby (McKameye, Hardwick) ukazují, že tavení aluminidů může být bezproblémové, a to při více různých metodách tavení: v indukčních pecích na vzduchu (AIM – air induction melting) nebo ve vakuu (VIM – vacuum induction melting), ve vakuových obloukových pecích (VAR – vacuum arc remelting), nebo elektrostruskovým přetavováním (ESR – electroslag remelting). AIM je nejehospodárnější technika, ale může být použita, jen v případě jestliže se ochranná struska vytvoří snadno na roztaveném kovu. Vysoký obsah hliníku v těchto slitinách podporuje rychlý vznik souvislého filmu Al_2O_3 , který brání jakémukoliv přechodu kyslíku nebo dusíku ze vzduchu do roztaveného kovu. Aluminidy železa jsou velmi citlivé na pohlcování vodíku během tavení, protože roztavený vodík může způsobit velkou pórovitost v odlitku. K zabránění pórovitosti a k řízení mikrostruktury se doporučují vakuové technologie tavení, jako jsou VIM a VAR. Jako nejvýhodnější pro aluminidy železa se ukázalo indukční tavení ve vakuu, které však výrazně zvyšuje výrobní náklady. Dále při lití ingotů je nutno dodržet přesné chemické složení a omezit okolní vlivy při výrobě. Jelikož má Fe_3Al nízkou tepelnou vodivost, jsou slitiny náchylné k praskání při rychlých změnách teploty během tuhnutí a ochlazování i při a po tepelném zpracování [3].

Přeměna ingotů z Fe_3Al na různé formy diferencovaných produktů, jako jsou tyče, dráty, plechy a trubky, může být provedena užitím válcování, kování, nebo pomocí protlačovacích technik za teplot 600-1100°C. Produkce bezešvých trubek z aluminidů je možná třemi způsoby, a to odstředivým litím, rotačním prorážením tyče za tepla a protlačováním tyče za tepla přes trn [3,6].

Techniky obrábění a broušení aluminidů nejsou ještě plně rozvinuté. Úspěšné řezání bez vzniku trhlin vyžaduje ostré nástroje a nízké obráběcí rychlosti (0,35 m/s a méně). Většina vzniklých trhlin během řezání nebo broušení je připisována vodíkové křehkosti v normálním prostředí. Z tohoto důvodu se předpokládá širší využívání jiných prostředí jako je olej nebo různé druhy maziv.

Prášky na základě Fe_3Al mohou být produkovány buď za rozprašování dusíku nebo argonu, přičemž následující ztuhnutí na plnou hustotu se provádí při protlačování za teploty 1000°C. Zkouška tahem prokázala, že slitiny produkové z prášků při rozprašování dusíku mají mírně zlepšené vlastnosti, než prášky vyrobené při rozprašování argonu. Avšak bez důkladné kontroly množství nečistot u aluminidů produkováných z prášků dochází ke vzniku velkého množství oxidů, které mohou snížit mechanické vlastnosti především tažnost.



Procesy rychlého tuhnutí (RSP– rapid solidification processing) jsou značně užívány během posledních let pokusů (Barker, Bordeaux) vedoucích ke zvýšení tažnosti intermetalik. Výroba slitin metodou (RSP) produkuje zjemněné zrna, zvyšuje chemickou homogenitu, zlepšuje rozpustnost elementárních přísad a v některých případech produkuje nerovnovážné struktury. Většina RSP aluminidů je produkována procesy práškové metalurgie ztuhnutím při protlačování nebo lisování za tepla [6,7,8].

3. Teplotní procesy při svařování

Teplotní procesy při tavném svařování probíhají za podmínek rychle se měnící teploty v širokém rozsahu. Meze změn teploty jsou určeny jednak teplotou okolí při svařování a jednak teplotou vypařování kovu. V tomto teplotním intervalu probíhá celá řada procesů: tavení základního a přídavného materiálu, metalurgické reakce ve svarové lázni, krystalizace svarového kovu spoje, strukturní a objemové změny v nataveném kovu i základním a přídavném materiálu.

Teplo vnesené v místě prováděného svaru tepelným zdrojem se šíří postupně do celého objemu svařovaných částí. Šíření tepla v prostoru z těles teplejších na tělesa studenější probíhá třemi základními způsoby a to:

- Vedením tepla - kondukcí, totiž bezprostředním stykem teplejších hmotných částic se studenějšími.
- Prouděním - konvekcí, která probíhá pouze v kapalinách nebo plynech. Při tomto jevu se teplo přenáší pohybem ohřátých částic.
- Sáláním - radiací (tepelným zářením). Intenzita záření závisí na teplotě tělesa a při dopadu na jiné těleso se vlny mění v teplo.

Přenos tepla v praxi je obvykle kombinací těchto způsobů. Při výpočtech přenosu tepla je nutno uvažovat různé okrajové podmínky. Většinou nejsou všechny do výpočtu zahrnuty, a proto se mohou vypočtené hodnoty lišit od tabelovaných [26].

3.1. Sdílení tepla vedením

Pod pojmem vedení tepla rozumíme přenos energie interakcí mezi atomy a molekulami spojitého prostředí vznikající v důsledku nerovnoměrného rozložení teplot. V libovolném časovém okamžiku můžeme stanovit v každém místě teplotního pole tepelný tok $Q(x,y,z)$ [W]. Vztáhneme-li tepelný tok na jednotku plochy v rovině kolmé ke směru toku, obdržíme vektor hustoty tepelného toku $\vec{q}$ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$].

Vazbu mezi hustotou tepelného toku a rozložením teploty $T(x,y,z)$ v homogenním a isotropním prostředí popsal v roce 1822 J. B. Fourier. Pro sdílení tepla vedením v homogenním prostředí platí Fourierův zákon, podle něhož hustota tepelného toku $\vec{q}$ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$] je úměrná teplotnímu gradientu podle vztahu (3.1) [20, 26].

$$\vec{q} = -\lambda \text{ grad } T \quad (3.1)$$



kde:

$grad\ T$ - je gradient termodynamické teploty T , v témže místě látky

λ - je součinitel tepelné vodivosti $[W.m^{-1}.K^{-1}]$

Pozn. Záporné znaménko ve vztahu vyjadřuje, že tepelný tok má opačný směr než růst teploty (teplotní gradient).

Mění-li se teplota T při vyrovnávání teplotních rozdílů v tělese, je sdílení tepla vedením neustálené (nestacionární). Jde o změny teploty v daném místě s časem, tj. termodynamická teplota T daného místa homogenního prostředí je v tomto případě funkcí souřadnic a času.

Při řešení obecných úloh sdílení tepla vedením musíme ještě Fourierovu diferenciální rovnici vedení tepla rozšířit o výkon vnitřních zdrojů. Jde pak o tzv. obecnou rovnici vedení tepla v homogenním prostředí, jejíž tvar popisuje rovnice (3.2).

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{1}{c_p \rho} q_0, \quad (3.2)$$

kde:

ρ - hustota $[kg.m^{-3}]$

c_p - měrné teplo při stálém tlaku $[J.kg^{-1}.K^{-1}]$

a - je součinitel teplotní vodivosti $[m^2.s^{-1}]$

q_0 - je tepelný výkon vnitřních zdrojů, s jakým je teplo generováno v látce o jednotkovém objemu (za 1 s)

3.2. Sdílení tepla prouděním

Pojem konvekce je prakticky shodný s pojmem proudění. Konvektivní přenos tepla se může uskutečnit pouze při makroskopickém pohybu spojitého prostředí tj. při proudění tekutin. U samovolného proudění tekutiny se jedná o případy, kdy je proudění způsobeno rozdílem měrných hmotností teplých a studených částic. Při ohřívání tekutiny působí na ohřáté teplejší částice vztlak a tyto částice stoupají vzhůru. Studené částice naopak klesají v důsledku své větší měrné hmotnosti. Čím více tepla se sdílí, tím je samovolný pohyb intenzivnější.

O tom zda se jedná o samovolné proudění laminární nebo turbulentní rozhoduje velikost teplotního spádu mezi povrchem svařovaného dílu a okolním prostředím. Je-li tento



rozdíl menší než 15°C, jde o proudění laminární, v opačném případě mluvíme o proudění turbulentním. V případě použití tavných metod svařování se bude téměř vždy jednat o proudění turbulentní.

Celkový průběh samovolného proudění závisí také na tom, zda v příslušném prostoru dochází pouze k ohřevu či ochlazování okolního prostředí, nebo zda oba jevy probíhají současně. Prvý případ nazýváme přestupem tepla v neomezeném prostoru a je využíván při výpočtech sdílení tepla na povrchu materiálu. Druhý případ je nazýván přestupem tepla v omezeném prostoru a je využíván při výpočtech sdílení tepla například při svařování uzavřených profilů [20,26].

Dalším důležitým kritériem je prostorové směřování plochy, pro kterou se sdílení tepla prouděním počítá. To znamená, zda se jedná o rovinu vertikální, horizontální, nebo rovinu skloněnou pod nějakým úhlem. U posledních dvou případů, tedy roviny horizontální, nebo roviny skloněné pod určitým úhlem je ještě třeba rozlišit, zda se jedná o horní povrch desky, nebo o spodní povrch desky. V případě spodního povrchu desky se jedná o specifické proudění a součinitel přestupu tepla bude přibližně o 30% nižší, než u povrchu horního.

3.2.1. Sdílení tepla prouděním v neomezeném prostoru

Samovolné proudění je charakterizováno tím, že není uměle vyvoláno nebo udržováno, ale tvoří se samo vlivem rozdílu teplot. Při sdílení tepla prouděním je také důležitá poloha vyzařující plochy.

Přestup tepla při všech druzích přirozeného proudění se dá (na základě teoretického výpočtu) vyjádřit pomocí bezrozměrných čísel. Nusseltova (pro přestup tepla), Prandtlůva (definujícího fyzikální konstantu látky ovlivňující konvekci) a Grashofova (pro přirozenou konvekci). Při vlastním výpočtu se vychází z různých tvarů Nusseltova čísla (3.3) a (3.4).

$$Nu = k \cdot (Gr \cdot Pr)^n \quad (3.3.)$$

$$Nu = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda} \quad (3.4.)$$

kde:

Nu - Nusseltovo číslo [-]

k, n - Koeficienty stanovené na základě součinu $(Gr \cdot Pr)$ [-]

Gr - Grashofovo číslo [-]

Pr - Prandtlovo číslo [-]

α - Součinitel přestupu tepla [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]



λ - Součinitel tepelné vodivosti [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]

L - Koeficient daný podílem obsahu a obvodu vyzařující plochy $L = \frac{S}{O}$ [m]

Pro výpočet součinu ($Gr \cdot Pr$) a stanovení koeficientů vycházíme pro Grashofovo číslo ze vztahu (3.5), přičemž Prandtlovo číslo má pro teplotu okolí 20°C hodnotu 0,722.

$$Gr = \beta \cdot \Delta T \cdot \frac{g \cdot l^3}{\nu^2} \quad (3.5)$$

kde

β - Součinitel objemové roztažnosti vzduchu (3.6) [K^{-1}]

ΔT - Rozdíl mezi teplotou povrchu vyzařující plochy a teplotou okolí [K]

g - Gravitační zrychlení $g = 9,83$ [$m \cdot s^{-2}$]

l - Charakteristický rozměr vyzařující plochy [m]

ν - Kinematická viskozita okolního prostředí [$m^2 \cdot s^{-1}$]

$T_{urč.}$ - Určovací přechodová teplota mezi vyzařující plochou a okolím (3.6) [K]

$$\beta = \frac{1}{T_{urč.}} \quad \text{kde} \quad T_{urč.} = \frac{T_{povrchu} + T_{okoli}}{2} \quad (3.6)$$

Výpočtem Grashofova čísla a součinu ($Gr \cdot Pr$) je možné z tab. 4. stanovit koeficienty k a n .

Tab. 4 Koeficienty k a n na základě výsledku součinu ($Gr \cdot Pr$)

Gr . Pr	10^{-3}	10^{-3} až $5 \cdot 10^2$	$5 \cdot 10^2$ až $2 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^7$ až 10^{14}
k	0,5	1,18	0,54	0,135
n	0	0,125	0,25	0,333

Doplněním koeficientů do vzorce (3.3) získáme hodnoty Nusseltova čísla a na základě vzorce (3.7) hodnoty součinitele přestupu tepla prouděním [20,26].

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{L} \quad (3.7)$$

3.3. Sdílení tepla sáláním

Sálání je zvláštním způsobem sdílení tepla. Od ostatních způsobů se liší tím, že nepotřebuje zprostředkující látky. Zářivá energie závisí pouze na teplotě tělesa a přenáší se



elektromagnetickým vlněním s různou délkou vln. Proto záření při všech vlnových délkách lze označit jako základní vlastnost všech hmotných těles.

Proces sdílení tepla sáláním je popisován třemi základními zákony (Kirchhoffovým, Plackovým a Stefan-Boltzmannovým). Pro určení součinitele přestupu tepla sáláním je možné vycházet ze Stefan-Boltzmannova zákona (3.8).

$$Q_{net} = A_1 \cdot \Psi_{1-2} \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (3.8)$$

kde

Q_{net} - Intenzita záření [$W \cdot m^{-2}$]

σ - Stefan-Boltzmannova konstanta $\sigma = 5,6704 \cdot 10^{-8}$ [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$]

T_1 - Teplota vyzařující plochy [K]

T_2 - Teplota okolního prostředí [K]

Ψ_{1-2} - Radiační úhel [rad]

A_1 - Plocha ozařovaného tělesa [m^2]

Rozepíší-li se teploty v závorce Stefan-Boltzmannova zákona (3.8) pomocí určovací teploty $T_{urč}$ a rozdílu teplot ΔT , získáme tento zákon v jiném tvaru (3.9).

$$Q_{net} \cong A_1 \cdot (4 \cdot \sigma \cdot T_{urč}^3 \cdot \Psi_{1-2}) \cdot \Delta T = A_1 \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (3.9)$$

kde

$T_{urč}$ - Určovací přechodová teplota mezi vyzařující plochou a okolím [K]

ΔT - Rozdíl teplot mezi teplotou vyzařující plochy a teplotou okolního prostředí [K]

Z tohoto tvaru je již jednoduché získat součinitel přestupu tepla sáláním. Aby bylo možné případ zobecnit, je třeba předpokládat, že v dostatečné blízkosti vyzařující plochy není žádné další těleso (plocha), které by sálavou energii odrazilo zpět. Tedy, že vyzařující plocha je obklopena pouze okolním prostředím. V tom případě je součin $A_1 \cdot \Psi_{1-2} \cong 1$ a pro součinitel přestupu tepla sáláním získáme vztah (3.10)

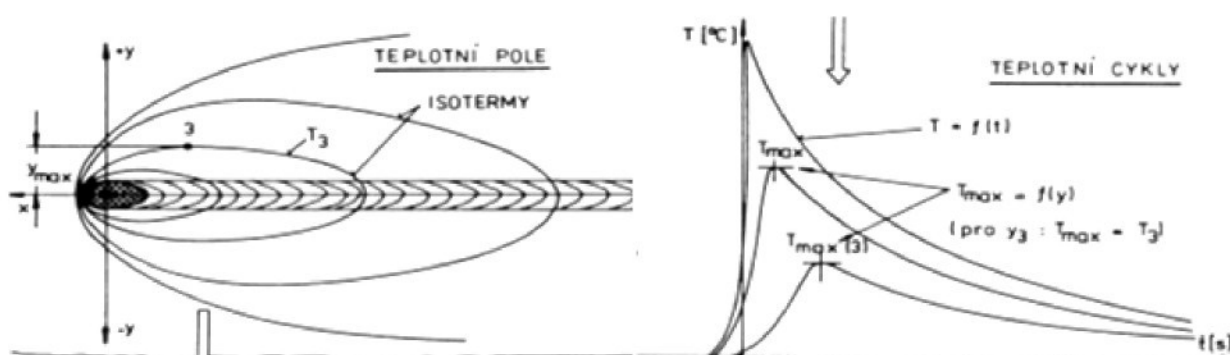
$$\alpha = 4 \cdot \sigma \cdot T_{urč}^3 \quad (3.10)$$

Po dosazení $T_{urč}$ pro různé teploty povrchu vyzařující desky do vzorce (3.10) získáme teplotní závislost součinitele přestupu tepla sáláním [20,26].

3.4. Teplotní pole

V důsledku přívodu tepelné energie do místa vytvářeného svaru vzniká v základním materiálu nestacionární teplotní pole, to znamená, že teplota T v určitém bodě tělesa o souřadnicích (x,y,z) , je kromě polohy také funkcí času t . V matematickém vyjádření pro případy bez vnitřních zdrojů tepla je tento vztah určen rovnicí (3.11). Na obr. 3.12 je vidět charakter teplotního pole v ustáleném stavu.

$$T = f(x,y,z,t) \quad (3.11)$$



Obr. 3.12 Charakter teplotního pole v ustáleném stavu při svařování tenké desky

Podle geometrického charakteru svařovaných součástí a charakteru působení tepelného zdroje uvažujeme pro praktické účely tři základní případy sdílení tepla a charakteru teplotních polí:

- Jednorozměrné teplotní pole – stykové svařování.
- Dvojrzměrné teplotní pole – svařování tenkých desek.
- Trojrozměrné teplotní pole – vytváření návaru na porchu tlustostěných součástí.

Při matematickém řešení teplotních polí se obecně vychází ze základní diferenciální Fourierovy rovnice sdílení tepla určené vztahem (3.13), kde λ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) je součinitel tepelné vodivosti, c ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) měrné teplo a a ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) součinitel teplotní vodivosti. Tato základní diferenciální rovnice byla odvozena na základě zákona o zachování energie.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = a \nabla^2 T \quad (3.13)$$

Při respektování celé řady omezujících předpokladů lze rovnici zjednodušeně řešit tzv. metodou okamžitých tepelných zdrojů a získat základní představu o charakteru teplotního



pole. Základním omezujícím předpokladem řešení je nerespektování teplotní závislosti fyzikálních veličin svařovaných materiálů. Pro praktické účely se obvykle uvádějí vztahy pro určení teploty v jednotlivých bodech tělesa v tzv. kvazistacionárním stavu. Sledováním teplotních polí, pohybujících se zdrojů tepla je možné zjistit, že zpočátku se zvětšuje oblast zvýšených teplot. S rostoucím časem však teplotní pole dosáhne tzv. mezních rozměrů, dále se nemění a pohybuje se stejnou rychlostí jako pohybující se zdroj tepla. Tento stav se nazývá mezní nebo ustálený (kvazistacionární). Proces ohřevu u zdroje s konstantním výkonem lze rozdělit do třech stádií:

1. *Stadium* – nasycení teplem, rozměry ohřívané oblasti se zvětšují.
2. *Stadium* – ustálený stav, teplotní pole již nemění své rozměry.
3. *Stadium* – vyrovnávání teploty, po ukončení svařování.

Řešení teplotních polí s uvažováním teplotních závislostí fyzikálních veličin základních materiálů je dnes možné především díky výpočtovým postupům využívajícím metodu konečných prvků (MKP), nebo metodu konečných diferencí (MKD) je však nutné použití dostatečně výkonné počítačové techniky.

K analýze teplotních polí při svařování lze samozřejmě použít i experimentální postupy, které při návrhu metodiky využívají závěrů zjednodušených výpočtových metod [13,26].

4. Pnutí a deformace při svařování

Při tavném svařování se do oblasti vytváření svarového spoje přivádí teplo, potřebné k roztavení přídavného materiálu a k natavení svarových úkosů. Fyzikální podstatou vzniku vnitřních pnutí a deformací při svařování je nestacionární šíření tepla, tedy nerovnoměrný ohřev a ochlazování. Vnitřní pnutí při svařování jsou složena ze dvou částí. Jsou to jednak pnutí smršťovací, která vznikají z důvodu omezeného prodlužování a omezeného smršťování ohřáté oblasti svarového spoje a jednak pnutí strukturní, která vznikají při objemových změnách při chladnutí tavné svarové lázně a při strukturních přeměnách materiálu. Vnitřní pnutí a deformace jsou nežádoucím jevem. Není možné jim zabránit, lze však pomocí cílených technologických zásahů ovlivnit jejich velikost.

Vnitřní pnutí jsou pnutí, která jsou ve svarku přítomna, i když na něj nepůsobí žádné vnější síly a momenty. V některých částech svarku jsou tahová a jinde tlaková. Mohou působit ve více osách, ale vzájemně jsou v rovnováze. V případě svařování tenkých plechů působí vnitřní pnutí v rovině (ve směru podélné a příčné osy svaru), u plechů tlustých a u koutových svarů vzniká prostorový stav napjatosti. Vnitřní svarová pnutí mohou dosáhnout meze kluzu svařovaného materiálu nebo ji i za daných podmínek překročit. Vnitřní pnutí, která nadále zůstávají ve svarku se někdy nazývají zbytková neboli reziduální pnutí. Vnitřní pnutí, která se v dílu při jeho svařování vytvoří, nejsou na svarku patrná. Mohou se nepříznivě projevit až vznikem trhlin ve svarovém kovu či v TOO, nebo deformacemi při následném obrábění, kdy dojde k uvolnění vnitřních pnutí a následkem toho ke změně tvaru. Vnitřní pnutí se může nepříznivě projevit i při provozu svařené konstrukce, např. snížením její únosnosti při dynamickém zatížení, rozměrovou nestálostí nebo zvýšenou náchylností ke korozi pod napětím.

Deformace jsou nežádoucí změny tvarů a rozměrů jednotlivých dílů i celých svařených konstrukcí, které jsou nepřipustné buď z hlediska dalšího použití nebo pouze ze vzhledových důvodů. Obvykle je možno deformace po svaření odstranit. Všechny způsoby odstraňování deformací (např. rovnání, opracování svarku) však zvyšují výrobní náklady [29].

4.1. Vztah mezi vnitřním pnutím a deformací

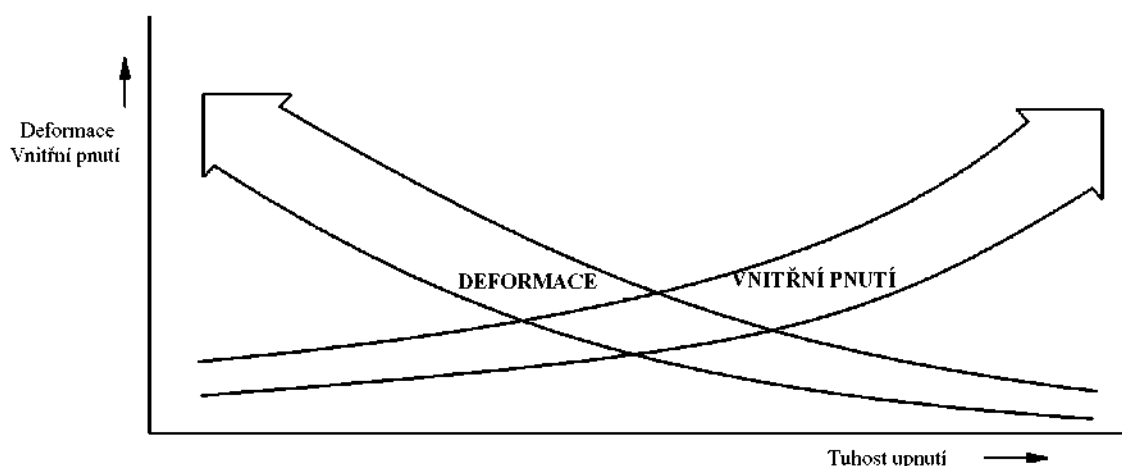
Základní příčiny vzniku vnitřních pnutí a deformací jsou:

- Existence teplotních gradientů ve svarku, daná nestejným ohřevem a ochlazováním. V ose svaru teplota dosahuje maxima, na obě strany od osy směrem do

základního materiálu teplota exponenciálně klesá až na teplotu místnosti či předehřevu. V závislosti na teplotě dochází k prodlužování a smršťování jednotlivých míst svarového spoje.

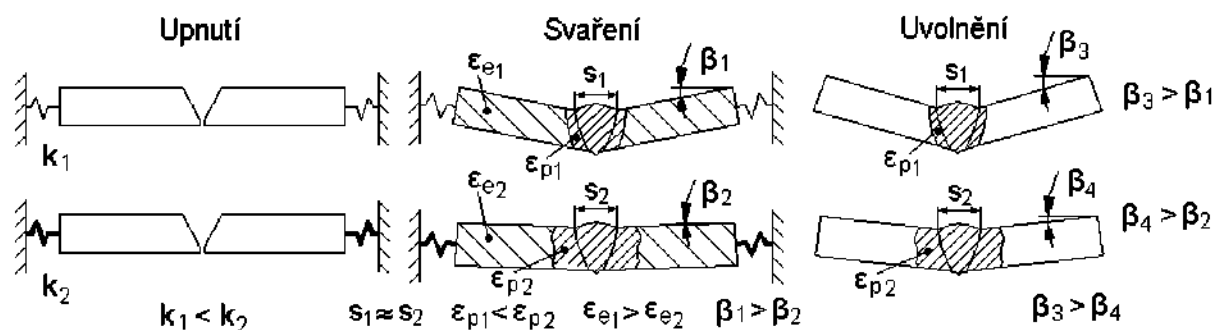
- Strukturní změny v základním materiálu i ve svarovém kovu spojené s objemovými změnami v případě, že materiál prodělává fázové přeměny. Při fázových přeměnách při přechodu těchto teplot dochází ke změnám objemu a tím ke vzniku strukturních pnutí.
- Tuhost svařované konstrukce. Příмым důsledkem tuhosti je vznik tlakových vnitřních pnutí při ohřevu a tahových vnitřních pnutí při ochlazení svarového spoje.

Pro svařovací praxi platí pravidlo: Při svařování volně uložených dílů vznikají ve svaru a jeho nejbližším okolí zpravidla velké deformace (smrštění) a malá vnitřní pnutí. Při svařování dílů upnutých např. ve svařovacím přípravku většinou vznikají malé deformace a velká vnitřní pnutí. Vzájemný vztah mezi vnitřním pnutím a deformací v závislosti na upínací síle je patrný z obr. 4.1 [28,29].



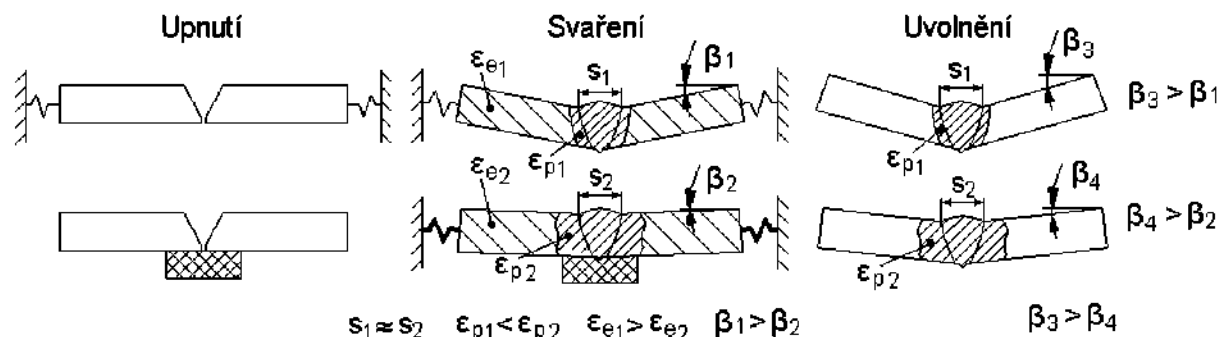
Obr. 4.1 Vztah mezi vnitřním pnutím a deformací při svařování

Vliv rozdílné tuhosti upnutí k_1 a k_2 svařované součásti na vnější deformace β , smrštění s , velikost elastické ϵ_e a plastické ϵ_p poměrné deformace (vnitřní napětí) je patrný z příkladu na obr. 4.2. Je otázkou, zda dát přednost vnitřnímu napětí či deformaci. Obecně platí, že problémy s deformacemi lze očekávat u rozměrnějších konstrukcí o menší svařované tloušťce. Naopak vnitřní napětí a z něho plynoucí poruchy konstrukce jsou nebezpečím při svařování tlustostěnných konstrukcí, vyrobených z oceli o vyšší pevnosti s nízkými plastickými vlastnostmi.



Obr. 4.2 Znáznornění vlivu tuhosti upnutí

Nejenom tuhostí svařovacích přípravků můžeme ovlivnit výsledné vnější deformace, ale také polohou upnutí. Pokud bude upnutí daleko od svarového spoje, budou se moci v materiálu mezi svarovým spojem a místem uchycení vytvářet velké elastické poměrné deformace, které se po uvolnění svařované součásti ze svařovacího přípravku projeví ve formě nežádoucích výsledných deformací. Vliv polohy upnutí svařované součásti na vnější deformace β , smrštění s a velikost elastické ϵ_e a plastické ϵ_p poměrné deformace je patrný z příkladu na obr. 4.3 [22].



Obr. 4.3 Znáznornění vlivu polohy upnutí

4.2. Činitelé ovlivňující vnitřní pnutí a deformace

Určujícími pro vznik vnitřních pnutí a deformací je přívod a odvod tepelné energie do svaru. Velikost vnitřních pnutí a deformací při svařování ovlivňují při vzájemném komplexním působení následující činitelé:

- Metoda svařování, koncentrace tepelné energie v místě svaru a s tím související velikost a tvar tepelného zdroje.

- Parametry svařování, tzn. množství vneseného tepla na jednotku délky svaru. Rozhoduje především svařovací proud a rychlost svařování. Množství vneseného tepla na jednotku délky svaru Q_s , pro svařování elektrickým obloukem technologií WIG uvádí následující vztah (4.4).

$$Q_s = \eta \cdot \frac{U \cdot I}{v_s} \quad (4.4)$$

kde: Q_s – specifické vnesené teplo na jednotku délky svaru [$\text{J} \cdot \text{mm}^{-1}$]

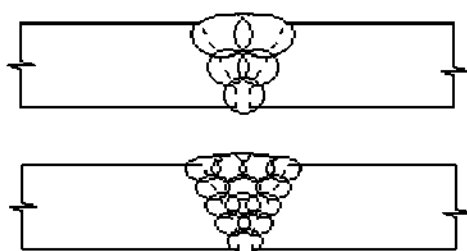
η – účinnost svařovacího procesu [-]

U – svařovací napětí [V]

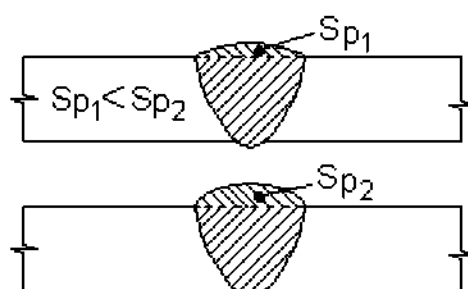
I – svařovací proud [A]

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

- Technologie svařování, např. směr kladení housenek, vystřídání svarů, počet svarových housenek, druh obalu a průměr elektrody. Platí zásada svařovat s co možno největším průměrem přídavného materiálu, nejmenším počtem svarových housenek a nejmenším počtem svarových řad (obr. 4.5). Součet vneseného tepla při svařování velkým počtem svarových housenek je větší než součet při svařování menším počtem velkých svarových housenek. Rovněž je doporučeno svařovat s co nejmenším převýšením svaru jak ukazuje obr. 4.6 [22].



Obr. 4.5 Počet svarových housenek



Obr. 4.6 Převýšení svaru

- Druh základního materiálu a svarového kovu, jejich mechanické a fyzikální vlastnosti a chemické složení. Vliv má především velikost součinitele délkové teplotní roztažnosti α , modulu pružnosti E , součinitel tepelné vodivosti λ a měrného tepla c . Struktura v TOO a její přeměny při ohřevu a ochlazování svarového spoje. Rozpustnost plynů (vodíku) v TOO a ve svarovém kovu v závislosti na teplotě.
- Teplotní režim při svařování, tj. předehřev, interpass teplota a dohřev.
- Druh a režim tepelného zpracování před a po svaření.

- Konstrukční řešení svařované konstrukce, její geometrické rozměry a tuhost. Určujícími jsou např. tloušťka materiálu, druh a velikost svarů, počet svarů a jejich uspořádání v konstrukci.

Uvedení činitelé určují mimo jiné tvar teplotního pole při svařování a šířku teplotního pásma, ve kterém byla překročena teplota potřebná k napěchování. Velikost vnitřních pnutí a deformací závisí na poměru šířky tohoto pásma k celkové šířce svařovaného plechu. Například při plamenovém svařování je pásmo ohřáté nad tuto teplotu širší než při svařování elektrickým obloukem, budou při něm proto větší deformace [18,19,22].

4.3. Rozdělení a velikost vnitřních pnutí a deformací

- **Vnitřní pnutí**

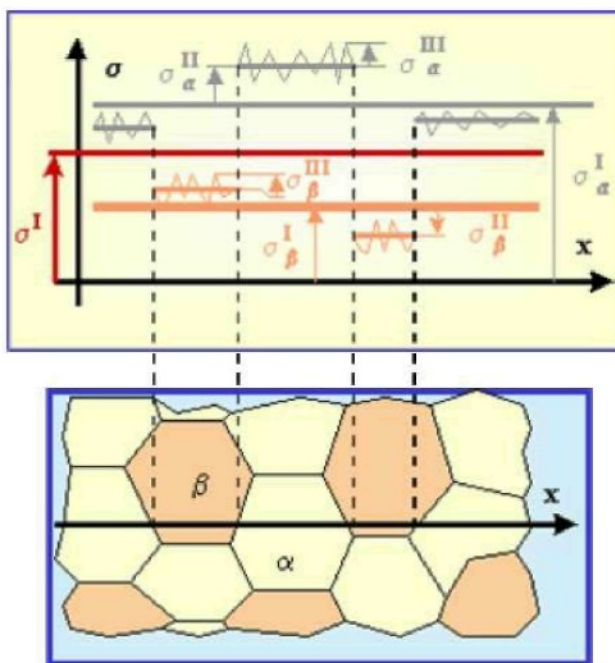
Podle velikosti objemu, ve kterém vnitřní pnutí působí se jak ukazuje obr. 4.7 vnitřní pnutí rozděluje na pnutí:

I. druhu – makroskopické. Působí ve velkých objemech konstrukce a má určitý směr.

Má rozhodující vliv na vznik trhlin a na užitkové vlastnosti svarů.

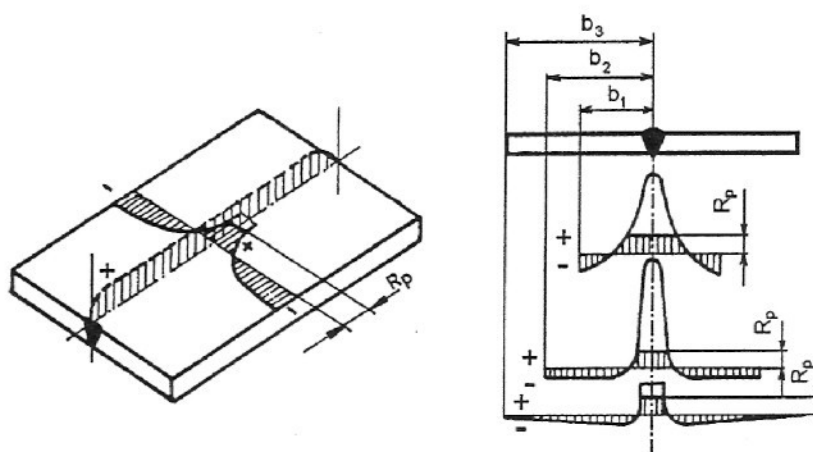
II. druhu – mikroskopické. Působí v zrnech kovů, nezávisí na rozměrech a tvaru konstrukce.

III. druhu – submikroskopické. Působí uvnitř krystalové mřížky. Má vliv pouze na mechanické, fyzikální a chemické vlastnosti kovů.



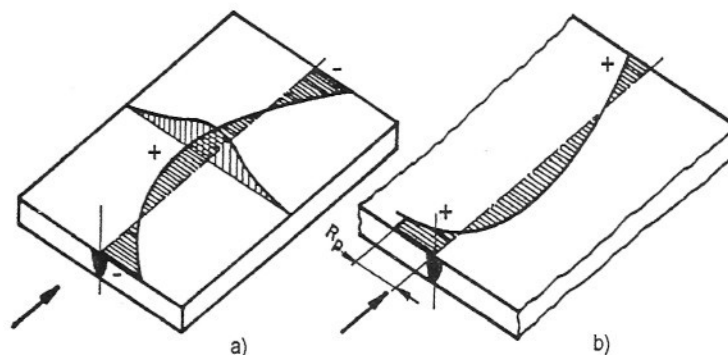
Obr. 4.7 Rozdělení napětí (napětí I. II. a III. druhu σ_I , σ_{II} , σ_{III})

Podle směru působení vzhledem k ose svaru se vnitřní pnutí rozděluje na podélné, příčné a pnutí ve směru tloušťky. Na obr. 4.8 je znázorněn průběh podélných zbytkových napětí na úrovni povrchu plechu. Je vidět jak se podélné zbytkové napětí mění ve směru od osy svaru k okraji plechu a současně i průběh napětí v ose svaru ve směru délky svaru. Dále můžeme sledovat vliv šířky svařovaných desek na průběh podélných napětí ve směru od osy svaru k okraji desek při konstantním svařovacím režimu. Podélná zbytková napětí se mění i ve směru tloušťky plechu. Maximální velikost dosahují tato napětí obvykle na povrchu desek [19,28].



Obr. 4.8 Průběh podélných zbytkových napětí ve svařené desce

Průběh příčných zbytkových napětí na povrchu plechu a v ose svaru je na obr. (4.9) vyznačen křivkami ležícími v rovině povrchu plechu. Ve svislé poloze je naznačen průběh změn příčného zbytkového napětí směrem k okrajům plechu. Průběh a velikost příčných zbytkových napětí při konstantním svařovacím režimu výrazně závisí na počtu a způsobu kladení svarových housenek nebo vrstev. Průběh podle obr. 4.9a se vyskytuje v případech užití vyšších parametrů svařovacího procesu, resp. při užití užších desek a bez upnutí. Na obr. 4.9b je průběh při nižších parametrech svařování, resp. u desek větší šířky a upnutých [13].



Obr. 4.9 Průběh příčných zbytkových napětí ve svařené desce

Příčinou vzniku vnitřních pnutí při svařování je zabránění tepelným dilatacím. V praxi k tomu dochází buď „vnějším“ upnutím, kdy je vnější silou zabráněno smršťování dílů, např. pomocí přípravku. V tomto případě se hovoří o tzv. reakčním vnějším upnutí, které lze omezit volným uložením dílů při svařování. Nebo je upnutí „vnitřní“, způsobené tuhostí svařovaných dílů nebo svařených podskupin. Vyskytuje se např. při svařování volně uložených tlustých plechů. Znamená to, že i volně uložené plechy nejsou po svaření zcela bez vnitřních pnutí. Vnitřní pnutí při svařování mohou v případě dvojosé napjatosti dosáhnout až hodnotu 1,15 Re. Obecně jsou nejvyšší v povrchových vrstvách svarových spojů, kde převládá dvouosý stav napjatosti v tahu [16,28].

- **Deformace**

Deformace po svařování lze posuzovat a třídit podle různých hledisek. Prakticky se jedná o různé projevy smrštění. Pro praktickou potřebu se deformace dělí podle doby jejich trvání a podle jejich působení k osám svaru.

Rozdělení deformací podle doby jejich trvání:

Deformace elastické. Trvají jen po dobu působení napětí v oblasti Hookova zákona.

Deformace plastické. Zůstávají i po odstranění síly, která je způsobila.

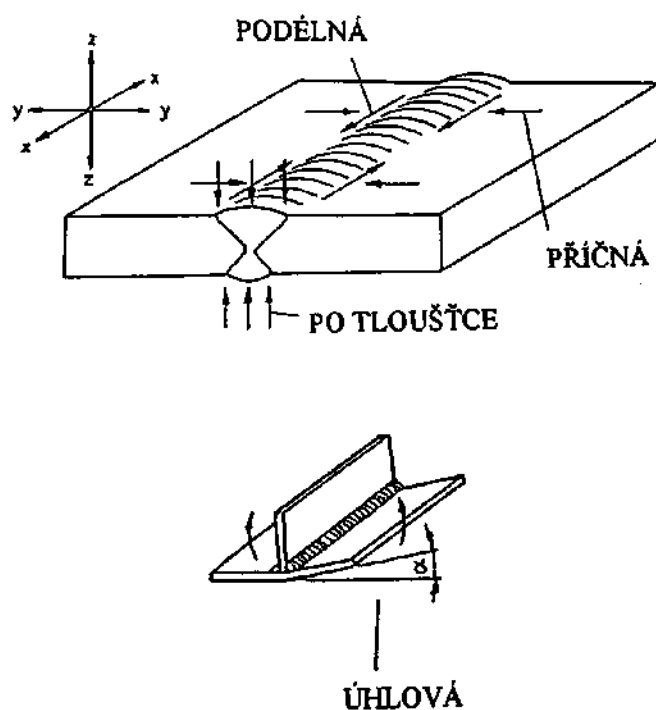
Rozdělení deformací vzhledem k osám svaru:

Deformace podélné. Nastávají ve směru podélné osy svaru. Jde o podélné smrštění svařených desek (viz. obr. 4.10).

Deformace příčné. Nastávají příčně k podélné ose svaru. Jde o příčné smrštění svařených desek (viz. obr. 4.10).

Deformace úhlové jsou výsledkem příčného smrštění (viz. obr. 4.10).

Deformace ve směru tloušťky plechu. Především u plechů větších tloušťek (viz. obr. 4.10).



Obr. 4.10 Rozdělení deformací

Velikost deformací je možno orientačně za zjednodušujících předpokladů (neuvažuje se např. tuhost konstrukce) vypočítat pomocí empirických vztahů. Ve svarku mohou uvedené deformace působit současně [13,30].

4.4. Možnosti snižování vnitřních pnutí a deformací

Možnosti ke zmenšování velikosti vnitřních pnutí a deformací jsou ve všech etapách vzniku svarku, tj. v etapě předvýrobní (konstruktér, technolog), v etapě výrobní (svářeč) a v etapě po svaření (rovnání, mechanické zpracování svarků, žihání ke snížení pnutí). Ve svářečské praxi je tedy nutno současně využít všech nabízených možností a minimalizovat vnitřní pnutí a deformace.

Konstruktér má zásadní vliv na velikost vnitřních napětí a deformací. Jejich snižování se dosahuje dodržováním osvědčených pravidel, jako např. používat zaručeně svařitelný materiál a jeho co nejmenší možnou tloušťku. Volit optimální počet, tvar a velikost svarů. Svary umísťovat do neutrální osy svarku, nehromadit a nekřížit svary. Správně zvolit přídavný materiál z hlediska jeho součinitele délkové teplotní roztažnosti a mechanických vlastností. Dále by se měl vyvarovat přílišné tuhosti konstrukčních uzlů, které nedovolí ani

malé deformace a předpisovat tolerance přiměřené použité technologii svařování. Tyto zásady uvádí i Novotný [29].

Technolog rozhoduje o množství vneseného tepla a gradientech teplot při svařování. Menší vnitřní pnutí a deformace budou při metodách svařování s vysokou koncentrací energie. Parametry svařování je nutno volit takové, aby měrné svařovací teplo bylo co nejmenší (používat vyšší svařovací rychlost a menší proud). Postupy svařování by měly být takové, aby bylo v průběhu svařování co nejdéle možné rovnat svařené podskupiny. Používat stehování svarů tak, aby délka stehů byla cca 20 až 40 mm a rozteč stehů 25-ti násobek svařované tloušťky. Je tedy nutné přizpůsobit technologický postup všem známým vstupním předpokladům, především tomu jaký materiál bude svařován a jakou technologií.

Svářeč zajistí nejmenší vnitřní pnutí a deformace především tím, že bude dodržovat předepsaný technologický postup a parametry svařování. Velikost vnitřních pnutí a deformací výrazně ovlivňuje i sled kladení housenek. Při svařování jedním sledem jsou obecně velké deformace, ale malá vnitřní pnutí. Při svařování střídavým krokem jsou střední deformace a střední vnitřní pnutí. Při svařování vratným krokem jsou malé deformace a střední vnitřní pnutí. Při svařování střídavě vratným krokem jsou velmi malé deformace, ale velká vnitřní pnutí. Výše uvedené platí pro ruční způsoby svařování. Jiná situace nastane tehdy, použijeme-li svařovacího robota s předem nastavenou drahou a rychlostí svařování. Tím můžeme zajistit menší vnitřní pnutí a deformace a vyloučit tak vliv lidského faktoru [28,30].

4.5. Jednotlivé způsoby snižování vnitřních pnutí a deformací

Prokování jednotlivých vrstev svaru snižuje místní vnitřní pnutí ve svaru. Používá se zejména při opravách a to u jednovrstvých i vícevrstvých svarů, kdy se nebude provádět žihání ke snížení pnutí. Prokováním dochází k plastické deformaci housenky nebo vrstvy housenek a tím dochází ke snižování tahových pnutí nebo ke vzniku tlakových vnitřních pnutí. Před prokováním se musí odstranit struska a nerovnosti přebroušením povrchu. Prokováním přechodu svarového kovu do základního materiálu se vytvoří plasticky deformovaná vrstva a tlakové vnitřní pnutí zvýší únavovou pevnost svarového spoje. Při prokování krycí vrstvy svaru může dojít k jejímu nežádoucímu zpevnění, případně až ke vzniku povrchových trhlin ve svaru. To má za následek zvýšení náchylnosti ke stárnutí. Proto prokování svarů vyžaduje zkušenosti.

Mechanické rovnání je obvykle pracné a může při něm dojít k poškození povrchu. Dochází při něm ke změnám tvaru, tj. k plastickým deformacím ve svarku a ke změně stavu vnitřního pnutí. Napětové špičky se sníží, vnitřní pnutí se přerozdělí a vyrovná v celém objemu svarku. Při mechanickém rovnání je třeba zabránit vzniku trhlin, vrypů a vrubů v místě rovnání.

Rovnáni plamenem se provádí rychlým místním ohřevem kysliko-acetylenovým plamenem. Při ohřevu dojde k místnímu napěchování materiálu a k jeho zkrácení při ochlazování. Vzniklá tahová pnutí způsobí požadované vyrovnání deformovaného místa. Ochlazování se provádí např. proudem stlačeného vzduchu nebo vodní sprchou. Rovnáni plamenem je rychlé, avšak vyžaduje velké zkušenosti a manuální zručnost.

Snížování vnitřních pnutí mechanickým způsobem se v omezené míře se provádí pomocí zatěžování ohybem, tahem nebo přetlakem (potrubí, nádoby) těsně nad mez kluzu. V poslední době se provádí vibrační zpracování svarků. Při tomto způsobu se pomocí vibračního zařízení (přenosný vibrátor) ve svarku vybudí kmitání až 200 Hz. Za určitou krátkou dobu kmitání se dosáhne rezonance mezi kmitočtem vibrátoru a svarku. Po výdrži 0,5-5 min. (podle materiálu, hmotnosti svarku a použité frekvence kmitů) se zvýší frekvence vibrátoru s provede se další vibrování svarku. Je nutné použít alespoň tři rezonanční frekvence. Přetvárná síla kmitání vyvolá v místech napětových špiček místní plastickou deformaci, čímž dojde k přerozdělení vnitřních pnutí ve svarku a jejich celkovému snížení a k dosažení rozměrové stability.

Žihání ke snížení pnutí svarků používáme teplot, které způsobí pokles meze kluzu materiálu. Vnitřní pnutí se uvolňují plastickou deformací. Deformace vzniklé svařováním se žiháním ke snížení pnutí neodstraní, spíše naopak. Mohou vzniknout nové deformace, není-li při žihání a při ochlazování zajištěno rovnoměrné rozložení teploty v celém svarku. Žihání je časově a energeticky náročné, a proto se má volit jen v technicky zdůvodněných případech. Provádí se nejčastěji v peci, ale lze ho provést i místně (svary potrubí) pomocí topných pásů. Šířka b ohřátého pásma na každou stranu od osy svaru má přitom být viz. vztah (4.11) Účelem žihání ke snížení pnutí je snížit hladinu vnitřního pnutí ve svarku, zvýšit rozměrovou stabilitu při opracování, snížit obsah vodíku ve svarovém spoji a zlepšit plastické vlastnosti [28,29,30].

$$b = 2 \cdot \sqrt{R \cdot h} \quad (\text{mm}) \quad (4.11)$$

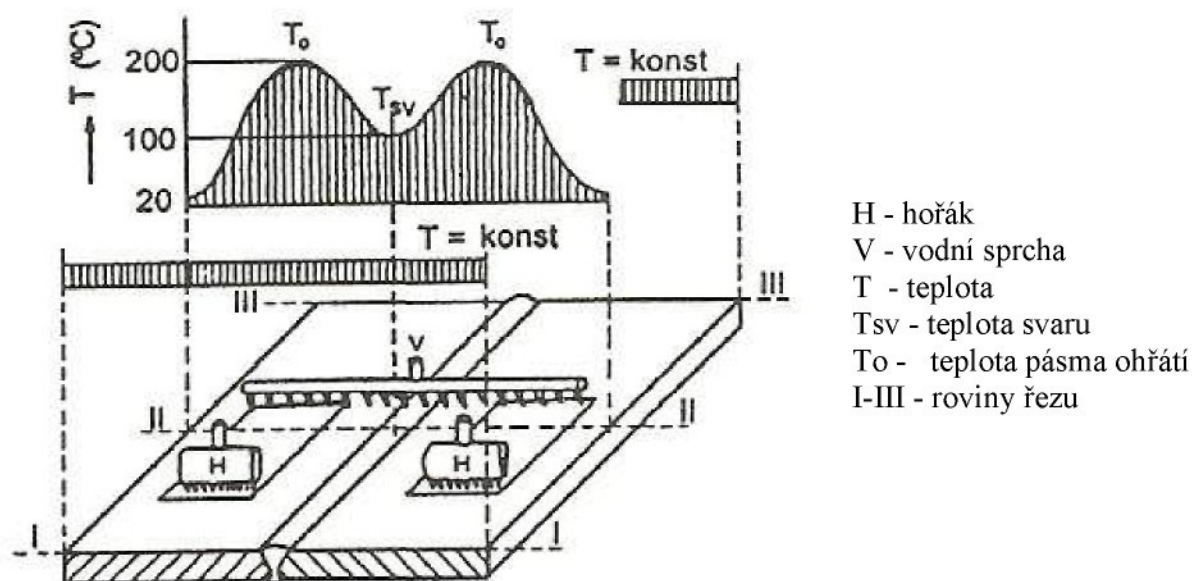
kde:

R.....střední poloměr např. potrubí (mm)

h.....tloušťka stěny (mm)

Následující další možné způsoby jak příznivě ovlivnit výsledné vnější deformace součásti po svaření jsou již méně používané většinou proto, že vyžadují velké znalosti a zkušenosti pro jejich efektivní použití.

Snížení pnutí za nízké teploty probíhá krátkodobým ohřevem ve dvou pruzích na obou stranách svaru svařovacím hořákem na teploty do 200°C vznikne nový systém vnitřního pnutí, který se superponuje s původními pnutími a způsobí ve svarovém pásmu plastické deformace. Tím nastane zmenšení vnitřních pnutí. Bezprostředně následujícím ochlazením zanikne teplotní pole, odstraní se opět oblast pnutí vzniklá ohřátím a vzniknou smršťující síly, které způsobí elastické odpružení svaru (obr. 4.12). Předpokladem pro tento způsob jsou jasné konstrukční poměry, znalost průběhu pnutí a přesná evidence regulace tepla. Tento způsob se používá hlavně u tupých svarů při stavbě kotlů a je omezen na plech tloušťky do 40 mm. Odstranění pnutí je splněno za předpokladu, že platí vztah (4.13) [16].



Obr. 4.12 Snížení pnutí ohřevem ve dvou pruzích a následným ochlazením

$$\Delta t = Re / \beta \cdot E \quad (^\circ\text{C}) \quad (4.13)$$

kde:

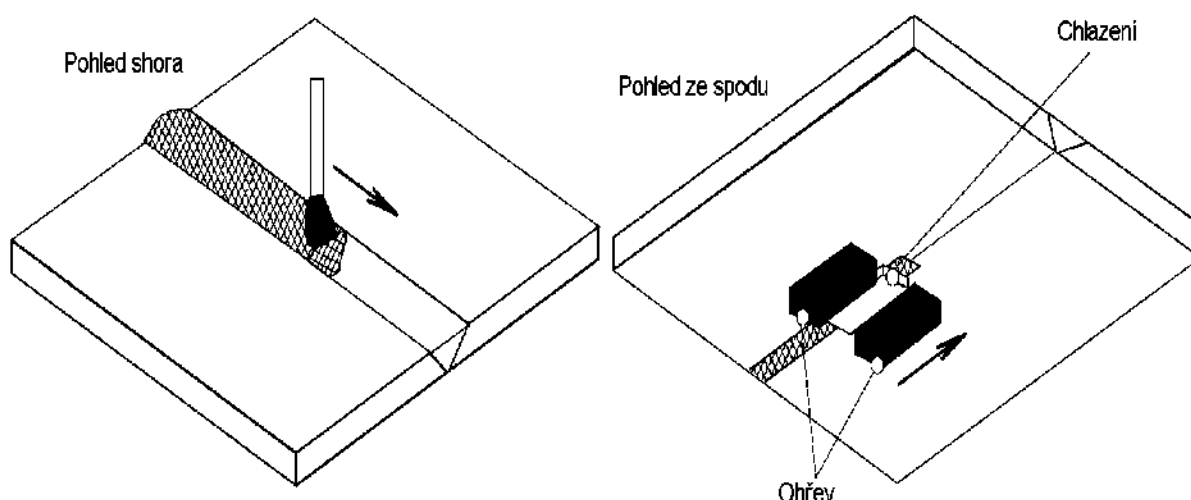
Re.....mez kluzu materiálu (MPa)

βsoučinitel lineární tepelné roztažnosti (K^{-1})

E.....modul pružnosti (MPa)

Použitím speciálních přídavných materiálů transformujících při nízkých teplotách dosáhneme příznivějších výsledných deformací po svaření. Dále lze snížit vnější deformace použitím jako přídavného materiálu trubičkového drátu, který při svařování vyniká schopností svařovat bez zbytečného převýšení svaru. Tím je redukováno množství vneseného tepla během procesu svařování.

Ovlivnění teplotního pole při svařování přídavným ochlazováním příp. ohřevem můžeme snížit velikost teplotních gradientů a tím i deformačních změn. Konstrukční provedení pro správný ohřev a ochlazení (resp. dosažení optimálního rozložení teplot při svařování a tím snížení výsledných deformací) a nutné vysoké teoretické znalosti problematiky znamenají vyšší náklady. Příklad ovlivnění teplotního pole přídavným ohřevem a chlazením pro snížení vnitřních pnutí či úhlových deformací je vidět na obr. (4.14) [22,30].



Obr. 4.14 Příklad ovlivnění tepelného pole přídavným ohřevem a chlazením pro snížení úhlových deformací

Snížováním vnitřních pnutí pomocí předehřevu se zabývá kapitola 5.



4.6. Metody experimentálního zjišťování zbytkových napětí

Hlediska kvalifikace metod experimentálního zjišťování zbytkových napětí jsou:

1. Podle toho, do jaké míry bude narušena celistvost vyšetřovaného tělesa

Destruktivní – dojde k úplnému znehodnocení tělesa.

Polodestruktivní (semidestruktivní) – dojde pouze k částečnému znehodnocení tělesa, které nemá vliv na jeho funkci a spolehlivost, případně lze toto znehodnocení odstranit (vybrousit, popř. zavařit a vybrousit). Do této skupiny patří často používaná odvrtávací metoda.

Nedestruktivní – nedochází k jakémukoliv poškození či znehodnocení zkoumaného tělesa. Typickým představitelem je např. metoda rentgenové difrakce.

2. Podle principu metody

Mechanické metody – patří do kategorie destruktivních nebo polodestruktivních metod, kdy dochází mechanickým zásahem k porušení původní rovnováhy zbytkových napětí a k jejich částečnému uvolnění. Lze jimi určit pouze makroskopická zbytková napětí. Obecně se jejich provedení skládá ze tří kroků:

- Odstranění části materiálu tělesa nebo jeho rozdělení na více částí čímž dojde k vytvoření nového stavu zbytkové napjatosti.
- Změří se deformace nebo délková přetvoření (nejčastěji odporovými tenzometry) odpovídající této změně napjatosti.
- Vyhodnotí se velikosti a směry hlavních zbytkových napětí (na základě analytických metod, metodou konečných prvků nebo experimentálně – kalibrace).

Lze sem zařadit celou řadu metod lišících se svou vhodností pro určování zbytkových napětí v tělesech různých tvarů. Mezi nejvýznamnější patří:

- Odvrtávací metoda (vyvrtání otvoru).
- Metoda uvolnění sloupku (vyfrézováním prstence dojde k uvolnění jádra ve tvaru sloupku).
- Metody odstraňování povrchové vrstvy materiálu.
- Dělicí metody.

Fyzikální metody – patří do kategorie nedestruktivních metod; jsou založeny na vztahu mezi fyzikálními nebo krystalografickými parametry a zbytkovým napětím. Patří sem především:

- Difrakční metody (rentgenová difrakce, neutronová difrakce) – jsou založeny na měření mřížkových deformací polykrystalických materiálů. Jsou schopny detekovat

zbytková napětí všech tří druhů (tj. σ_I , σ_{II} , σ_{III}), přičemž metoda rentgenové difrakce pouze na povrchu, zatímco neutronová difrakce v objemu tělesa.

- Ultrazvukové metody – jsou založeny na změně rychlosti šíření ultrazvukových vln tělesem v závislosti na jeho napjatosti. Jsou citlivé na všechny tři druhy zbytkových napětí, nedokáží mezi nimi však rozlišovat.
- Magnetické metody (metody využívající Barkhausenova šumu) – jsou použitelné pouze pro feromagnetické materiály. Jsou citlivé na všechny tři druhy zbytkových napětí. Jelikož pro experimentální vyhodnocení byla použita právě magnetoelastická metoda, věnuje se jí detailněji další část [30].

Chemické metody – využívají změn vyvolaných chemickými procesy jako jsou

- Koroze pod napětím.
- Difúze vodíku do povrchové vrstvy.

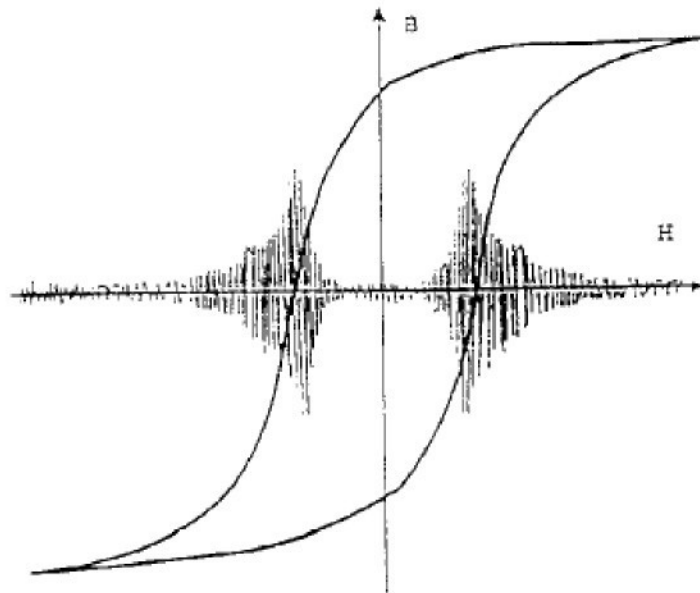
3. Podle charakteru napjatosti

- Na povrchu tělesa – jednoosá nebo dvouosá napjatost (rovinná).
- V jistém objemu tělesa – trojosá napjatost (prostorová).

4.7. **Magnetoelastická metoda**

Magnetoelastická metoda je založena na následujícím principu. Feromagnetické materiály jsou složeny z malých magnetických oblastí podobných tyčovým magnetům, které se nazývají domény. Každá doména se magnetizuje podél některých krystalograficky význačných směrů. Domény jsou přitom navzájem odděleny hranicemi, kterým se říká doménové stěny. Vnější magnetické pole přitom způsobuje pohyb doménových stěn. Aby se doménová stěna mohla pohnout, doména na jedné straně stěny se musí zvětšit a doména na druhé straně se smrští. Výsledkem je pak změna v celkové magnetizaci vzorku. Je-li cívka z vodivého drátu umístěna v blízkosti vzorku v době, kdy se doménová stěna pohybuje, související změna magnetizace vzorku indukuje v cínce elektrický puls.

První elektrické sledování pohybu doménových stěn provedl profesor Barkhausen v roce 1919. Dokázal, že magnetizační proces, který je charakterizován hysterezní smyčkou, ve skutečnosti není spojitý, nýbrž je tvořen malými skoky, vzniklými pohybem magnetických domén v důsledku vnějšího magnetického pole. Jsou-li pulsy vznikající pohybem domén spojeny, vznikne typický signál, který se nazývá Barkhausenův šum (obr. 4.15).



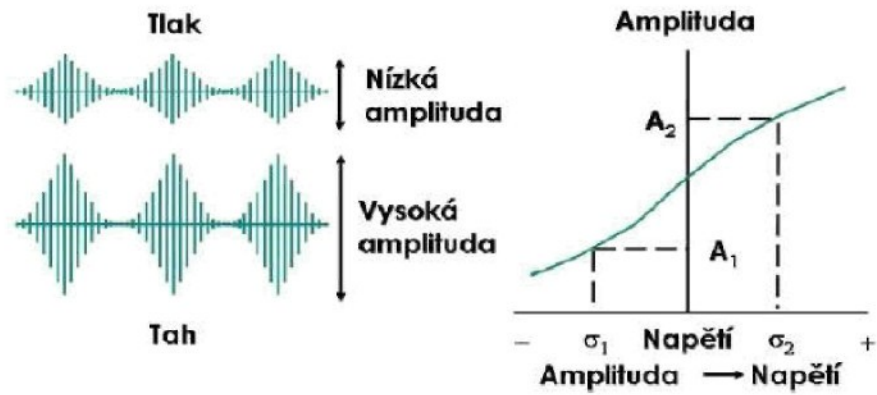
Obr. 4.15 Typický signál Barkhausenova šumu

Barkhausenův šum má pro většinu materiálů frekvenční spektrum začínající na magnetizační frekvenci a končící přibližně na 250 kHz. Signál je exponenciálně tlumen v závislosti na vzdálenosti, kterou projde uvnitř materiálu. Primární příčinou tlumení jsou vířivé proudy indukované při šíření signálu vznikajícího pohybem domén. Útlum určuje hloubku, ze které lze ještě informaci získat (měřicí hloubku).

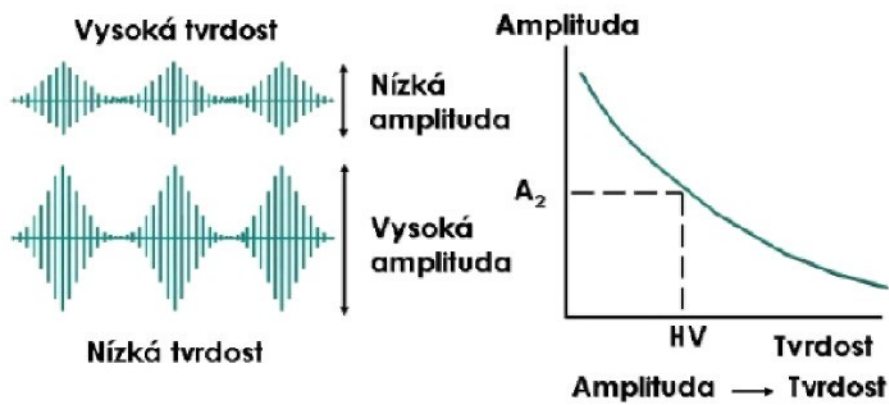
Hlavní faktory, které ovlivňují tuto hloubku jsou:

- Frekvenční rozsah generovaného signálu.
- Vodivost a permeabilita zkoušeného materiálu.

Při běžných aplikacích se měřicí hloubka pohybuje mezi 0,01 a 1,5 mm. Na intenzitu signálu Barkhausenova šumu mají vliv dva významné materiálové parametry. Jedním je přítomnost a rozložení pružných napětí, která ovlivňují cestu, po které se domény ubírají směrem ke snadné orientaci ve směru magnetizace. Tento jev, kdy elastické vlastnosti ovlivňují doménovou strukturu a magnetické vlastnosti, se nazývá magnetoelastická interakce. V důsledku magnetoelastické interakce u materiálů s pozitivní magnetostrikcí (železo, většina ocelí, kobalt) tlakové napětí snižuje intenzitu Barkhausenova šumu, zatímco tahové napětí ji zvyšuje (viz. obr. 4.16 a 4.17). Tuto skutečnost lze využít k tomu, že měření intenzity Barkhausenova šumu použijeme ke stanovení zbytkového napětí. Z měření lze určit i směr základních napětí [35].



Obr. 4.16 Vliv Barkhausenova šumu v závislosti na napětí



Obr. 4.17 Vliv Barkhausenova šumu v závislosti na tvrdosti

5 Předehřev při svařování

Předehřevem při svařování lze podstatně přispět ke zvýšení kvality svarového spoje. Pomocí něho je možné snížit tepelný spád (gradient), zmenšit náchylnost ke vzniku strukturních fází zákalného charakteru (martenzit) a snížit hladinu vnitřních pnutí. Předehřevem se řídí rychlost ochlazování svarového spoje v TOO a tím i výsledná struktura ve sledovaném místě. Výše teploty předehřevu je limitována teplotou interpassu (mezihousenkovou teplotou), která by měla zabránit nadměrnému zhrubnutí zrna v TOO.

5.1. Stanovení teploty předehřevu

V současné době se při stanovení teploty předehřevu postupuje podle normy ČSN EN 1011, která uvádí doporučení pro svařování kovových materiálů a popisuje způsoby stanovení teploty předehřevu pro jednotlivé skupiny ocelí. Při svařování feritických ocelí se při stanovení teploty předehřevu vychází jednak z vlivu chemického složení reprezentovaného činitelem T_{pCET} (5.1), jednak z činitele zahrnujícího tloušťku materiálu T_{pd} (5.2), činitele obsahujícího vliv vodíku T_{pHD} (5.3) a činitele stanovujícího vliv tepelného příkonu T_{pQ} (5.4). Výsledná teplota předehřevu zahrnující souhrnný vliv výše uvedených faktorů se určí podle vztahu (5.5). Jinak je tomu u vysokolegovaných ocelí, kdy se teplota předehřevu určuje nejenom podle chemického složení, ale také v závislosti na přítomnosti jednotlivých fází v základní kovové matici. Zohledňován je také vliv tloušťky materiálu a tuhosti upnutí. Pro výpočet teploty předehřevu lze rovněž využít starších vztahů, které jsou podle jednotlivých autorů určeny pro specifickou skupinu ocelí, respektive pro jejich chemické složení. Jde například o výpočet dle Séferiána (5.6), nebo jiný způsob výpočtu podle Ita a Bessya (5.7) [32].

$$T_{pCET} = 750 \cdot CET - 150 \quad (5.1)$$

$$CET = C + (Mn + Mo) / 10 + (Cr + Cu) / 20 + Ni / 40$$

CET – uhlíkový ekvivalent

$$T_{pd} = 160 \cdot \tanh(d / 35) - 110 \quad (5.2)$$

d – tloušťka plechu v mm

$$T_{pHD} = 62 \cdot HD^{0,35} - 100 \quad (5.3)$$



HD – obsah difúzního vodíku (ml / 100g)

$$T_{pQ} = (53 \cdot CET - 32) \cdot Q - 53 \cdot CET + 32 \quad (5.4)$$

Q – tepelný příkon (kJ / mm)

$$T_p = T_{pCET} + T_{pd} + T_{pHD} + T_{pQ} \quad (5.5)$$

T_p – teplota předehřevu (°C)

Výpočet dle Séferiána:

$$T_p = 350 \cdot C_p - 0,25 \quad (5.6)$$

$$C_p = C_c + C_s$$

$$C_c = 360C + 40(Mn + Cr) + 20Ni + 28Mo / 360$$

$$C_s = 0,005 \cdot s \cdot C_c$$

T_p – teplota předehřevu (°C)

s – tloušťka plechu v mm

Tento způsob výpočtu předehřevu je vhodný pro uhlíkové a nízkolegované, zejména žárovebné konstrukční oceli s obsahem C > 0,10 hm. %.

Výpočet podle metody Ita a Bessya:

$$T_p = 1440 \cdot P_w - 392 \quad (5.7)$$

$$P_w = P_{CM} + H/60 + K/40000$$

$$P_{CM} = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Cr/20 + Ni/60 + Mo/15 + V/10 + 5B$$

$$K = K_0 \cdot s$$

H – obsah difuzního vodíku, stanovený glycerinovou zkouškou (ml/100g)

K – intenzita tuhosti spoje

K_0 – koeficient, pro tupý spoj $K_0 = 69$ (příp.66)

s – tloušťka plechu v mm

T_p – teplota předehřevu (°C)

Tento způsob výpočtu teploty předehřevu je vhodný např. pro mikrolegované oceli.

Další možností je nahlédnutí do diagramu anizotermického rozpadu austenitu. Lze ale také využít katalogu přídavných materiálů, případně materiálových listů či strojnických tabulek.

Pro zkoumaný materiál jímž je aluminid železa nejsou v současné době k dispozici žádné vztahy, normy ani diagramy podle nichž by se dala teplota předehřevu stanovit. Z těchto důvodů je třeba nalézt optimální teplotu předehřevu jiným způsobem, v našem případě na základě simulačních výpočtů a experimentálních zkoušek [13,30].

5.2. Měření teploty předehřevu

Teplotu předehřevu je možné měřit pomocí termočlánků, termokříd, pyrometrů, termovize apod. Směrnici pro měření teploty předehřevu udává norma ČSN EN ISO 13916. Tato norma specifikuje požadavky na měření teploty předehřevu, interpass teploty a teploty ohřevu pro tavné svařování. Může být rovněž použita pro ostatní způsoby svařování.

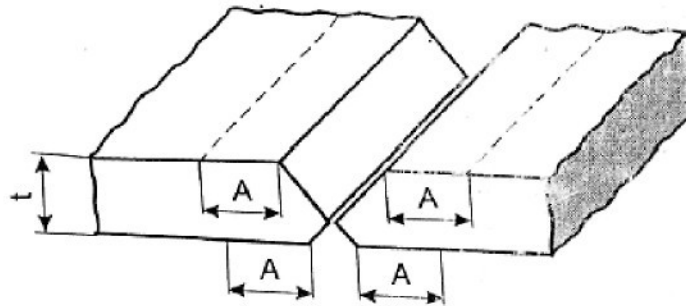
Teplota předehřevu - T_p (preheating temperature): teplota součásti v oblasti svaru bezprostředně před jakoukoli svařovací operací, obvykle se rovná minimu teploty interpass.

Teplota interpass - T_r (interpass temperature): teplota vícevrstvého svaru a přiléhajícího základního materiálu bezprostředně před aplikací další housenky; obvykle se uvádí jako maximální teplota.

Teplota ohřevu - T_n (preheat maintenance temperature): minimální teplota v oblasti svaru, která musí být udržována v případě přerušení svařování.

Měření teploty se obvykle provádí na povrchu svařované součásti ze strany svářeče ve vzdálenosti $A = 4 \times t$, ne však více než 50 mm od podélné hrany svarové plochy (viz. obr. 5.8). To platí pro svařené díly o tloušťce t , nepřesahující 50 mm v místě svaru. Jestliže tloušťka přesahuje 50 mm, požadované teploty musí být dosaženo v základním materiálu ve vzdálenosti minimálně 75 mm od svarové plochy v kterémkoli směru. Prakticky musí být teplota měřena na opačné straně, než která je ohřívána. Teplota musí být ustálena na ohřívané straně po odstranění tepelného zdroje, v relaci k tloušťce základního materiálu, aby došlo k vyrovnaní teploty. Kde jsou použity permanentní ohřivače a není přístup k měření teploty z opačné strany, musí být měření provedeno na ohřívaném povrchu základního materiálu bezprostředně vedle svarové plochy. Čas potřebný k vyrovnaní teploty je 2 min na každých 25 mm tloušťky základního materiálu.

Teplota interpass musí být měřena na svarovém kovu nebo na bezprostředně sousedícím základním materiálu.



Obr. 5.8 Vzdálenost měřících bodů pro tupý spoj

Teplota předehřevu musí být měřena v oblasti svaru bezprostředně před průchodem oblouku. Je-li specifikována teplota ohřevu, musí být tato měřena v průběhu přerušení svařování [39].

Zařízení používané pro měření teploty musí být specifikováno ve WPS (technologický postup svařování), např.

- Materiály citlivé na teplotu (např. tužky nebo laky) (TS).
- Kontaktní (dotykový) teploměr (CT).
- Termočlánky (TE).
- Optická nebo elektrická zařízení pro bezdotykové měření (TB).

5.3. Zařízení používaná pro předehřev

K předehřátí materiálu můžeme využít jednak pece, plynová hořáky a v poslední době rozvíjející se topné prvky (topné desky). Pomocí topných desek můžeme zajistit různé teploty předehřevu v jednotlivých místech svařované součásti, což je velikou výhodou např. proti pecím kdy je materiál ohříván na jednu teplotu v celém objemu. Další výhodou je možnost svařovat přímo na topné desce, která pomocí regulačního mechanismu udržuje zvolenou a nastavenou teplotu předehřevu.

6. Simulace v programu Sysweld

Program SYSWELD francouzské společnosti ESI Group, používaný v této disertační práci patří mezi špičkové simulační programy zabývající se tavným svařováním. Jde o náročný program jak z hlediska uživatelského, tak i z hlediska finančního. Ke konci roku 2008 bylo v České republice pouze pět instalací tohoto programu, z toho tři jsou využívány ke komerčním účelům a zbylé dva jsou instalovány na technických univerzitách.

SYSWELD je simulační program pracující na základě metody konečných prvků (MKP). Tento přístup vznikl z důvodu požadavku velké tvarové variability a potřeby řešit i jednotlivé podskupiny prostorového modelu samostatně. Proto je zde možné, na rozdíl od metody konečných diferencí (MKD), použít libovolný tvar jednotlivých elementů. Z matematického hlediska je metoda konečných prvků (MKP) používána pro nalezení aproximovaného řešení parciálních diferenciálních i integrálních rovnic, například rovnice vedení tepla.

Vlastní program je rozdělen do několika samostatných modulů, které mezi sebou vzájemně spolupracují. Prvním z nich je modul pro vytváření simulačních modelů nazvaný **Geom./Mesh**. Lze v něm vytvořit 2D a 3D modely a definovat trajektorie pohybu zdroje tepla pro svařování i pro pomocné přehřevy.

Druhým modulem je modul nazvaný **SYSWELD/Generic**. Tento modul umožňuje definovat veškeré teplotně-metalurgické děje vznikající při ohřevu a chladnutí materiálu. Jde v podstatě o nadefinování a odlazení ARA a IRA diagramů a v závislosti na nich o výpočet množství a rozložení jednotlivých fází.

Modul **H.T. Advisor** (Heat Treatment Advisor) se pak zabývá sdílením tepla v modelu a to především vedením tepla v základním materiálu a sáláním tepla do okolí. Sdílení tepla prouděním vznikající ve svarové lázni se většinou nezahrnuje z důvodu přílišné složitosti, ale i proto, že se významněji projevuje až od rychlosti 1 m/min [21] a lze jej eliminovat úpravou tvaru tepelného zdroje.

Dalším z modulů je **Welding Advisor**, umožňující definovat zdroj tepla a jeho trajektorii. Načíst prostorový model vytvořený v modulu Geom./Mesh, přiřadit mu materiál z materiálové databáze, způsoby sdílení tepla z modulu H.T. Advisor a provést výpočet teplotní i mechanické analýzy.

Posledním z modulů je **Assembly Advisor** pracující s vypočítanými daty z modulu Welding Advisor. Je zde uplatňován tzv. „Lokálně-globální přístup“ spočívající v transformaci jednotlivých dílčích (lokálních) svarů získaných ve Welding Advisoru i se všemi informacemi o vnitřních napjatostech a o deformacích do celkového (globálního)

modelu ocelové konstrukce. Tímto způsobem se výpočet zjednoduší a několikanásobně zkrátí [34].

Základním úkolem všech simulačních výpočtů je, aby obdržený výsledek plně vystihoval reálný stav simulovaného děje, popřípadě se mu blížil. Přes tuto snahu jsme nuceni při simulacích respektovat řadu omezujících předpokladů, které snižují přesnost, aby bylo vůbec možno úlohu definovat a matematicky popsat. Výsledná přesnost potom závisí na kvalitě vstupních dat, jimž je třeba věnovat zvýšenou pozornost. Numerické analýzy svařovacích procesů jsou velmi náročné na množství a kvalitu takovýchto vstupních dat [12,21].

Vstupní data pro simulace ve svařování lze rozdělit do tří základních oblastí:

1. *Materiálová vstupní data.*
2. *Definice a popis tvaru tepelného zdroje.*
3. *Vytvoření prostorového modelu.*

6.1. Materiálová vstupní data

Výsledná přesnost provedených numerických analýz velmi často odráží kvalitu vstupních materiálových charakteristik. Ve většině případů se jedná o kombinaci hodnot nalezených v literatuře doplněných měření na zkušebních vzorcích. Obecně lze však konstatovat, že materiálové parametry pro teplotní analýzy se hledají sice obtížně, nicméně je lze v dostupné literatuře nalézt. Zde rovněž figuruje aspekt, že materiálové vlastnosti pro teplotní analýzu nevykazují až tak významné rozdíly pro různé typy materiálu (samozřejmě ve stejné kategorii materiálu, např.: nerezavějící oceli, nízkolegované konstrukční oceli, hliníkové slitiny atd.), což o materiálových hodnotách používaných v mechanické strukturní analýze nelze tvrdit. V této oblasti lze pozorovat rozdíly mechanických materiálových hodnot, v rámci jedné skupiny materiálu, které výrazně ovlivňují kvalitu vypočtených výsledků. Hodnoty potřebné během mechanické strukturní analýzy jsou velmi zřídka publikované v dostupné literatuře, což je pochopitelné s ohledem na jejich pracné získávání a cenu zkoušek. Příklad průběhu vstupních dat pro teplotně-metalurgickou analýzu (v našem případě měrného tepla c a součinitel tepelné vodivosti λ) je na obr. 6.1.



Materiálová data lze ještě dále rozdělit na dvě skupiny:

Data pro teplotně-metalurgickou analýzu, kde je třeba získat následující materiálové charakteristiky:

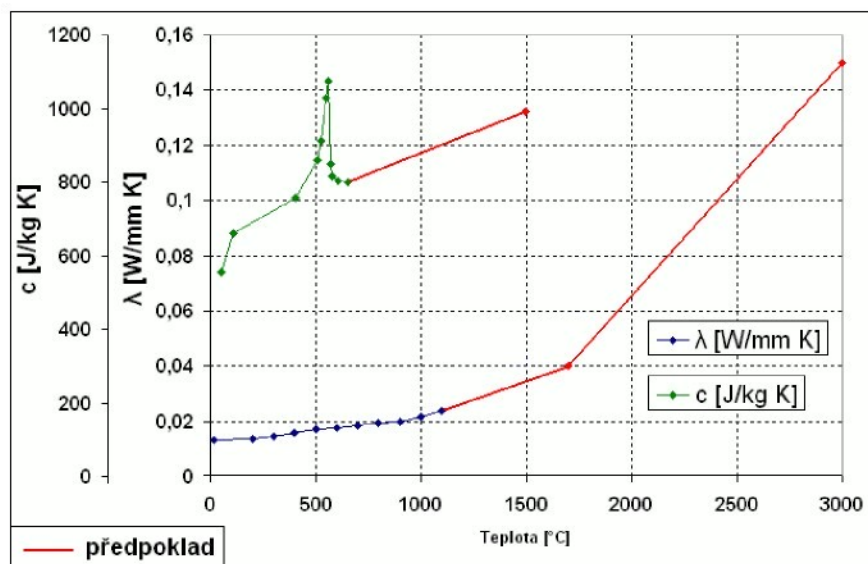
- Chemické složení.
- Diagram anizotermického rozpadu austenitu ARA, který je buď k dispozici, nebo jej lze vypočítat z chemického složení.
- Součinitel tepelné vodivosti λ .
- Měrné teplo c .
- Hustota ρ .
- Koeficient přestupu tepla do okolí β .

Data pro mechanickou analýzu, kde je třeba získat tyto materiálové charakteristiky:

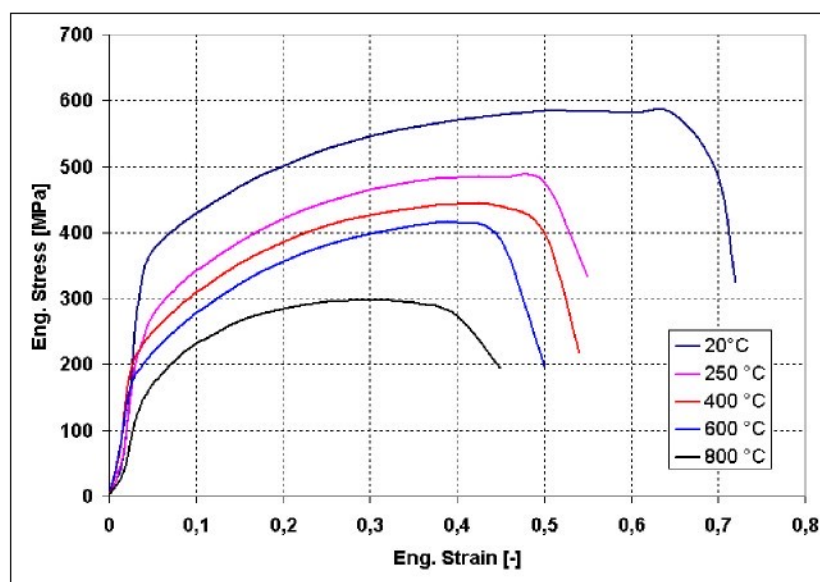
- Poissonovu konstantu μ .
- Youngův modul pružnosti E .
- Koeficient teplotní roztažnosti α .
- Mez kluzu R_e .
- Deformační zpevnění materiálu H .
- Vstupní hodnoty pro viskoplastické chování materiálu.

Největším problémem je získání materiálových vlastností pro řešení deformací a napjatostí. V dostupné literatuře, nebo materiálových atestech většinou bývají pouze materiálové hodnoty pro teploty 20°C, ojediněle maximálně do teploty 350°C a pouze pro základní stav materiálu, nikoliv pro jednotlivé fáze. Rovněž je třeba pro materiály, které vykazují fázové transformace, znát příslušný ARA diagram. V současné době existuje mnoho atlasů s ARA diagramy. Pro numerické simulace je však výhodnější použít takzvané „in situ“ ARA diagramy. Tyto diagramy mají na vodorovné ose uveden čas $t_{800/500}$ udávající charakteristickou rychlost ochlazování a jsou tak vhodnější pro numerické simulace ve svařování. Klasický ARA diagram má na vodorovné ose uveden logaritmus času.

Většina materiálových vlastností se měří do 1000°C, samostatně pro každou materiálovou fázi a získává se především z tahových zkoušek prováděných za různých teplot. Na obr. 6.2. je vidět záznam ze zkoušek tahem pro jednotlivé teploty [12,21].



Obr. 6.1 Teplotní závislost měrného tepla a součinitele tepelné vodivosti



Obr. 6.2 Záznam ze zkoušek tahem pro jednotlivé teploty

6.2. Definice a popis tvaru tepelného zdroje

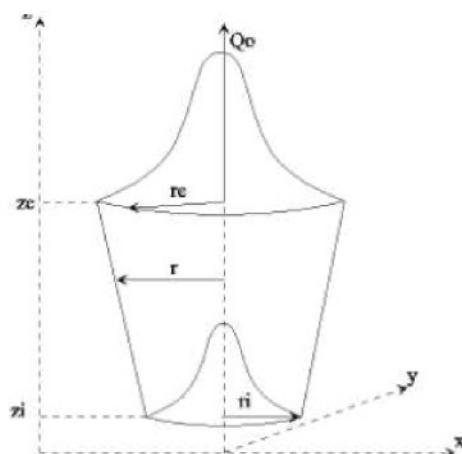
Jediným zatěžujícím účinkem během numerických simulací svařování je rozložení teplotních polí v jednotlivých časových okamžicích. Teplota $T(x,y,z,t)$ je funkce souřadnic v prostoru a čase. Přesné určení teplotního pole během svařování (tzn. především tvaru a rozměru natavené oblasti) je prvním a velmi důležitým krokem k reálnému určení správné struktury materiálu, deformací a zbytkových napětí. Proto nalezení správného matematického popisu tepelného zdroje je pro numerické simulace velice důležité.

Nejlépe vystihují popis jednotlivých technologií svařování trojrozměrné modely tepelného zdroje. Bohužel zatím se nepodařilo vytvořit tak zobecněný zdroj, který by vyhovoval všem technologiím tavného svařování. Během provádění numerických simulací svařovacího procesu byly zkoušeny různé typy tepelných zdrojů. V poslední době se ale nejvíce používají tyto následující dva modely tepelného zdroje.

- Zdroj využívající Gaussovo rozložení tepla tzv. 3D Gaussian.
- Dvouelipsoidní model tepelného zdroje tzv. Double elipsoid.

3D Gaussian, model pro popis svařování laserem a elektronovým paprskem 3D Gaussian (obr. 6.3), je modelovým zdrojem tepla, kde kuželový tvar umožňuje namodelovat vysokou energii svařovacího procesu Laseru a Elektronového paprsku [12].

- (x_0, y_0, z_0) - definující střed 3D Gaussianu.
 (Q_0) - hustota tepelného toku (W/mm^3)
 (r_0, r_i) - poloměry 3D Gaussianu
 (z_0, z_i) - určují délku kužele 3D Gaussianu



Obr. 6.3 Model tepelného zdroje - 3D Gaussian

Matematicky lze 3D Gaussian popsat následujícími rovnicemi:

$$q(x, y, z) = Q_0 \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{r_0^2(z)}\right) \quad (6.4)$$

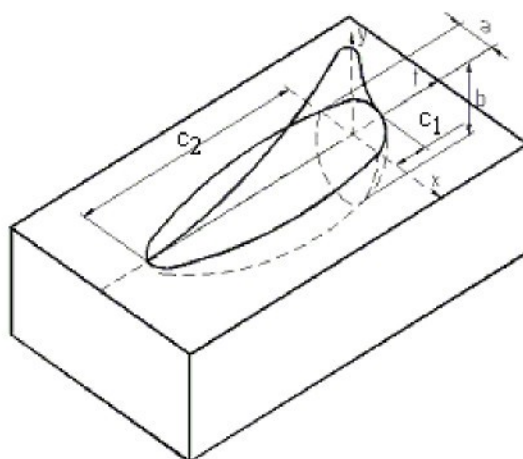
Rovnice (6.4) popisuje hustotu tepelného toku do materiálu v závislosti na prostorových souřadnicích.

$$r_0^2(z) = r_e + \frac{r_i - r_e}{z_i - z_e} (z - z_e) \quad (6.5)$$

Rovnice (6.5) doplňuje rovnici (6.4) o parametry tvaru ve směru tloušťky materiálu.

Dvouelipsoidní model pro popis svařování obalenou elektrodou, pod tavidlem, TIG, MIG, MAG. Pro použití dvouelipsoidního modelu tepelného zdroje (obr. 6.6) je třeba znát velikost natavené oblasti (parametry a, b, c_1, c_2). Tyto parametry jsou zjišťovány na základě provedených experimentů a jsou změřeny z makrovýbrusů.

V posledních 5 letech bylo provedeno mnoho numerických analýz s dvouelipsoidním modelem tepelného toku. Na jejich základě bylo konstatováno, že nelze tento model použít jako obecný zdroj pro všechny případy svařování. Nejlepší výsledky vykazovalo použití dvouelipsoidního modelu pro ruční obloukové svařování. Pro ostatní technologie je třeba tento model tepelného toku v materiálu modifikovat úpravou koeficientů v exponentu [21].



Obr. 6.6 Model teplotního zdroje – dvojité elipsoid (Goldak)

$$q(x, y, z, t) = \frac{6 \cdot \sqrt{3} \cdot f_{1,2} \cdot Q \cdot \eta}{a \cdot b \cdot c_{1,2} \cdot \pi \cdot \sqrt{\pi}} \cdot e^{\frac{-3 \cdot x^2}{a^2}} \cdot e^{\frac{-3 \cdot y^2}{b^2}} \cdot e^{\frac{-3 \cdot z^2}{c_{1,2}^2}} \quad (6.7)$$

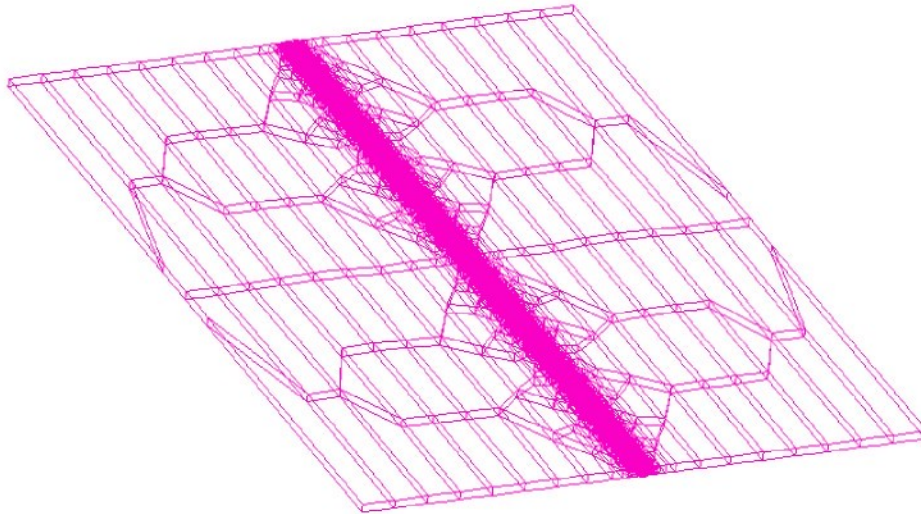
Rovnice (6.7) popisuje hustotu tepelného toku do materiálu pro základní nemodifikovaný dvouelipsoidní model. Indexy 1,2 v rovnici rozlišují, zda se jedná o část před, nebo za středem zdroje tepla ve směru svařování.

kde:

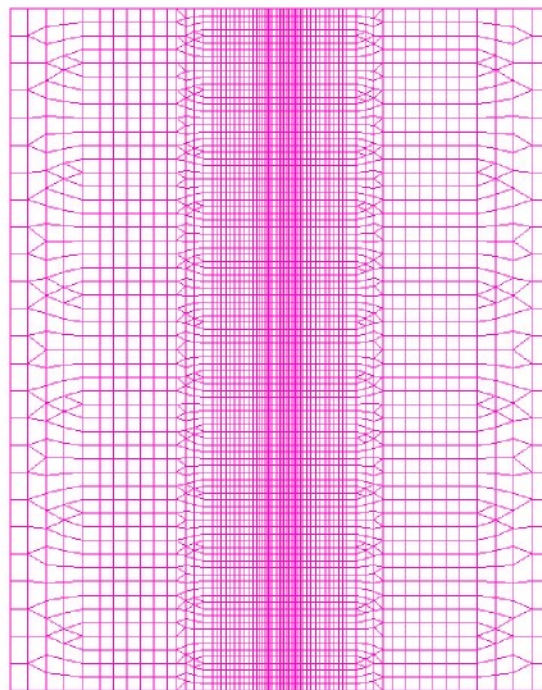
$q(x,y,z,t)$	- Hustota tepelného toku jako funkce souřadnic a času
Q	- Celkový výkon zdroje $Q = U \cdot I$
U	- Napětí na oblouku
I	- Svařovací proud
η	- Celková tepelná účinnost zdroje
a,b,c_1,c_2	- Parametry natavené oblasti
v	- Rychlost svařování
t	- Okamžitý čas
τ	- Celkový čas svařování

6.3. Vytvoření prostorového modelu

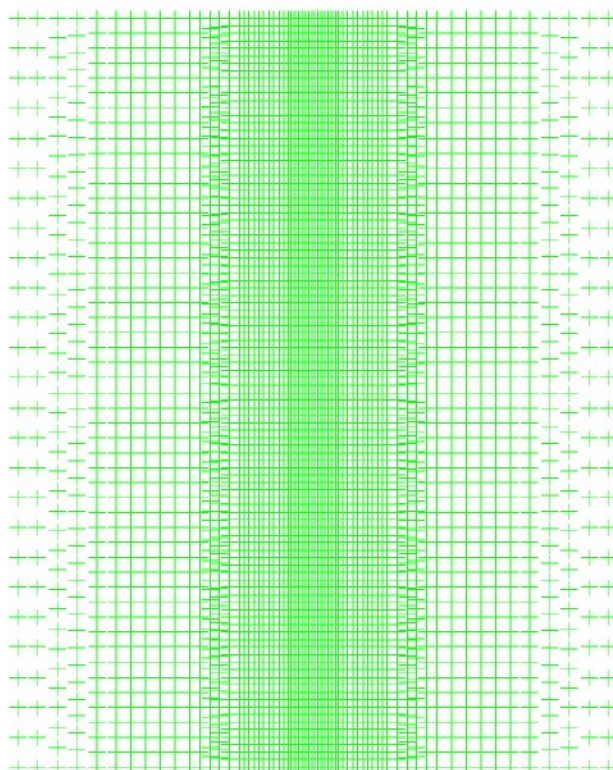
Prostorové modely, oproti rovinným modelům mnohem lépe vystihují skutečnost, ale jsou limitovány výpočtovým časem. 3D model je složen z elementů a uzlových bodů (obr. 6.8, obr. 6.9, obr. 6.10, obr. 6.11) [21]. Hustota uzlových bodů pak záleží na tom, jak podrobně chceme dané oblasti analyzovat. To znamená že nejhustěji zasítovaná bude oblast svarového kovu a tepelně ovlivněná oblast, ve větších vzdálenostech se bude hustota uzlových bodů snižovat. Pro středně velký model je zapotřebí asi 30000 uzlových bodů [12].



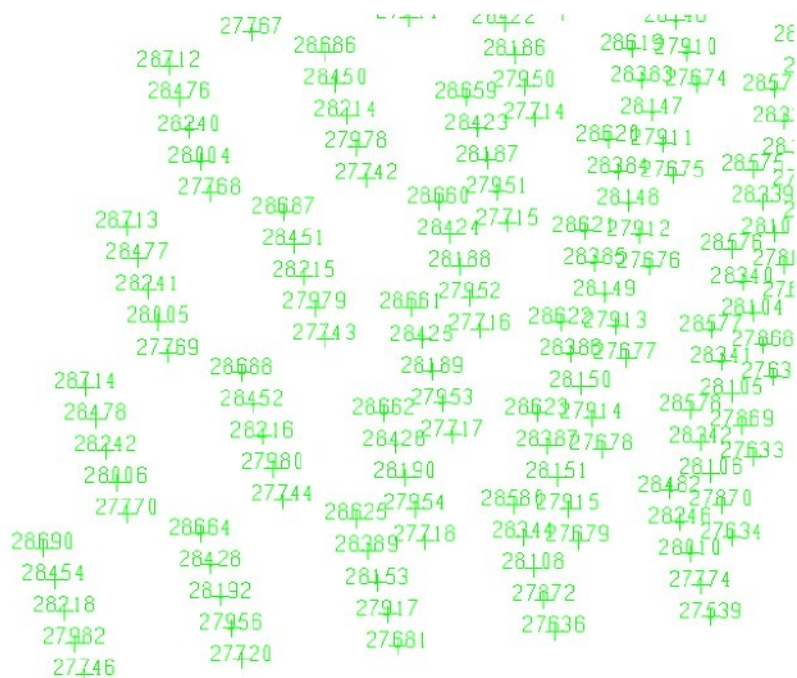
Obr. 6.8 3D model sestavený z elementů složený ze dvou desek 400x150x4 svařených natupo v poloze PA. Vzdálenost jednotlivých elementů v oblasti housenky je 4mm. Svar je proveden metodou TIG.



Obr. 6.9 3D model desky složený z elementů. Rozměr desky je 150x120x4. Svar je proveden metodou TIG v poloze PA. Vzdálenost jednotlivých elementů v oblasti housenky je 1,5mm ve směru svařování a 0,5mm ve směru kolmém na směr svařování.



Obr. 6.10 3D model desky složený z uzlových bodů. Rozměr desky je 150x120x4.



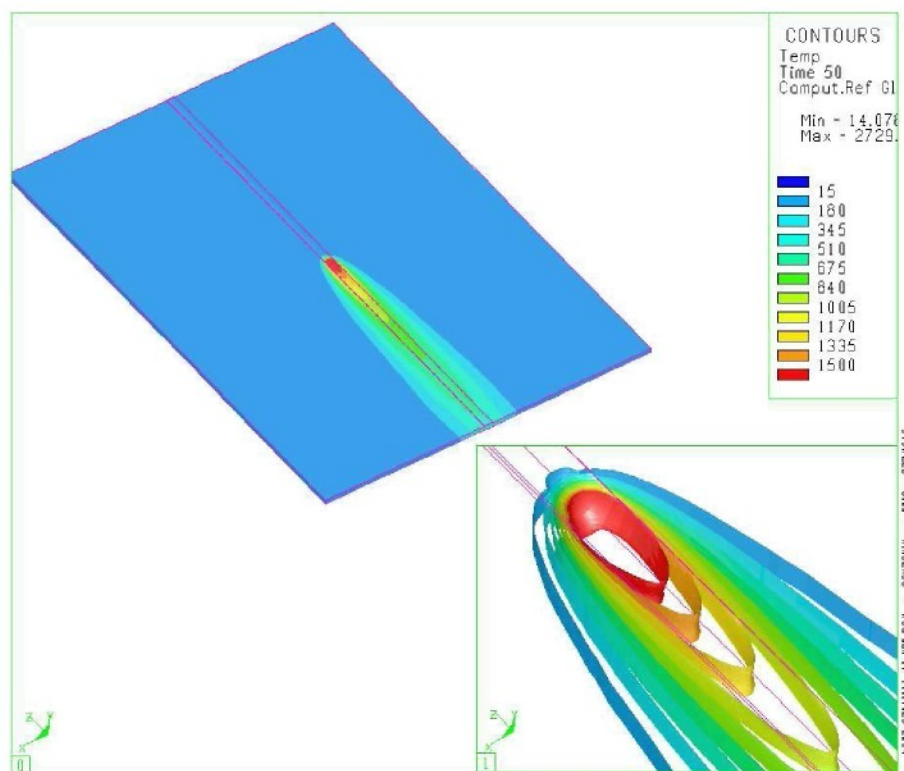
Obr. 6.11 Část 3D modelu složeného z uzlových bodů, kde každý bod je definován přiřazeným číslem pomocí něhož zjistíme umístění bodu v prostoru, i všechny vypočtené hodnoty v tomto uzlovém bodě.

6.4. Vlastní výpočet v programu SYSWELD

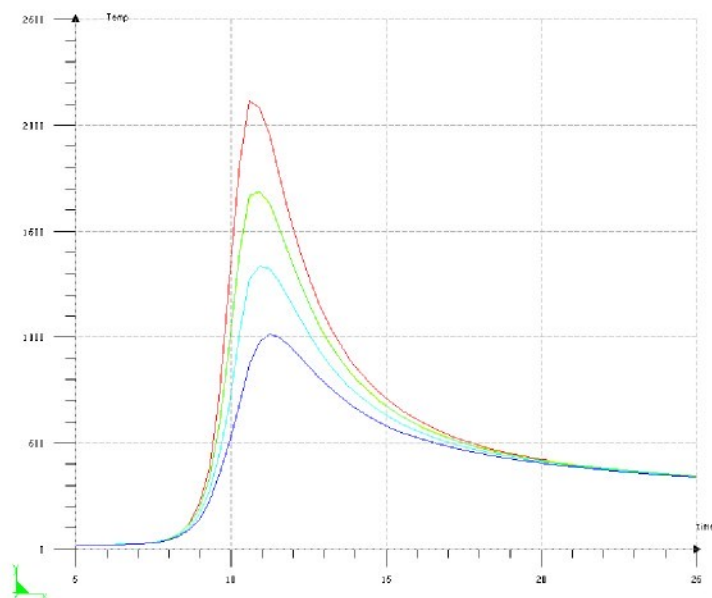
Celkový výpočtový proces v programu SYSWELD je rozdělen na dvě základní části, teplotně-metalurgickou a mechanickou. Přičemž mechanickou analýzu nelze provést bez předchozího tepelného zatížení soustavy tedy bez provedení teplotně metalurgické analýzy.

Teplotně-metalurgická analýza umožňuje výpočet nestacionárních teplotních polí v prostoru a čase, výpočet a zobrazení rozložení fází v průběhu celého svařovacího cyklu i v průběhu chladnutí. Umožňuje i výpočet tvrdosti a velikosti austenitického zrna. Tyto hodnoty jsou počítány pro všechny elementy a uzlové body definované v prostorovém 3D modelu. Jsou počítány samozřejmě pro každý definovaný výpočtový čas. Při průměrném výpočtu je použito přibližně 150 časů.

Získané výsledky je pak možno prezentovat různými způsoby. Můžeme zobrazit pouze povrch modelu, můžeme zobrazit libovolný řez modelem, nebo použít zobrazení hraničními plochami (hladinami) pro každý definovaný čas v průběhu svařování i v průběhu chladnutí a to jak pro teplotní pole, tak pro fázové přeměny případně tvrdost (obr. 6.12) [14]. Dále je možné veškeré tyto hodnoty zobrazit pro jednotlivé elementy, případně uzlové body a to jak ve formě grafu (obr. 6.13), tak ve formě výstupního textového souboru (obr. 6.14) [14].



Obr. 6.12 *Prezentace výsledků teplotní analýzy pro čas svařování 50 s. Na obrázku je povrch celého svařovaného celku s teplotním polem pro čas 50 s. Na detailu je pak zobrazení teplotního pole pomocí hraničních hladin odpovídající času 50 s.*



Obr. 6.13 *Prezentace výsledků teplotní analýzy pro uzlové body při přechodu z taveniny do TOO. Jsou zde zobrazeny průběhy teplot v požadovaném místě pro zvolený časový rozsah.*

Carte Transient - Time : 80.004 -

TEMPERATURE

Operator : Temp (Comput.Ref Global)

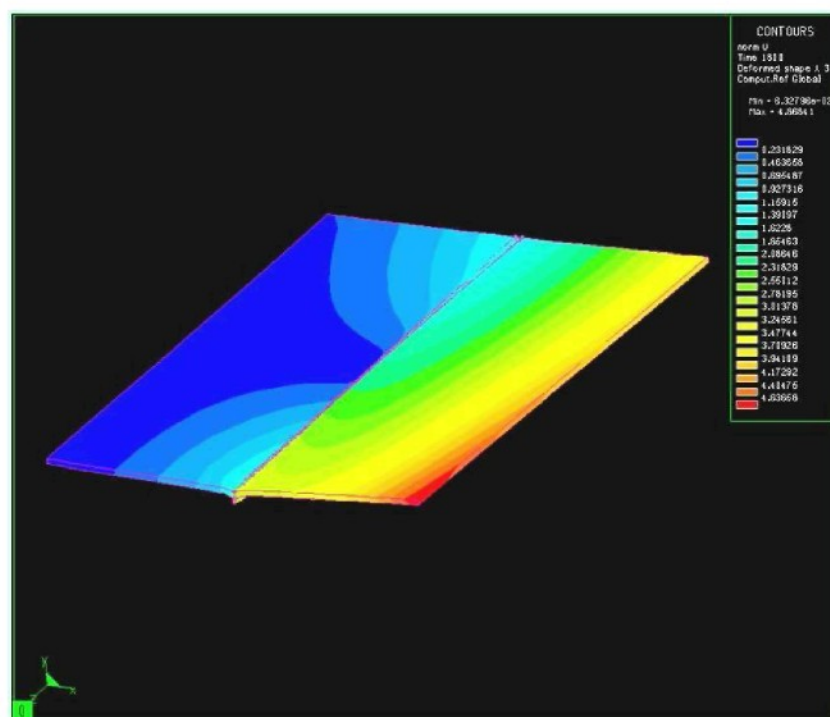
Node (inte)	Node (user nb)	Temp
9131	9131	988.67615
9135	9135	1017.8297
9142	9142	999.49628
9144	9144	1032.7747
9158	9158	1135.6984
9162	9162	1186.6937
9169	9169	1151.4399
9171	9171	1209.9592
9185	9185	1320.7917
9189	9189	1436.0914
9196	9196	1333.1854
9198	9198	1457.068

Obr. 6.14 *Prezentace výsledků teplotní analýzy pro čas svařování 80,004 s. Na obrázku je část výstupního souboru pro vybrané uzlové body. V prvním sloupci jsou čísla interně přiřazená uzlovým bodům. Ve druhém sloupci jsou čísla, podle kterých lze jednotlivé uzlové body identifikovat, nalézt a zobrazit a ve třetím sloupci jsou teploty vypočtené pro jednotlivé uzlové body.*

Mechanická analýza vychází z teplotně-metalurgické analýzy a nelze ji provést bez předchozího výpočtu teplotního zatížení soustavy při teplotně-metalurgické analýze. Probíhají v ní výpočty zbytkových napjatostí a elastických i plastických deformací. Lze počítat jednotlivé složky tenzoru napětí tedy normálová a smyková napětí, celkový tenzor napětí. Dále je počítán druhý invariant tenzoru napětí, ze kterého vychází zobecněné napětí pro trojosou napjatost, které je nedílnou součástí energetické podmínky HMM (Von Mises stress). Je také možné využít teorie Trescova maximálního smykového napětí pro trojosý stav napjatosti. Počítají se také hlavní napětí s možností zobrazení maximálního hlavního napětí. Všechny tyto výpočty jsou automaticky počítány pro tři různé modely chování materiálu při deformačním zpevnění materiálu. Způsoby zobrazení výsledků jsou stejné jako při teplotně-metalurgické analýze. Protože výpočet probíhá pro více hodnot, projeví se vše nejen na délce výpočtového času, ale i na velikosti výstupního souboru. Z tohoto je zřejmé, že ačkoliv se mechanická analýza počítá pro všechny definované časy, musí se ukládat do výstupního souboru pouze některé časy, nebo musí být mechanická analýza řešena pomocí více výpočtů. Na obr. 6.15, obr. 6.16 a obr. 6.17 jsou vidět možné způsoby zobrazení výsledků mechanické analýzy. Obr. 6.15 znázorňuje rozložení tahových a tlakových napětí na povrchu desky z aluminidu železa v čase 346 s, tj. těsně po ukončení svařovacího procesu. Obr. 6.16 ukazuje deformace svarku a velikosti posuvů po vychladnutí desky z aluminidu železa, která je z levé strany upnutá v čase 1800 s a obr. 6.17 zobrazení výstupních dat pomocí datového souboru podobně jako u teplotně metalurgické analýzy [14,17].



Obr. 6.15 Maximální hlavní napětí na povrchu desky - rozhraní tahových a tlakových napětí



Obr. 6.16 Deformace svarku a výsledné posuvy po vychladnutí desky v čase 1800 s



Carte Transient - Time : 146 -

STRESSES

Operator : Von mises stress (Comput.Ref Global)

Node (inte) Node (user nb) Von mises stress

6216	23571	82.783524
6220	23761	67.194588
6231	23945	52.205162
6253	24120	19.569063
6268	24312	26.444502
6283	24507	79.221054
6298	24693	296.40918
6313	24871	326.77875
6328	25048	370.27634
6343	25226	372.83963
6357	23376	99.36216
6373	20480	342.51508
6387	23186	110.41464
6403	20555	316.59439
6417	22462	116.45474
6442	20806	283.31357
6465	22271	145.80368
6490	20851	246.76169
7393	22074	230.13359
7704	20901	210.23135
9229	21872	266.77444
9555	20958	180.07896
10462	21671	284.41446
11432	21007	153.60468
12008	17538	293.84445
13418	21061	130.83409
13708	23012	297.48184

STRESSES

Operator : Von mises stress (Comput.Ref Global)

Node (inte) Node (user nb) Von mises stress

16011	22652	295.36612
17823	21177	79.360359
18119	19082	292.90738
20001	21222	64.999283
20093	21258	52.830502
20394	18989	283.18018

Obr. 6.17 *Prezentace výsledků mechanické analýzy HMM pro čas svařování 146 s. Na obrázku je část výstupního souboru pro vybrané uzlové body. V prvním sloupci jsou čísla interně přiřazená uzlovým bodům. Ve druhém sloupci jsou čísla podle kterých lze jednotlivé uzlové body identifikovat, nalézt a zobrazit a ve třetím sloupci jsou napjatosti vypočtené podle teorie HMM pro jednotlivé uzlové body, pro čas 146 s.*

6.5. Nedostatky výstupních dat

Třebaže z teplotně-metalurgické a mechanické analýzy získáme velmi mnoho zajímavých a užitečných dat a přestože je možné pomocí těchto dat detailně prozkoumat jakoukoliv oblast prostorového modelu, neřeší tento program vyšetření kritických míst. Kritická jsou pro nás ta místa, kde se prostorová napjatost vyrovnala nebo překročila mez pevnosti materiálu pro danou teplotu. Bohužel tato místa program SYSWELD ani ostatní simulační programy zabývající se technologií svařování odhalit nedokáží..

Je sice možné se zaměřit na oblasti největších napjatostí a tyto oblasti potom řešit detailním rozbořem jednotlivých uzlových bodů, ale takovýto postup je za prvé velice složitý a časově náročný a za druhé se oblasti s maximálním napětím mohou v průběhu svařování a následného chladnutí měnit a také se mění. To znamená, že pro detailní vyšetření numerické analýzy svaru bychom museli vyšetřit oblasti s maximálními napětími v každém definovaném časovém okamžiku a zároveň zjišťovat teplotu v daném bodě a čase, protože veškeré mechanické vlastnosti použitelné pro srovnávací analýzu jsou závislé na teplotě. Právě z tohoto důvodu nelze tvrdit, že místo maximálních napětí musí být rovněž místem kritickým z hlediska vzniku trhliny.

Další, velice důležitou okolností je velikost plastické deformace. Vezmeme-li totiž v úvahu pouze výsledný stav napjatosti v určitém čase, která je třeba i mnohem menší než mez pevnosti pro danou teplotu, neznamená to, že výsledek musí být v pořádku. Zaleží totiž také na cestě, jak bylo této napjatosti dosaženo. To znamená zda nedošlo k vyčerpání plasticity v důsledku změny tahových a tlakových napjatostí.

Posledním, ale už ne tak důležitým faktorem u maximálních napětí je to, zda se pro daný uzlový bod jedná o napětí tahová, nebo tlaková. S ohledem na možný vznik trhlín ve svaru jsou výhodnější tlaková napětí.

Problémem simulačních výpočtů tedy zůstává vyhodnocení kritických míst. Míst, u kterých je vysoká pravděpodobnost porušení materiálu z důvodů příliš vysokých hodnot prostorové napjatosti, nebo z důvodu vyčerpání plasticity. Proto byl na katedře strojírenské technologie Technické univerzity v Liberci vyvinut program MOVYPRO 07, který dokáže na základě výstupních dat simulací v programu SYSWELD tato kritická místa vyhodnotit [17].

7. Program MOVYPRO 07

Program MOVYPRO byl vytvořen na TUL pro detekování kritických míst modelu při simulacích tavného svařování. Jeho úkolem je na základě srovnávací analýzy zjistit počet a rozmístění kritických míst v jednotlivých výpočetních časech.

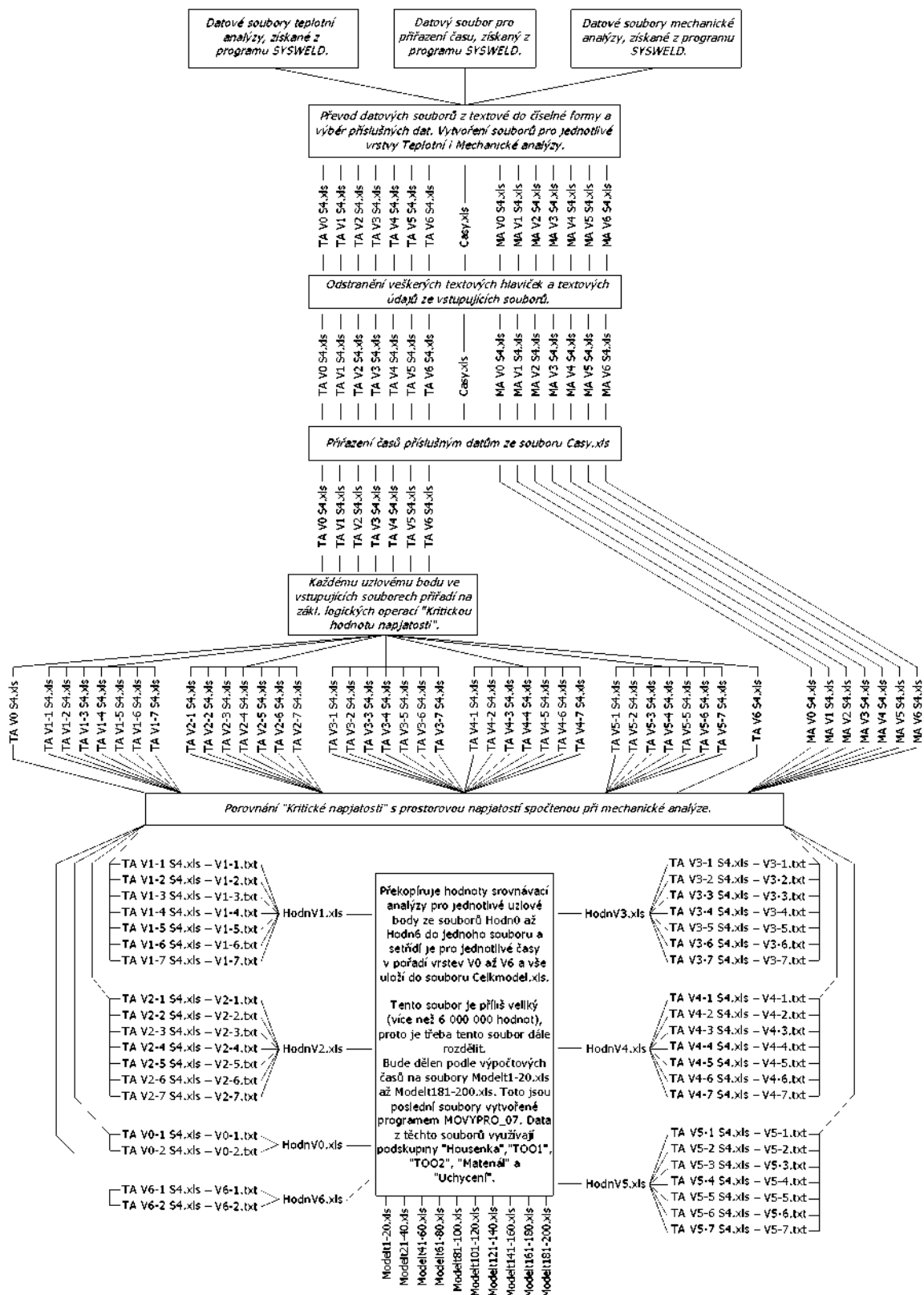
Posloupnost operací při srovnávací analýze lze shrnout v následujících bodech:

- Na základě teplotně-metalurgické analýzy přiřadit každému uzlovému bodu modelu pro každý výpočtový čas číselnou hodnotu teploty.
- Matematicky popsat teplotní závislost meze pevnosti příslušného materiálu např. pomocí jednoho nebo více n -násobných polynomů.
- Na základě matematického popisu průběhu funkce teplotní závislosti meze pevnosti a na základě znalosti hodnoty teploty v uzlovém bodě, přiřadit každému uzlovému bodu modelu hodnotu tzv. kritické napjatosti, tedy hodnotu, při jejímž překročení dojde s vysokou pravděpodobností k porušení celistvosti svařence.
- Všem uzlovým bodům modelu přiřadit hodnoty prostorové napjatosti spočítané při mechanické analýze.
- Provést porovnání hodnot přiřazené kritické napjatosti a spočítané prostorové napjatosti a vyhodnotit body, ve kterých je hodnota spočítané napjatosti vyšší než hodnota kritické napjatosti.

Program MOVYPRO 07 je z důvodu možnosti univerzálního použití vytvořen v programu EXCEL. Jeho jednotlivé části jsou řešeny pomocí maker a kombinací těchto maker lze řešit jednotlivé úkoly srovnávací analýzy.

Popis činnosti programu MOVYPRO 07 je poměrně obtížný, neboť při zpracování dat vzniká mnoho pomocných souborů. Na obr. 7.1 je vidět strukturní schéma programu MOVYPRO 07. Každá etapa činnosti programu je znázorněna obdélníkovým oknem s popisem kroků v příslušné etapě. Dále jsou na schématu znázorněné soubory, které do příslušné etapy vstupují a soubory které z příslušné etapy vystupují.

Do srovnávací analýzy vstupuje celkem 267 datových souborů s více než 18 000 000 potřebných informací. Během analýzy je provedeno více než 380 000 000 operací a výstup je realizován pomocí deseti souborů obsahujících dohromady 6 183 400 hodnot (výsledků srovnávací analýzy) [14,21].



Obr. 7.1 Strukturní schéma programu MOVYPRO 07

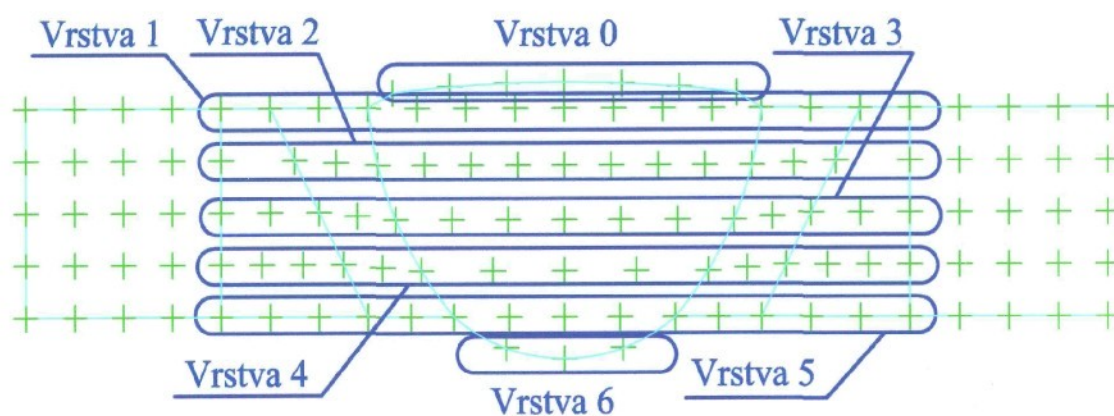


7.1. Výstupy z programu MOVYPRO 07

Jeden z možných výstupů z programu MOVYPRO ukazuje obr. 7.2. Jsou zde zobrazeny jednotlivé časy svařovacího procesu, a to od počátku svařování až po jeho konec. Žlutě podbarvené časy značí, že v těchto časech se nevyskytlo žádné kritické místo. Červeně podbarvení času znamená, že v daném čase došlo k výskytu jednoho nebo více kritických míst. Pro detailní informace o daném čase slouží šedivé tlačítko u každého času. Například po stisknutí tlačítka u času 306.68 dostaneme přehled o výskytu kritických míst, nyní již v jednotlivých vrstvách jak je vidět na obr. 7.3. Zde jsou detailní informace o kritických místech jak v jednotlivých vrstvách tak v jednotlivých oblastech a to housenka, TOO1, TOO2 a uchycení. Další možností je grafické zobrazení modelu s jednotlivými kritickými místy což ukazuje obr. 7.4. Je možnost volit i detaily jednotlivých oblastí a i zde zkoumat rozložení kritických míst [17].

6.667	0	193.343	0	380.019	47	566.695	229	753.371	76	940.046	47	1126.72	0
13.334	0	200.01	0	386.686	116	573.362	229	760.038	76	946.713	47	1133.39	0
20.001	0	206.677	0	393.353	116	580.029	229	766.705	76	953.38	47	1140.06	0
26.668	0	213.344	0	400.02	116	586.696	229	773.372	76	960.047	47	1146.72	0
33.335	0	220.011	0	406.687	116	593.363	229	780.039	76	966.714	47	1153.39	0
40.002	0	226.678	0	413.354	116	600.03	229	786.706	76	973.381	47	1160.06	0
46.669	0	233.345	0	420.021	116	606.697	229	793.373	47	980.048	47	1166.72	0
53.336	0	240.012	0	426.688	116	613.364	229	800.04	47	986.715	47	1173.39	0
60.003	0	246.679	0	433.355	116	620.031	229	806.707	47	993.382	47	1180.06	0
66.67	0	253.346	0	440.022	116	626.698	229	813.374	47	1000.05	47	1186.73	0
73.337	0	260.013	0	446.689	116	633.365	229	820.041	47	1006.72	47	1193.39	0
80.004	0	266.68	0	453.356	116	640.032	229	826.708	47	1013.38	47	1200.06	0
86.671	0	273.347	0	460.023	116	646.699	229	833.375	47	1020.05	47	1300	0
93.338	0	280.014	0	466.69	116	653.366	229	840.042	47	1026.72	47	1400	0
100.005	0	286.681	0	473.357	116	660.033	229	846.708	47	1033.38	47	1500	0
106.672	0	293.348	27	480.024	116	666.7	229	853.375	47	1040.05	47	1600	0
113.339	0	300.015	27	486.691	116	673.367	229	860.042	47	1046.72	47	1700	0
120.006	0	306.682	27	493.358	98	680.034	229	866.709	47	1053.39	0	1800	0
126.673	0	313.349	41	500.025	98	686.701	229	873.376	47	1060.05	0	1900	0
133.34	0	320.016	41	506.692	98	693.368	76	880.043	47	1066.72	2	2000	0
140.007	0	326.683	47	513.359	98	700.035	76	886.71	47	1073.39	0		
146.674	0	333.35	47	520.026	98	706.702	76	893.377	47	1080.05	0		
153.341	0	340.017	47	526.693	98	713.369	76	900.044	47	1086.72	0		
160.008	0	346.684	47	533.36	229	720.036	76	906.711	47	1093.39	0		
166.675	0	353.351	47	540.027	229	726.703	76	913.378	47	1100.05	0		
173.342	0	360.018	47	546.694	229	733.37	76	920.045	47	1106.72	0		
180.009	0	366.685	47	553.361	229	740.037	76	926.712	47	1113.39	0		
186.676	0	373.352	47	560.028	229	746.704	76	933.379	47	1120.06	0		

Obr. 7.2 Výstup z programu MOVYPRO 07

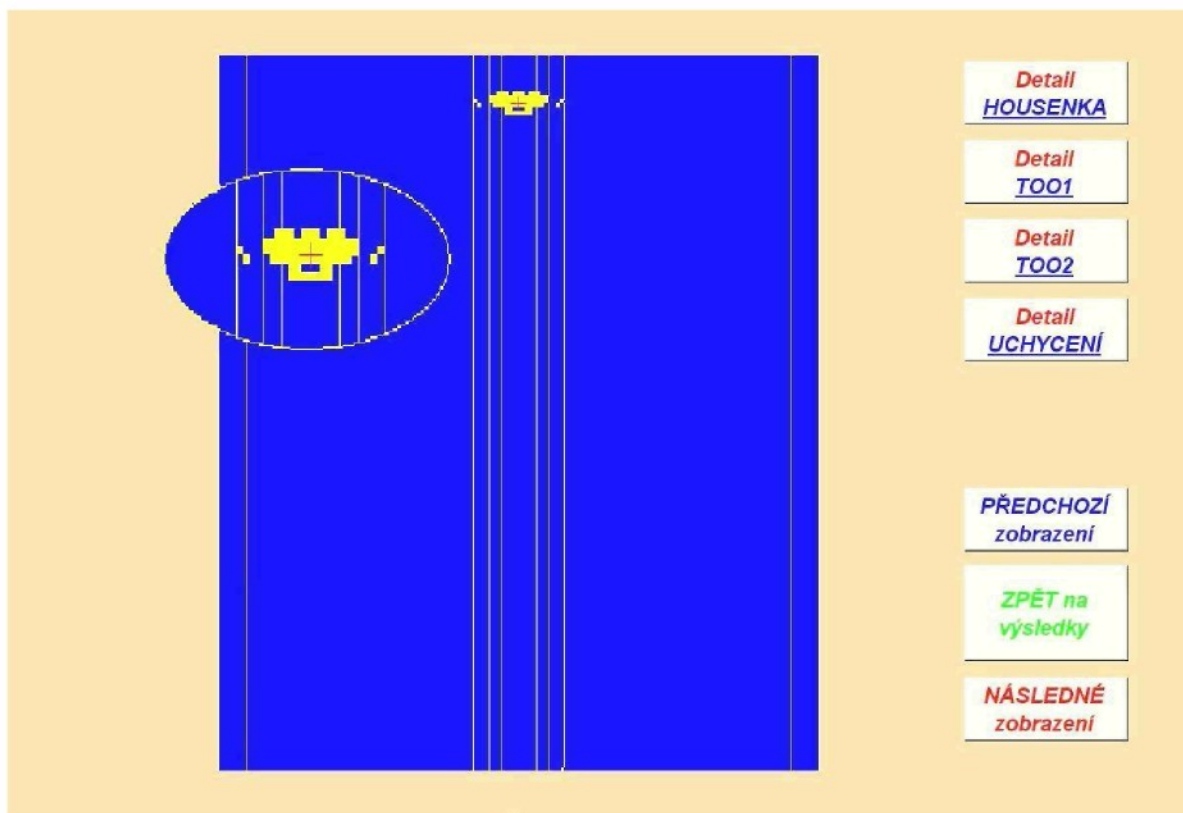


Výpočetní čas	306.68 s	Vzdálenost zdroje od počátku	184 mm
Vrstva 0	Housenka	0	
Vrstva 1	Housenka	5 TOO 1 0 TOO 2 0 Uchycení 0	
Vrstva 2	Housenka	5 TOO 1 0 TOO 2 0 Uchycení 0	
Vrstva 3	Housenka	5 TOO 1 0 TOO 2 0 Uchycení 0	
Vrstva 4	Housenka	4 TOO 1 0 TOO 2 0 Uchycení 0	
Vrstva 5	Housenka	4 TOO 1 0 TOO 2 0 Uchycení 0	
Vrstva 6	Housenka	4	

GRAFICKÉ
zobrazení modelu

ZPĚT na
výsledky

Obr. 7.3 Výstup z programu MOVYPRO 07



Obr. 7.4 Grafické zobrazení modelu s vyznačením kritických míst

Je zřejmé, že výsledné analýzy z programu MOVYPRO 07 závisí pouze na výstupních datech ze simulací v programu SYSWELD. Jde totiž pouze o analytické srovnání spočítaných hodnot s předem definovaným kritériem. Proto se může stát, že program bude generovat potenciální kritická místa, aniž by však při reálném svařování došlo ke vzniku trhlin nebo jinému porušení materiálu. Tyto případy mohou vzniknout především z důvodu přílišného zobecnění okrajových podmínek při simulačních výpočtech, nebo nedostatečnému množství exaktně zjištěných vstupních dat. Vstupní data pro vysoké teploty jsou zadávána na základě předpokladů, nebo interpolací předchozích teplotních závislostí.

Z výše uvedených důvodů je dobré analyzovat, teploty vzniku kritických míst, což je v programu MOVYPRO 07 poměrně obtížné. Dalším problémem je, že grafické zobrazení kritických míst na výpočtovém modelu v programu MOVYPRO 07 je možné pouze pro tzv. univerzální modely, pro které byl tento program vytvořen. Při vyhodnocení výpočtu s jiným modelem již není možné kritická místa v programu MOVYPRO 07 graficky zobrazit a známe pouze jejich počet, nikoli však rozmístění. Jedinou možností k získání přehledu o jejich rozmístění je jejich zpětné zadání do programu SYSWELD. Postup je následující:



1. Z programu MOVYPRO 07 jsou vyselektovány pouze uzlové body v nichž se kritická místa vyskytují.
2. Tyto body jsou zadány jako skupina uzlových bodů do programu SYSWELD, což je podmínka, aby mohly být zobrazeny na simulačním modelu. Je tak možné v požadovaném výpočetním čase zjistit rozložení uzlových bodů odpovídajících kritickým místům.

8. Shrnutí teoretické části a stanovení cílů disertační práce

Aluminidy železa jsou intermetalické sloučeniny, jejichž struktura je závislá především na procentuálním obsahu hliníku (kap. 2.1). Jsou to materiály s obtížnou svařitelností, což vychází především z jejich materiálových a tepelně-fyzikálních vlastností (kap. 2.2 a 2.3). Mechanické vlastnosti, především tažnost, vykazují značnou citlivost na okolní prostředí. Známá je dále jejich závislost na chemickém složení a množství a typu příměsí (kap. 2.2).

Vzhledem k uvedeným vlastnostem vznikají během a po svařování těchto materiálů značné vnitřní napjatosti, které následně vedou ke vzniku trhlin a porušení materiálu. Proto je třeba tato napětí snížit na co možná nejnižší možnou úroveň. Jednotlivé způsoby snižování napětí během a po svařování jsou uvedeny v kap. 4.4 a 4.5. Jedním z těchto způsobů je předehřev před svařováním (kap. 5). Problémem zůstává určení správné teploty předehřevu, neboť pro aluminid železa doposud nejsou k dispozici žádné vztahy ani diagramy, jež by sloužily k určení této teploty. Jednou z možností je využití experimentů a simulačních výpočtů.

Simulační výpočty v programu SYSWELD, jak je uvedeno v kap. 6, jsou založeny na metodě konečných prvků (MKP). Simulační výpočet v tomto programu lze rozdělit na dvě základní části, teplotně-metalurgickou a mechanickou. Teplotně-metalurgická analýza umožňuje výpočet nestacionárních teplotních polí, fázových přeměn, tvrdosti struktury i velikosti austenitického zrna. Mechanická analýza vychází z teplotně-metalurgické analýzy a nelze ji provést bez předchozího teplotního zatížení soustavy. Výsledkem jsou jednotlivé složky tenzoru napětí i tenzoru deformace, hodnoty hlavních napětí a deformace ve směru hlavních napětí, analýza prostorového stavu napjatosti podle teorie HMM, jakož i Trescova analýza smykových napětí.

Aby data získaná ze simulací odpovídala reálnému stavu, popřípadě se k němu co nejvíce blížila, je ve vztahu k teplotně-metalurgické analýze nutné splnit následující podmínky:

- 1) Zvolit matematický popis zdroje tepla odpovídající realitě.
- 2) Průběh teploty v místě termočlánků spočítaný při teplotně-metalurgické analýze by neměl mít odchylku větší než 9% oproti skutečně změřenému průběhu teplot zjištěnému termočlánky [36].
- 3) Vhodná volba okrajových podmínek při zadávání teplotních závislostí přestupu tepla do okolí [37].

Volba správného typu matematického popisu zdroje tepla je zcela zásadní při získávání odpovídajících teplotních polí. Typy zdroje tepla jsou voleny podle použité technologie svařování (kap. 6.2). Je-li k dispozici již odladěný zdroj tepla, je nestacionární teplotní pole závislé na kvalitě a množství materiálových dat potřebných pro obecný tvar Fourierovy diferenciální rovnice. Jde o tepelnou vodivost, měrné teplo a hustotu. Poslední z materiálových dat ovlivňující teplotní pole je přestup tepla do okolí.

Mechanická analýza umožňuje získat představu o rozložení napjatosti v tělese. Hodnota výsledné napjatosti je však závislá na následujících faktorech:

- 1) Teplotním ovlivnění a rozložení fází spočítaných při teplotně-metalurgické analýze.
- 2) Materiálových datech potřebných pro mechanickou analýzu.
- 3) Typu výpočtového modelu, který může být elastický, elasticko-plastický, případně viskoplastický.

Vlivy teplotního ovlivnění zde již byly zmíněny. Co se týče materiálových dat, jde o teplotní závislosti Youngova modulu pružnosti, Poissonovy konstanty, meze kluzu, koeficientu teplotní roztažnosti a především hodnot deformačního zpevnění. Tato data jsou důležitá především v oblasti plastického chování materiálů.

I když z teplotně-metalurgické a mechanické analýzy získáme velmi mnoho zajímavých a užitečných dat, a přestože je možné pomocí těchto dat detailně prozkoumat jakoukoliv oblast prostorového modelu, neřeší program SYSWELD vyšetření kritických míst (kap. 6.5). Za účelem odhalení těchto míst byl na katedře strojírenské technologie vytvořen program MOVYPRO 07, který dokáže tato místa odhalit. Struktura a funkce programu je uvedena v kap. 7.

Aby však měly simulace vypovídající charakter, je nutné provést ověřovací experimentální zkoušky, při kterých jsou použita snímací zařízení jednotlivých parametrů svařování. Důležité je především měření teplotního pole pomocí termočlánků a následné získání reálného obrazu o průběhu teplot během svařování. Tyto hodnoty jsou pak porovnávány se simulačními výpočty. Pro zjištění rozložení napětí po svařování je vhodné provést na svařených vzorcích analýzu napjatosti pomocí vhodné metody, jejíž výsledky jsou opět porovnány se simulacemi.



Z těchto důvodů byly na základě shrnutí teoretické části a na základě problémů při stanovení vhodného svařovacího postupu u aluminidu železa stanoveny následující cíle disertační práce.

1. Získat materiálová vstupní data aluminidu železa pro simulační výpočty.
2. Aplikovat všechna získaná materiálová vstupní data do simulačního programu SYSWELD.
3. Navrhnout vhodný svařovací postup pro aluminid železa na základě simulačních výpočtů.
4. Provést experimentální zkoušky, zjistit reálné chování materiálu při svařování a vytvořit svary bez výskytu trhlin. Ověřit navrhované svařovací postupy, analyzovat teplotní pole a zbytkové napjatosti po svařování.
5. Stanovit metodiku přípravy a vyhodnocení simulačního výpočtu s využitím podkladů z experimentálního měření.

9. Realizace cílů disertační práce

9.1. Příprava vzorků pro experimenty

Slitiny pro experiment byly připraveny vakuovým tavením ve slévárně Velká Bíteš, a to na bázi prvků Al, Cr, Ce, Mn a C. Byly provedeny tři tavby v peci typu Leybold Heraeus, u které je možnost provedení vsázky přes vakuové předpecí. Složení materiálu pro vsázku je uvedeno v tab. 5. Předpokládané výsledné chemické složení odpovídající vsázce bylo 16,2 % Al, 4,2% Cr, 0,07% Ce a zbytek Fe.

Tab. 5 Materiál pro vsázku

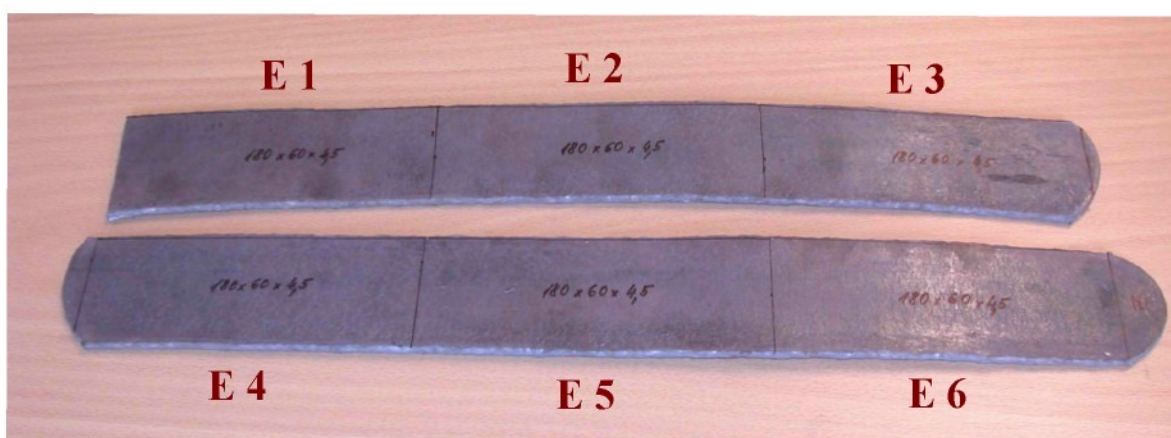
Surovina	Hmotnost (kg)
Předslitina Ferochrom Fe – Cr (70%) 0,03 %C	0,61
Arema	7,76
Al (čtyřdevítkový)	1,62
Ce	0,007

Chladnutí bylo pozvolné, skořepiny byly po odlití přikryté izolačním materiálem. Vytloukání provedeno cca při teplotě 250°C a poté následovalo tryskání Ni broky. Vtoky byly oddělené až po delší době v Liberci a to roztroušením pomocí kotouče tloušťky 1,6 mm.

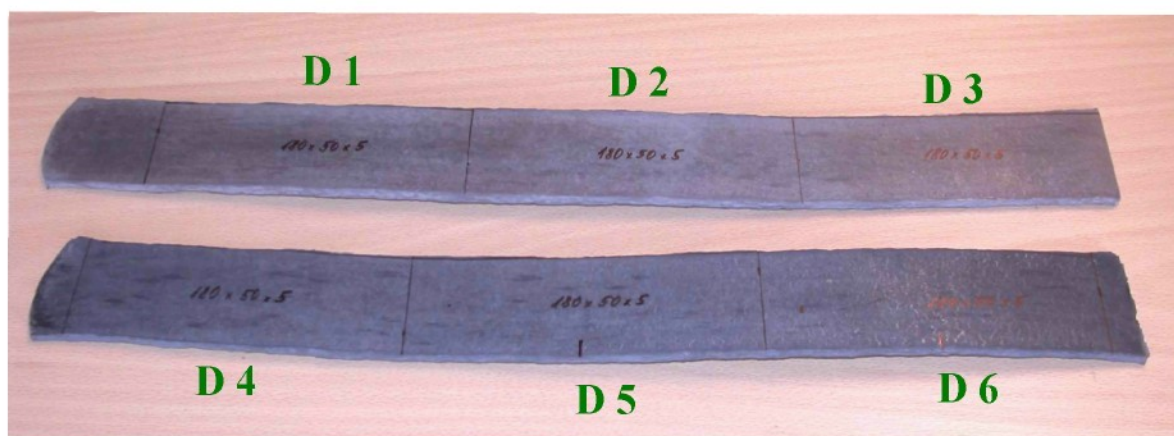
Odlité tyče byly nadále zpracovány válcováním za teplot 1200°C ve válcovně Panenské Břežany. Vstupním polotovarem byly tři tyče průřezu 30x40mm a jedna tyč 40x120mm. Z těchto tyčí bylo vyválcováno několik plechů, z nichž některé byly použity na výrobu zkušebních tyčí pro mechanické zkoušky (obr. 9.1) a jiné jako vzorky pro svařovací experimenty. Na pásové pile byly vyřezány 4 plechy, z kterých bylo později vyhotoveno 6 vzorků 180x60x4,5 mm označených E1-E6 a 6 vzorků 180x50x5 mm označených D1-D6, vše je vidět na obr. 9.2 a obr. 9.3. Části odebrané z jednotlivých vzorků byly podrobeny analýze chemického složení s cílem ověřit zda se shodují s požadovaným složením. Vzorky byly testovány na třech pracovištích (Škoda výzkum, Vítkovice a VŠCHT). Z důvodu, že se výsledky těchto analýz výrazně lišily, nejsou v práci uvedeny.



Obr. 9.1 Vzorek pro výrobu zkušební tyče



Obr. 9.2 Vzorky 180x60x4,5 označené E1-E6



Obr. 9.3 Vzorky 180x50x5 označené D1-D6

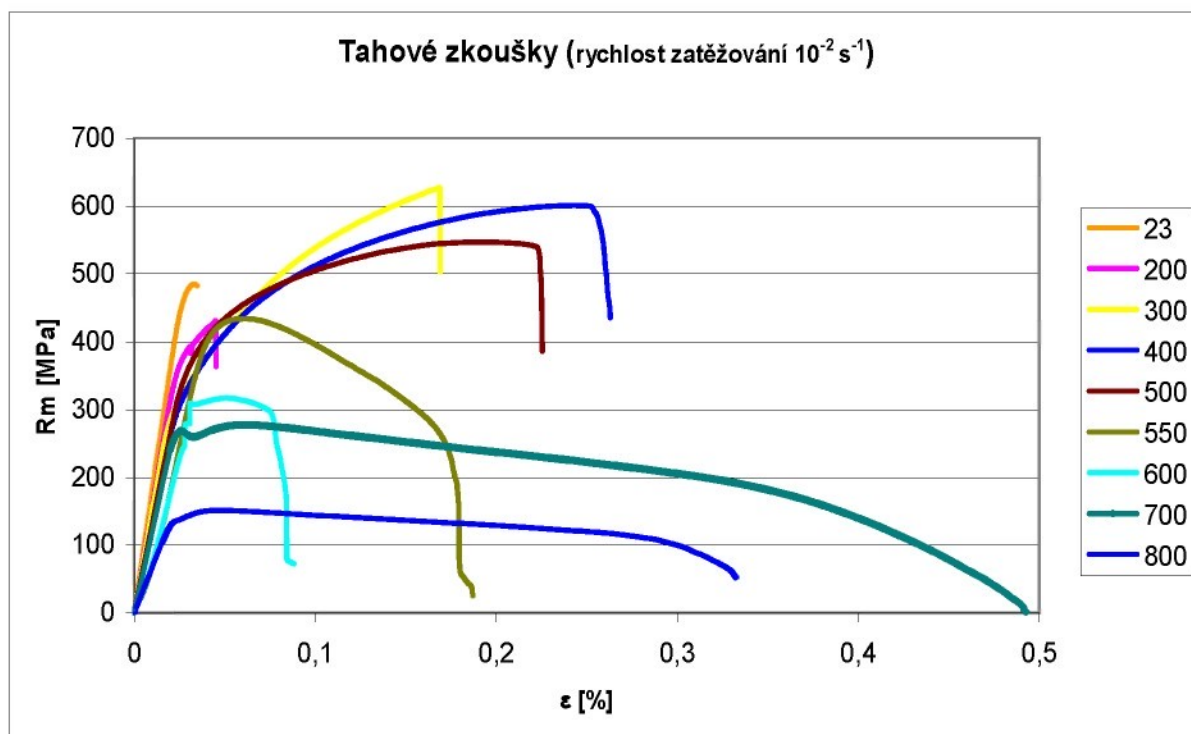
9.2. Mechanické zkoušky

Co se týká mechanických zkoušek byly provedeny tahové zkoušky za různých teplot. Těmto zkouškám se podrobněji věnují následující kapitoly.

9.2.1. Tahové zkoušky za různých teplot

Tahové zkoušky byly provedeny ve výzkumném ústavu v Běchovicích, který spadá pod MFF-UK. Vzorky byly deformovány při zatěžovacích rychlostech 10^{-2} s^{-1} . U řady vzorků se vyskytly skryté vady, které se projevíly předčasným lomem a zabránily tak získání korektních výsledků. Z těchto důvodů museli být některé zkoušky zopakovány.

Tahové zkoušky byly vyhotoveny za teplot 23, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700 a 800°C při zatěžovacích rychlostech 10^{-2} s^{-1} . Výsledné průběhy ze zkoušek jsou vidět z grafu na obr. 9.4. Z takto provedených zkoušek byly následně zjišťovány další hodnoty jako např. závislost meze kluzu a meze pevnosti na teplotě.



Obr. 9.4 Výsledné průběhy tahových zkoušek

9.3. Získání a vkládání vstupních dat do simulačních výpočtů

Numerické analýzy svařovacích procesů jsou velmi náročné na množství a kvalitu vstupních materiálových parametrů. Výsledná přesnost provedených numerických analýz velmi často odráží kvalitu vstupních materiálových dat.

Získat však potřebné vstupní materiálové charakteristiky pro numerické analýzy je velký problém, a to z důvodu jejich finanční náročnosti.

Chování materiálů a jejich vlastnosti závisí především na chemickém složení, mikrostruktuře, hustotě dislokací a čistotě struktury. Proto jsou i materiálové vlastnosti závislé na teplotě a historii teplotního zatěžování.

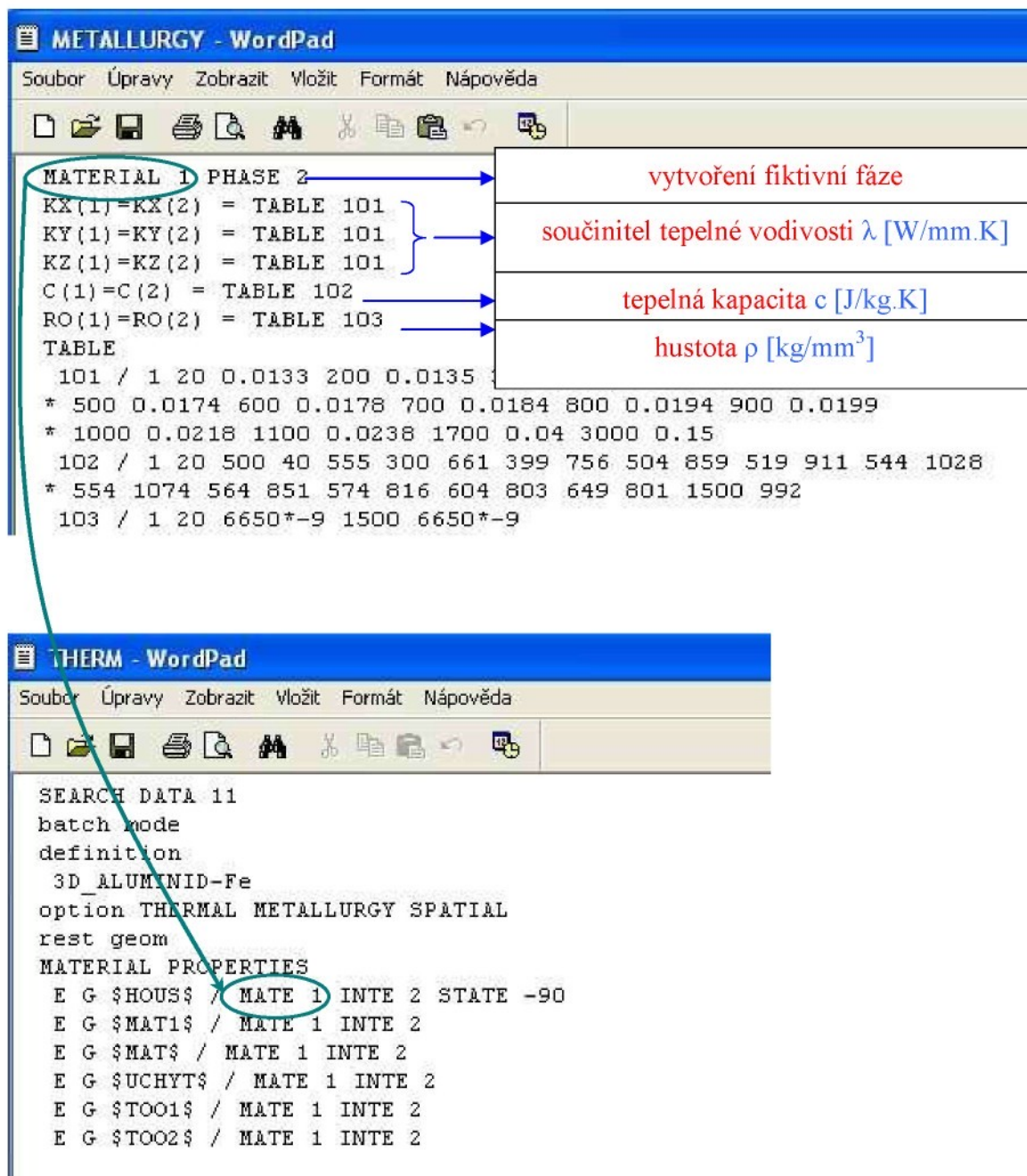
Vstupní materiálové charakteristiky potřebné pro numerickou analýzu svařování lze rozdělit jak již uvádí kap. 6.1 na vstupní materiálové charakteristiky pro teplotně-metalurgickou analýzu a na vstupní materiálové charakteristiky pro mechanickou analýzu.

1. Teplotně-metalurgická analýza
 - a. Koeficient tepelné vodivosti
 - b. Měrné teplo
 - c. Hustota
 - d. Koeficient přestupu tepla
 - e. ARA diagram „in situ“ (pouze u materiálu s transformační přeměnou)
2. Mechanická strukturní analýza
 - a. Koeficient teplotní roztažnosti resp. teplotní deformace
 - b. Poissonova konstanta
 - c. Modul pružnosti
 - d. Mez kluzu
 - e. Deformační zpevnění materiálu

9.3.1 Vstupní data pro teplotně-metalurgickou analýzu

Jde o výše zmíněná data, která se uvádí v závislosti na teplotě až do hodnoty teploty tavení (v případech materiálu s více fázemi i v závislosti na typu metalurgické fáze). Ve většině případů nejsou uvedené vlastnosti okamžitě k dispozici. První analýzy se v mnoha případech provádějí s vlastnostmi, které byly nalezeny v literatuře pro podobný materiál na základě podobného chemického složení. V průběhu dalších analýz bývá postupně prováděno měření potřebných materiálových hodnot.

Všechna teplotně metalurgická data jsou součástí zdrojového souboru tzv. „METALURGY.DAT“, který je načítán pro teplotně metalurgickou analýzu. Termofyzikální vlastnosti materiálu mohou být rovněž přímo součástí zdrojového souboru teplotně-metalurgické analýzy „THERM.DAT“, kde se zadávají na příslušné skupiny elementů. Spojitost výše uvedených zdrojových souborů je uvedena na obr. 9.5 [34].



Obr. 9.5 Zdrojové soubory „METALLURGY.DAT“ a „THERM.DAT“

Jako příklad termofyzikální veličiny je zde uvedena teplotní závislost tepelné vodivosti λ a tepelné kapacity c pro aluminid železa Fe_3Al a to v tab. 6 a 7 [34].



Tab. 6 Teplotní závislost tepelné vodivosti

Teplota t [°C]	Tepelná vodivost λ [W/mm.K]
20	0,0133
200	0,0135
300	0,0146
400	0,0158
500	0,0174
600	0,0178
700	0,0184
800	0,0194
900	0,0199
1000	0,0218
1100	0,0238
1700	0,0400*
3000	0,1500*

* předpoklad

Tab. 7 Teplotní závislost tepelné kapacity

Teplota t [°C]	Tepelná kapacita c [J/kg.K]
20	500
40	555
300	661
399	756
504	859
519	911
544	1028
554	1074
564	851
574	816
604	803
649	801
1500	992*

Další thermofyzikální veličinou je **koeficient přestupu tepla** do okolí. Tato veličina vytváří okrajovou podmínku teplotně-metalurgické analýzy. Jde vlastně o specifikaci odvodu tepla ze svarku v průběhu svařování a chladnutí. Ta probíhá dle fyzikálního popisu sdílení tepla radiací a volnou konvekcí kov – vzduch. Volná konvekce je řízená pomocí Newtonova zákona, teplotní ztráty radiací jsou řízeny pomocí Stefan-Boltzmannova zákona. Koeficient přestupu tepla tedy lze rozdělit na dvě části způsobené volnou konvekcí vzduchu α_k a radiací α_r . Stanovit koeficienty přestupu tepla lze následujícími způsoby.

1. Dle empirických vztahů pomocí bezrozměrných čísel (Nusseltovo, Prandtlovo a Grashoffovo číslo) obsahující veličiny, jež mají vliv na daný případ přestupu tepla. Na základě stanovení rozhraní a fyzikálního popisu sdílení tepla, lze stanovit vhodný koeficient přestupu tepla.
2. Změřit teplotní cykly během procesu na zkušebním kuse a určit přestup tepla nepřímou metodou pomocí numerických analýz. Uvedeným způsobem lze velmi přesně stanovit koeficienty přestupu tepla.

V našem případě jsme bylo postupováno podle prvního způsobu kdy byly výpočtem stanoveny jednotlivé veličiny potřebné pro získání hodnot koeficientu přestupu tepla. Celkový

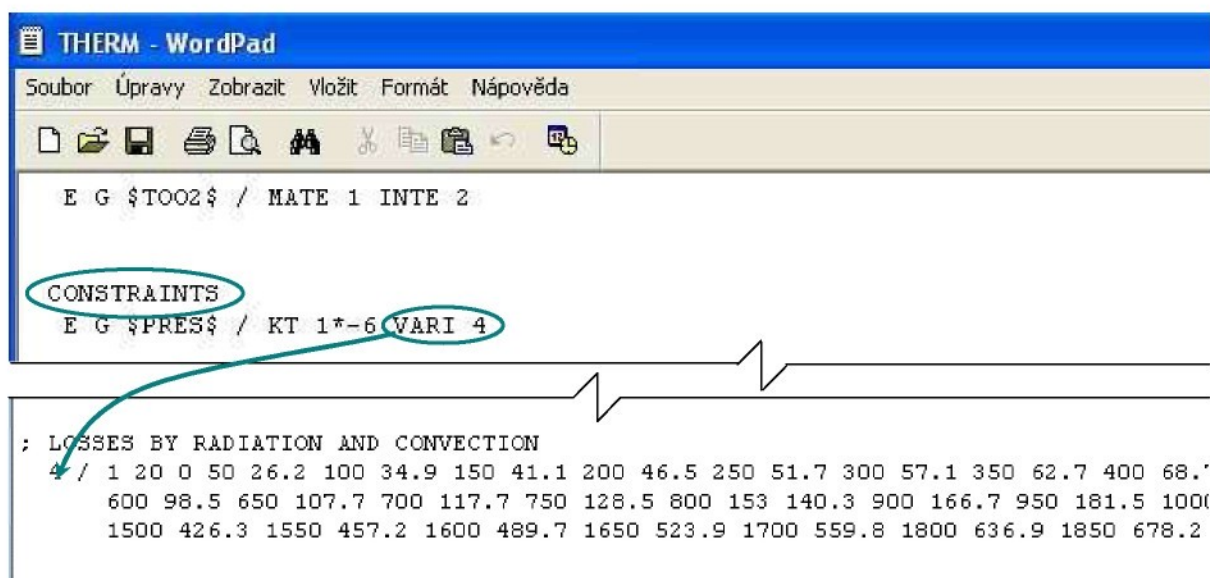


součinitel přestupu tepla je dán součtem dílčích součinitelů. Tedy součinitele přestupu tepla prouděním a sáláním. Do teploty 568°C se více projevuje sdílení tepla prouděním a od této teploty je strmý nárůst vlivu sálání. V tab. 8 jsou uvedeny hodnoty celkového součinitele přestupu tepla, pro různé hodnoty teplot povrchu. Dílčí hodnoty pro součinitel přestupu tepla prouděním a součinitel přestupu tepla sáláním jsou uvedeny v tab. 9 a 10 v příloze. Základní vztahy pro výpočet koeficientu přestupu tepla na základě Grashofova a Prandtlova čísla jsou uvedeny v kap. 3.

Tab. 8 Součinitel přestupu tepla v závislosti na teplotě (výpočet)

Teplota [°C]	20	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
α [W.m ⁻² .K ⁻¹]	0	26,2	34,9	41,1	46,5	51,7	57,1	62,7	68,7	75,3	82,3
Teplota [°C]	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1000	1050
α [W.m ⁻² .K ⁻¹]	90,1	98,5	107,7	117,7	128,5	140,3	153	166,7	181,5	197,3	214,4
Teplota [°C]	1100	1150	1200	1250	1300	1350	1400	1450	1500	1550	1600
α [W.m ⁻² .K ⁻¹]	232,6	252	272,7	294,8	318,2	343	369,2	397	426,3	457,2	489,7
Teplota [°C]	1650	1700	1750	1800	1850	1900	1950	2000	2050	2100	2150
α [W.m ⁻² .K ⁻¹]	523,9	559,8	597,4	636,9	678,2	721,3	766,4	813,5	862,6	913,7	966,9

Pro svařování aluminidů byly použity přestupy tepla uvedené v tab. 7. Způsob zadávání hodnot přestupu tepla do souboru „therm.dat“ je vidět na obr. 9.6.



Obr. 9.6 Zadávání přestupu tepla do zdrojového souboru „THERM.DAT“



9.3.2. Vstupní data pro mechanickou analýzu

Vstupní mechanická data jsou zadávána do zdrojového souboru pro mechanickou analýzu rovněž ve formě teplotní závislosti. Tab. 11 ukazuje teplotní závislosti základních mechanických dat pro aluminid železa. Jak se tato data vkládají do zdrojového souboru „MECH.DAT“ je vidět na obr. 9.7 [34].

Tab. 11 Tabulka mechanických vlastností aluminidu železa

Teplota	Modul pružnosti	Mez kluzu Rp0,2	Poissonova konstanta	Teplota	Teplotní deformace
[°C]	E [MPa]	[MPa]	[-]	[°C]	ε_{th} [-]
20	206900	412	0,3*	20	0
93	189000	378		373	0,00593
204	178500	357		473	0,00809
316	185500	371		573	0,0112
427	195500	391		673	0,0155
538	185500	371		773	0,0196
593	171500	343		873	0,0215
649	147500	295		973	0,0266
704	110000	220		1073	0,0308
760	62000	124		1173	0,0383
1500	1000*	10*	0,4*	1273	0,0312
				1373	0,0331
				1473	0,0364

* předpoklad



```
MECH - WordPad
Soubor Úpravy Zobrazit Vložit Formát Nápověda

E G $TOO1$ / PHASE 2 E -1 YIELD -2 NU -50 LX LY LZ -7 TF 1500
* MODEL 2 SLOPE -11 INTE 2
E G $TOO2$ / PHASE 2 E -1 YIELD -2 NU -50 LX LY LZ -7 TF 1500
* MODEL 2 SLOPE -11 INTE 2

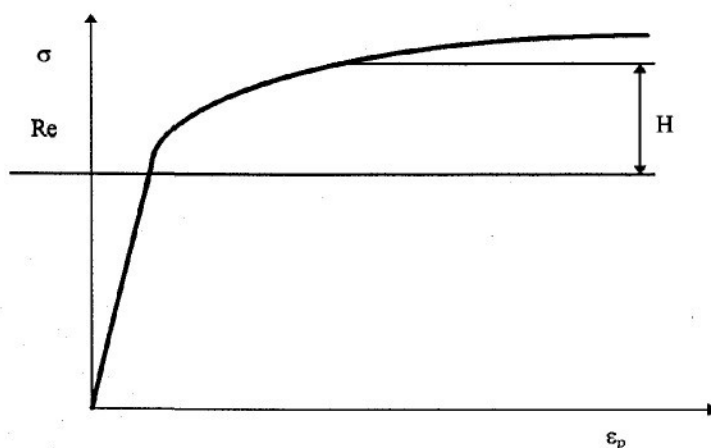
CONSTRAINTS
| N G $C_UX_UV_UZ_SR3$ / UX VY UZ

LOADS
1 /
TABLE
1 / 1 20 200000 93 189000 204 178500 316 185500 427 195500 538 185500
* 593 171500 649 147500 704 110000 760 62000 1500 1000
2 / -3 -5
3 / 1 20 412 93 378 204 357 316 371 427 391 538 371
* 593 343 649 295 704 220 760 124 1500 10
7 / -8 -8
8 / 1 20 0 373 0.00593 473 0.00809 573 0.0112 673 0.0155 773 0.0196
* 873 0.0215 973 0.0266 1073 0.0308 1173 0.0383 1273 0.0312 1373 0.0331
* 1500 0.0364
9 / -10 -10
10 / 1 20 -0.0364 1500 0

50 / 1 20 0.3 1500 0.4
; CHANGE BETWEEN ACTIVATED AND DEACTIVATED ELEMENTS
90/ FORTRAN
```

Obr. 9.7 Způsob zadávání mechanických hodnot do souboru „MECH.DAT“

Deformační zpevnění, mez kluzu a modul pružnosti se určuje z křivek získaných z tahové zkoušky pro danou teplotu. Deformační zpevnění H [MPa] je vyjádřeno jako přírůstek napětí k mezi kluzu (obr. 9.8) [34]. Tab. 12 ukazuje hodnoty deformačního zpevnění aluminia železa za různých teplot, které byly odečteny z příslušných tahových zkoušek. Postup vkládání do zdrojového souboru „MECH.DAT“ je vidět na obr. 9.9.



Obr. 9.8 Znáznornění deformačního zpevnění v diagramu napětí - deformace

Tab. 12 Tabulka deformačního zpevnění aluminia železa

Teplota [°C]	20	300	400	500	600
ε_p [-]	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
H [MPa]	67	33	29	60	92
Teplota [°C]	700	1400			
ε_p [-]	0,005	0,005			
H [MPa]	0	0			
Teplota [°C]	20	300	400	500	600
ε_p [-]	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
H [MPa]	110	80	58	104	97
Teplota [°C]	700	1400			
ε_p [-]	0,01	0,01			
H [MPa]	1	0			
Teplota [°C]	20	300	400	500	600
ε_p [-]	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
H [MPa]	158	149	156	143	114
Teplota [°C]	700	1400			
ε_p [-]	0,02	0,02			
H [MPa]	3	0			
Teplota [°C]	20	300	400	500	600
ε_p [-]	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
H [MPa]	196	184	210	169	123
Teplota [°C]	700	1400			
ε_p [-]	0,03	0,03			
H [MPa]	4	0			
Teplota [°C]	20	300	400	500	600
ε_p [-]	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
H [MPa]	200	269	280	211	137



Teplota [°C]	700	1400			
ε_p [-]	0,05	0,05			
H [MPa]	4	0			
Teplota [°C]	20	300	400	500	600
ε_p [-]	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
H [MPa]	201	430	395	255	143
Teplota [°C]	700	1400			
ε_p [-]	0,1	0,1			
H [MPa]	4	0			

```

* MODEL 2 SLOPE -11 INTE 2
E G $TOO2$ / PHASE 2 E -1 YIELD -2 NU -50 LX LY LZ -7 TF 1500
* MODEL 2 SLOPE -11 INTE 2

CONSTRAINTS
N G $C_UX_UY_UZ_SR3$ / UX UY UZ

9 / -10 -10
10 / 1 20 -0.0364 1500 0
11 / -12 -12
12 / 7 20 15 300 17 400 18 500 19 600 20 700 21 1400 22
15 / 1 0 0 0.005 67 0.01 110 0.02 158 0.03 196 0.05 200 0.1 201
17 / 1 0 0 0.005 33 0.01 80 0.02 149 0.03 184 0.05 269 0.1 430
18 / 1 0 0 0.005 29 0.01 58 0.02 156 0.03 210 0.05 280 0.1 395
19 / 1 0 0 0.005 60 0.01 104 0.02 143 0.03 169 0.05 211 0.1 255
20 / 1 0 0 0.005 92 0.01 97 0.02 114 0.03 123 0.05 137 0.1 143
21 / 1 0 0 0.005 0 0.01 1 0.02 3 0.03 4 0.05 4 0.1 4
22 / 1 0 0 0.005 0 0.01 0 0.02 0 0.03 0 0.05 0 0.1 0

```

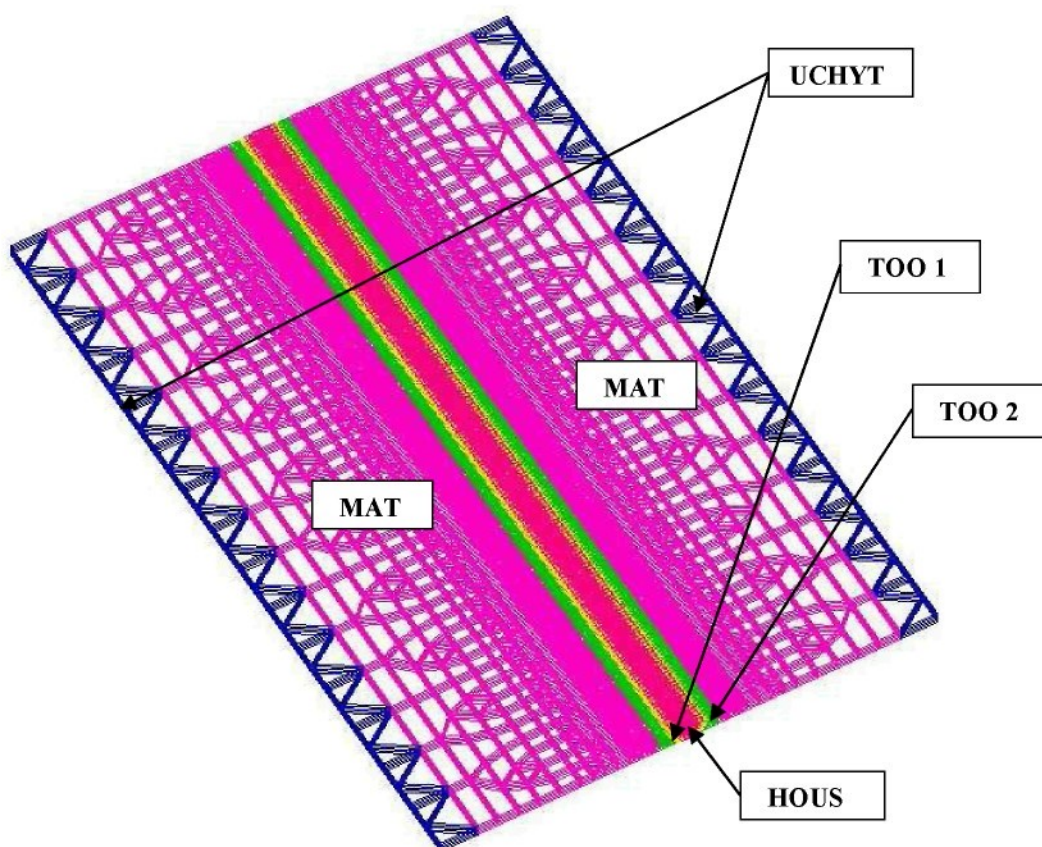
Obr. 9.9 Vkládání hodnot deformačního zpevnění do souboru „MECH.DAT“

9.4. Simulační výpočty pro návrh experimentálních prací

Cílem simulačních výpočtů bylo navrhnout svařovací postupy, které by byly užity a následně ověřeny experimenty. Jednalo se především o návrh sestavení desek před svařováním (svarová mezera, stehování, upnutí), dále pak o volbu správné teploty a průběhu předehřevu, případně dohřevu. Jednotlivé parametry jako množství vneseného tepla, tvar svarové lázně a velikost natavené oblasti byly nastaveny na základě předchozích výpočtů a experimentálních měření. Všechny provedené simulační výpočty byly vyhodnoceny programem MOVYPRO 07 na počet a rozmístění kritických míst. Přičemž cílem bylo najít nejpříznivější variantu co do počtu a rozmístění kritických míst.

9.4.1. Simulační model

Pro simulační výpočty byly použity dva modely: model o rozměrech 180x120x4,5 mm a model o rozměrech 180x100x5 mm, tak aby odpovídaly rozměrům reálných vzorků, které byly plánovány pro experimentální část. Oba modely obsahovaly 28640 elementů a 30917 uzlových bodů a byly pro lepší vyhodnocování rozčleněny do následujících oblastí: housenka, tepelně ovlivněná oblast č.1 a č.2, materiál a uchycení. Vše je popsáno na obr. 9.10.



Obr. 9.10 Simulační model rozdělený na jednotlivé oblasti (HOUS- housenka, TOO 1,2- tepelně ovlivněná oblast 1 a 2, MAT- materiál, UCHYT- uchycení)

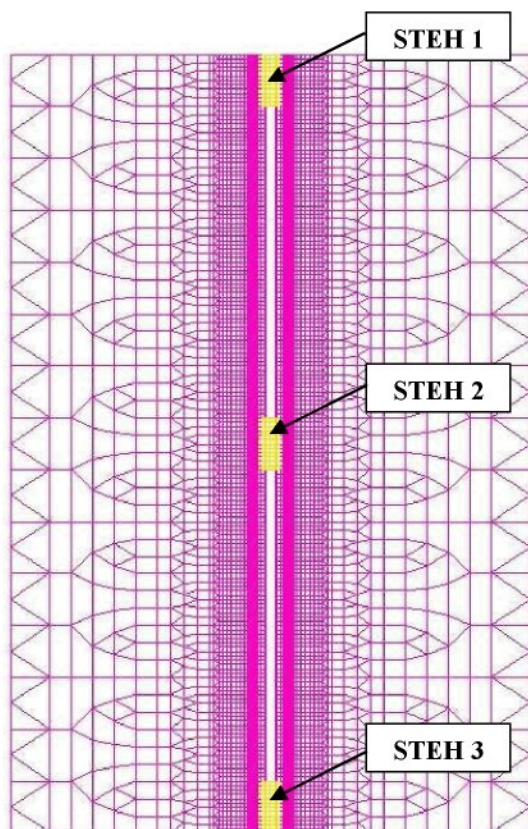
9.4.2. Vliv stehování

Z důvodu zjištění vhodnosti či nevhodnosti stehování vzorků před svařováním bylo provedeno několik simulačních výpočtů, a to:

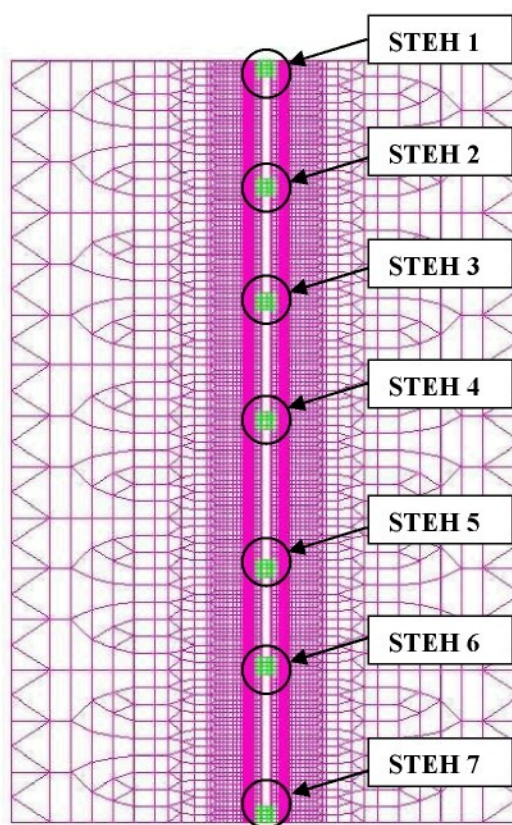
- Simulace pro model bez stehů
- Simulace pro dva a tři stehy (délka stehu 10 mm)
- Simulace pro tři pět a sedm stehů (délka stehu 5 mm)

Stehy tedy měli délku buď 5 nebo 10 mm na modelu plechu délky 180 mm. Obr. 9.11 ukazuje výpočtový model pro variantu se třemi stehy o délce 10 mm a obr. 9.12 variantu se sedmi

stehy o délce 5 mm. Všechny simulace byly vyhodnoceny programem MOVYPRO 07. Jako nejvýhodnější z hlediska počtu kritických míst byla simulace se třemi stehy o délce 5 mm. S ohledem na již známé chování aluminidu z předešlého výzkumu tohoto materiálu na katedře můžeme konstatovat, že s tak krátkými stehy by s největší pravděpodobností došlo k prasknutí stehu během svařování. Při svařování má totiž tento materiál velkou tendenci se křížit přes sebe. To se potvrdilo i při simulacích s různým způsobem upnutí.



Obr. 9.11 Model se třemi stehy



Obr. 9.12 Model se sedmi stehy

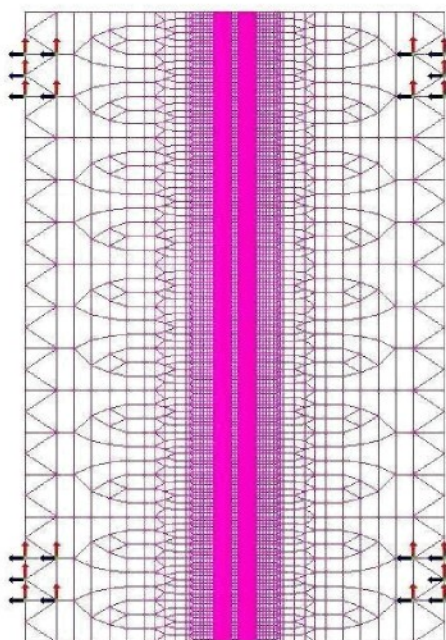
9.4.3. Simulace různého způsobu upnutí

Ke zjištění správné varianty upnutí vzorků při svařování bylo opět provedeno několik simulačních výpočtů. Posuzované varianty byly:

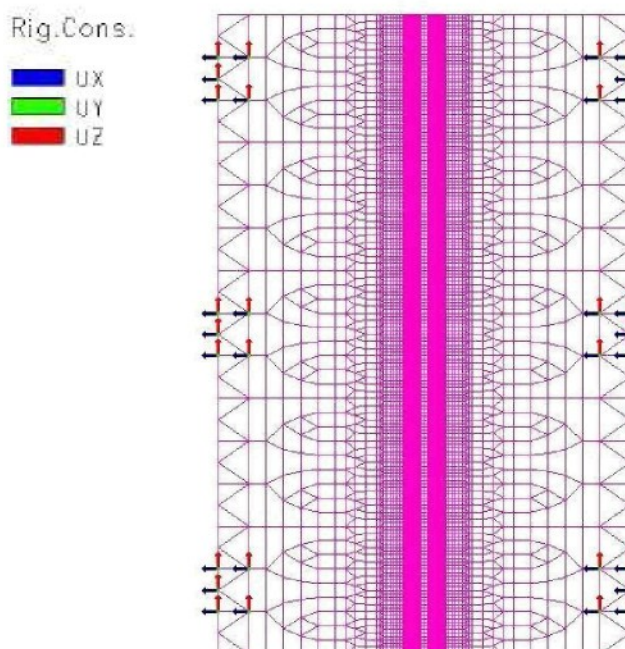
- Uchycení v rozích
- Uchycení uprostřed
- Uchycení na krajích a uprostřed zároveň

Modely a jednotlivé způsoby upnutí jsou vidět na obr. 9.13 – 9.15. Upnutí bylo řešeno ve všech případech jako upnutí s maximální tuhostí, to znamená, že nebyla brána v úvahu možnost posunutí či deformace bodů pod upínkou. Ve skutečnosti však k určité poddajnosti dochází a je proto potřeba i u simulací určitou poddajnost nastavit pomocí hodnoty tuhosti upínky.

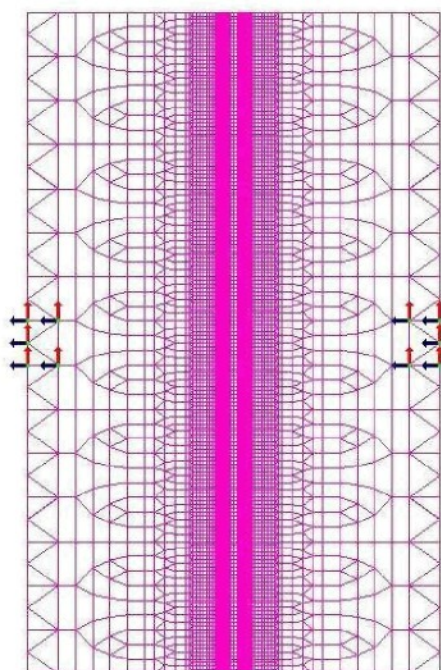
Rozměry upínky byly 12x10 mm a to s ohledem na upínací možnosti přípravku, který byl použit pro následné experimenty. Všechny simulace byly opět následně vyhodnoceny pomocí programu MOVYPRO 07. Jako nejvýhodnější s ohledem na celkový počet kritických míst během svařovacího procesu se jevila varianta s uchycením na krajích.



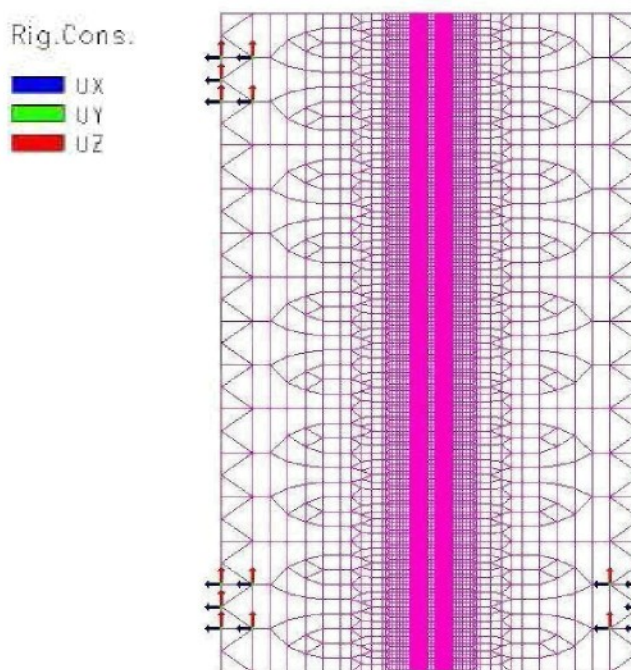
Obr. 9.13 Model s uchycením



Obr. 9.14 Model s uchycením



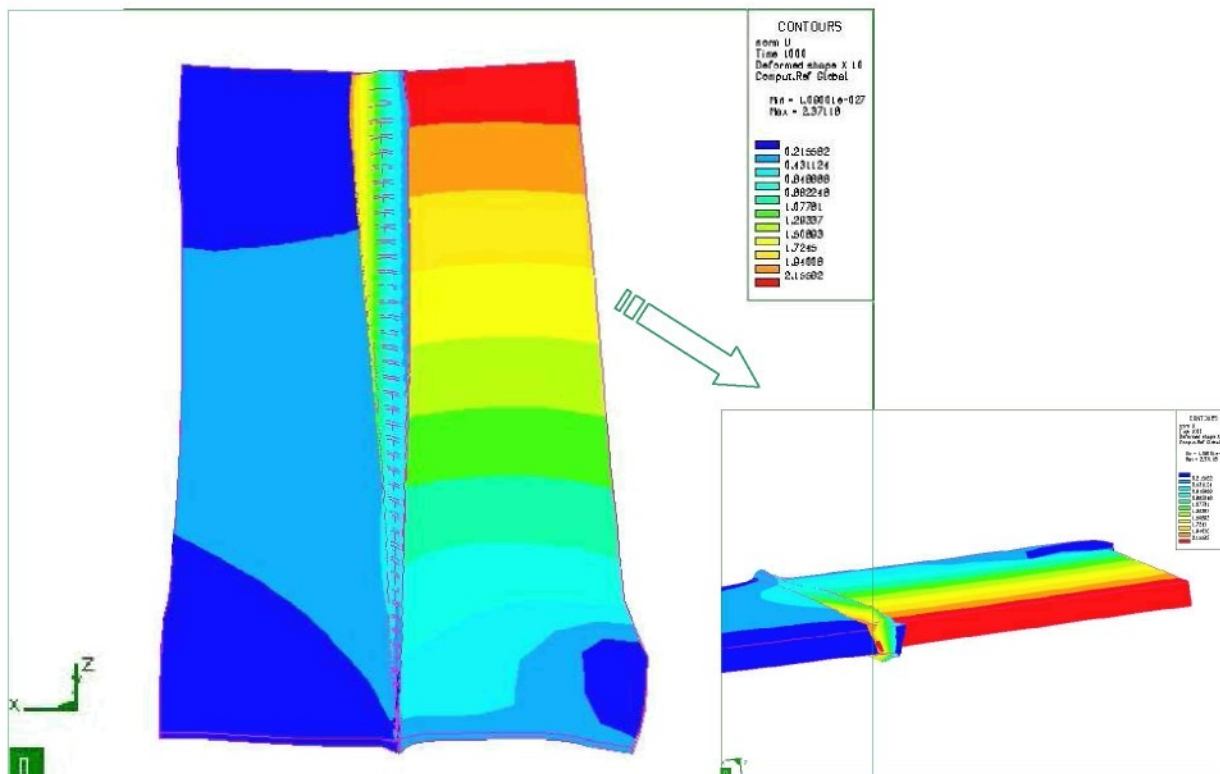
Obr. 9.15 Model s uchycením



Obr. 9.16 Model s uchycením

Další simulace byla provedena pro uchycení jen na třech místech v rozích jak ukazuje následující obr. 9.16. Cílem bylo zjistit jak se bude chovat (deformovat) volný konec desky

v průběhu svařování. Potvrdily se naše předpoklady, že při svařování se plechy kříží a mají tendenci jít ke konci svařování do sebe (zavírat svarovou mezeru) jak je vidět ze simulace na obr. 9.17, kde maximální posunutí dosahují na konci desky téměř 3 mm.



Obr. 9.17 Deformace a posunutí svarku po vychladnutí v čase 1000 s

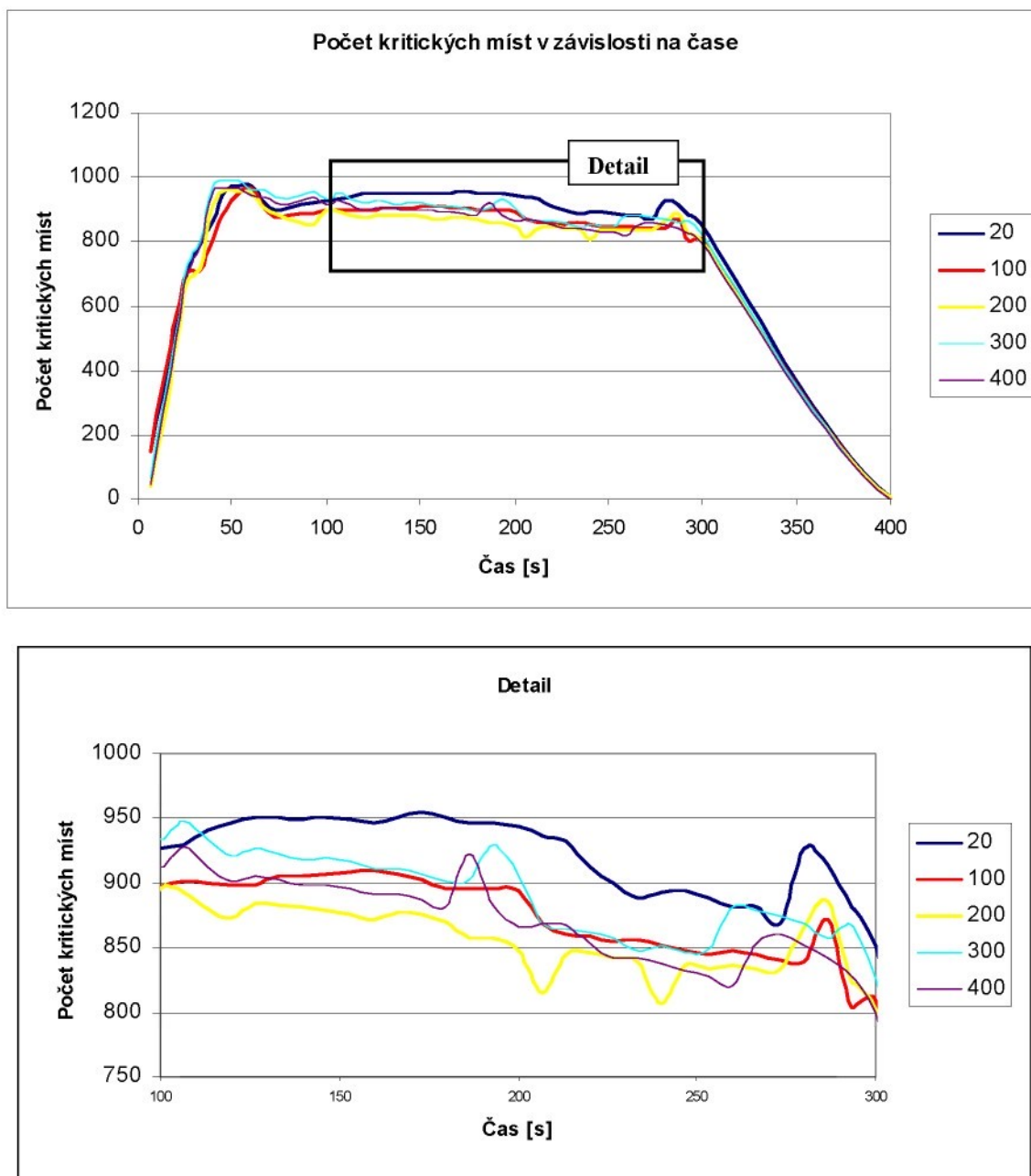
9.4.4. Simulace předehřevů

Z hlediska předehřevů byly provedeny dvě skupiny simulací a to na modelu s upnutím na krajích, který vyšel jako nejvýhodnější z předešlé části. Jedna skupina byla pro stálý předehřev, čímž bylo myšleno, že teplota je stejná v celém modelu. Druhá skupina byla provedena pro nerovnoměrný předehřev. V tomto případě šlo o skládání teplotních polí kdy byly simulovány různé průběhy teplot předehřevu a následně vkládány do simulací, jak je uvedeno v další části.

Stálý předehřev

Pro stálý předehřev bylo provedeno pět simulací a to pro teploty 20, 100, 200, 300 a 400°C. Výsledky všech simulací byly vyhodnoceny programem MOVYPRO 07 na počet kritických míst. Výstupy z programu MOVYPRO 07 pro jednotlivé teploty jsou uvedeny na obr. 9.18 - 9.22 v příloze. Na grafu na obr. 9.23 je vidět počet kritických míst v závislosti na čase pro jednotlivé teploty předehřevu. Většina kritických míst se vyskytovala v housence

nebo TOO, tedy v místech vysokých teplot, kdy mohou být výsledky zkresleny odhadováním vstupních materiálových dat (viz. kap. 7). Nejlepší z hlediska celkového počtu kritických míst se ukázaly varianty s předehřevem 200 a 400°C, a proto byly také následně použity při experimentech.

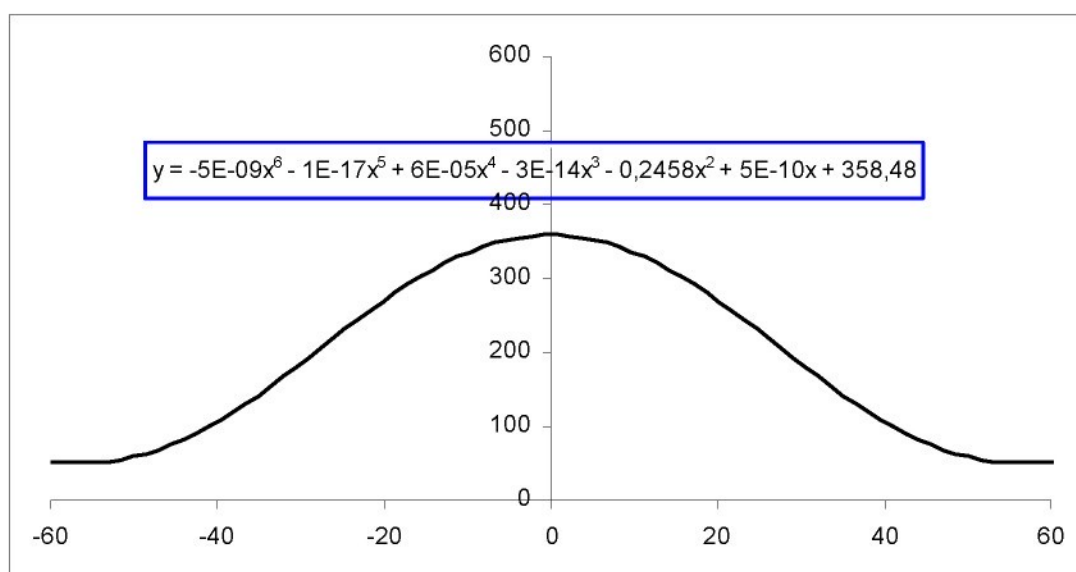


Obr. 9.23 Graf závislosti počtu kritických míst na čase včetně detailu pro stálý předehřev

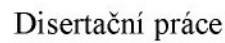
Nerovnoměrný předehřev

Pro nerovnoměrný předehřev bylo provedeno několik variant simulačních výpočtů a to: varianta s maximem 150, 250, 350 a 450°C. Postup vytváření a vkládání proměnlivého teplotního pole do simulačních výpočtů byl následující. Nejdříve bylo nutné definovat křivku charakterizující rozložení teplot v osách x a y. Nejlépe je samozřejmě vkládat přímo průběh,

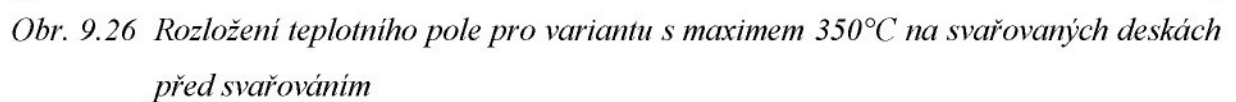
který známe např. z měření teplot při reálném experimentu. V našem případě šlo však jen o návrhy a o to jak se bude materiál chovat v případě proměnlivého předeřevu. Především jestli zde bude nějaký významný rozdíl, či lepší výsledky v porovnání se stálým předeřevem. Pro definování průběhu je třeba ho popsat pomocí polynomu nebo jiné vhodné křivky. V našem případě to bylo pomocí polynomu šestého stupně, jak je vidět na obr. 9.24, kde je varianta s maximální teplotou 350°C. Jak se rovnice dané křivky vkládá do simulačního výpočtu, konkrétně do souboru „THERM0.DAT“ je vidět na obr. 9.25. Po provedení těchto úkonů se spustí soubor „THERM0.DAT“ a proběhne výpočet do času 0.01 s. Jak vypadá teplotní pole v tomto čase, tedy před započítáním vlastního svařování je vidět na obr. 9.26. Průběh křivek pro ostatní varianty tedy 150, 250 a 450 je uveden na obr. 9.27 - 9.29 v příloze, včetně zápisu do systémového souboru „THERM0.DAT“ jenž je vidět na obr. 9.30 - 9.32.



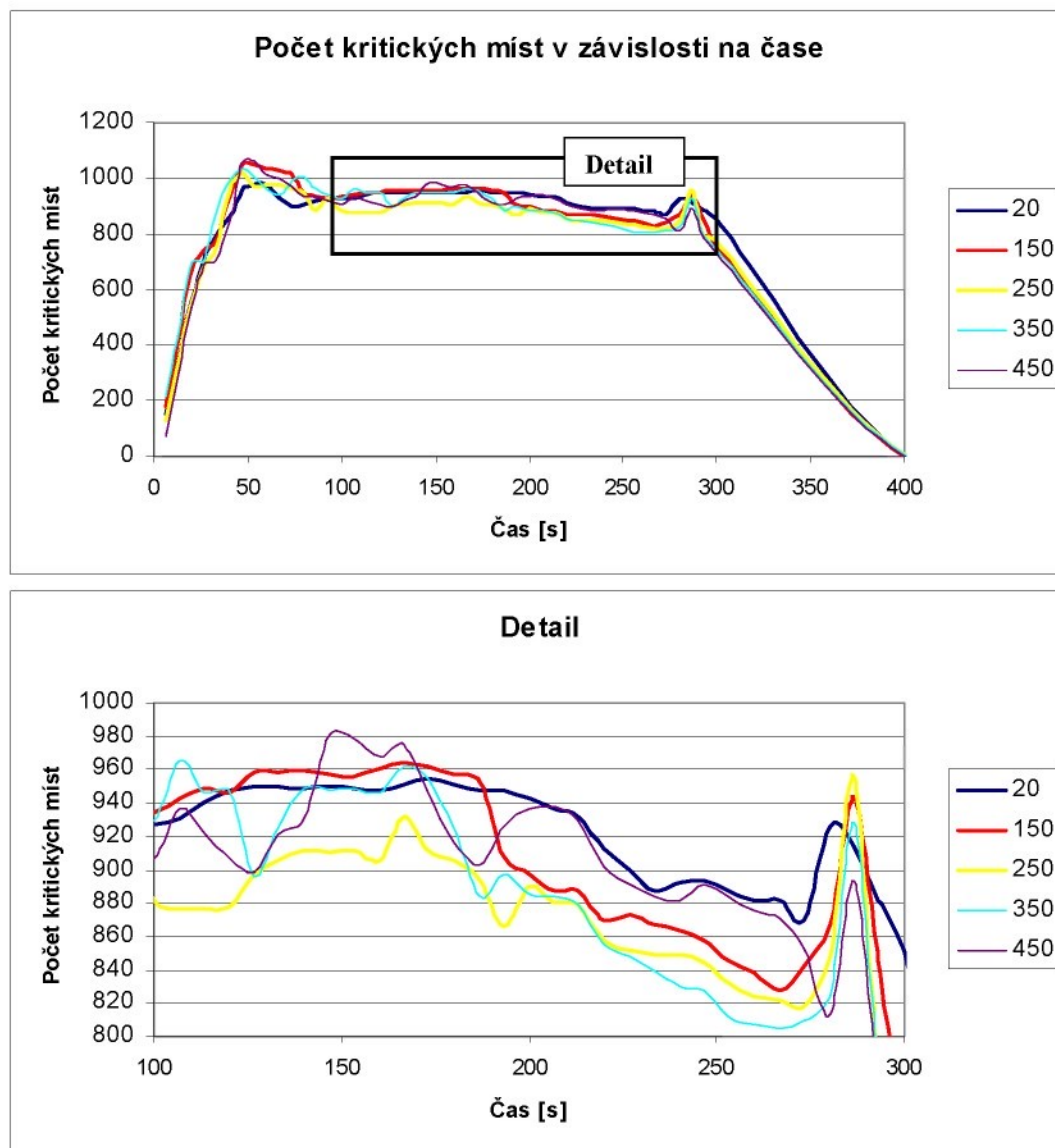
Obr. 9.24 Křivka průběhu teplotního pole a rovnice křivky



Obr. 9.25 Zápis polynomu do souboru „THERM0.DAT“



Všechny výpočty byly opět vyhodnoceny programem MOVYPRO 07. Výstupy z programu pro všechny varianty jsou uvedeny na obr. 9.33 - 9.36 v příloze. Z provedených simulací se nejlépe jevíly varianty s maximální teplotou 250 a 350°C jak ukazuje graf a jeho detail na obr. 9.37. Počet kritických míst byl však v obou případech vyšší než u stálého přehřevu.

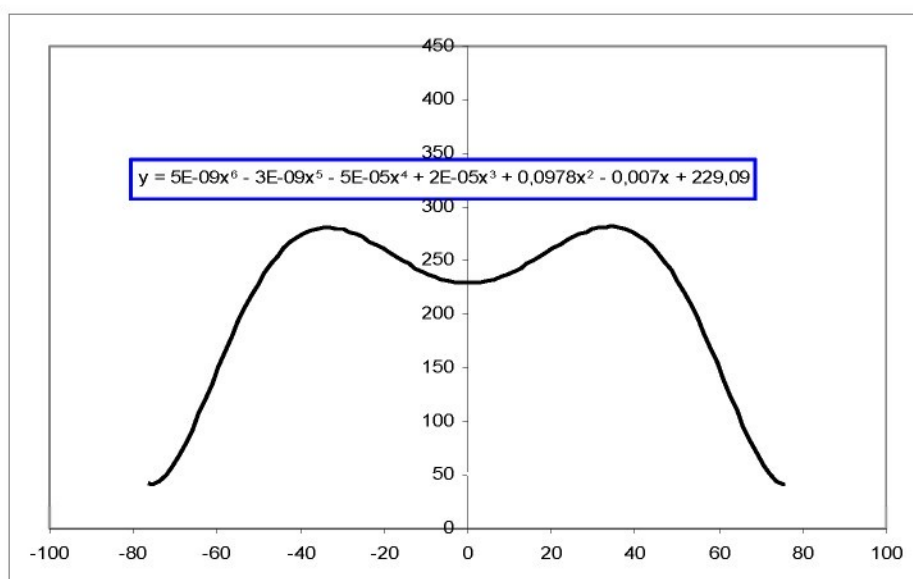


Obr. 9.37 Graf závislosti počtu kritických míst včetně detailu pro různé varianty nerovnoměrného přehřevu

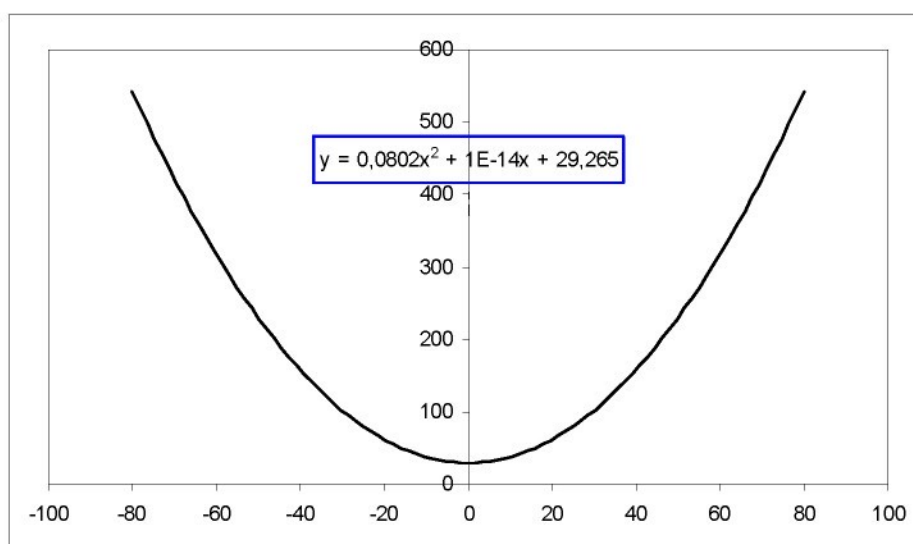
Další varianty přehřevů

Jako další možné varianty přehřevu byly provedeny simulace pro tři případy. První případ s nerovnoměrným přehřevem a dvěma maximy teplot podle průběhu křivky na obr. 9.38, výsledné teplotní pole na obr. 9.40, přičemž postup byl identický jako u nerovnoměrného přehřevu. V druhém případě to byl přehřev s rostoucí teplotou směrem ke krajům podle křivky na obr. 9.39, výsledné teplotní pole na obr. 9.41. Pro třetí případ to

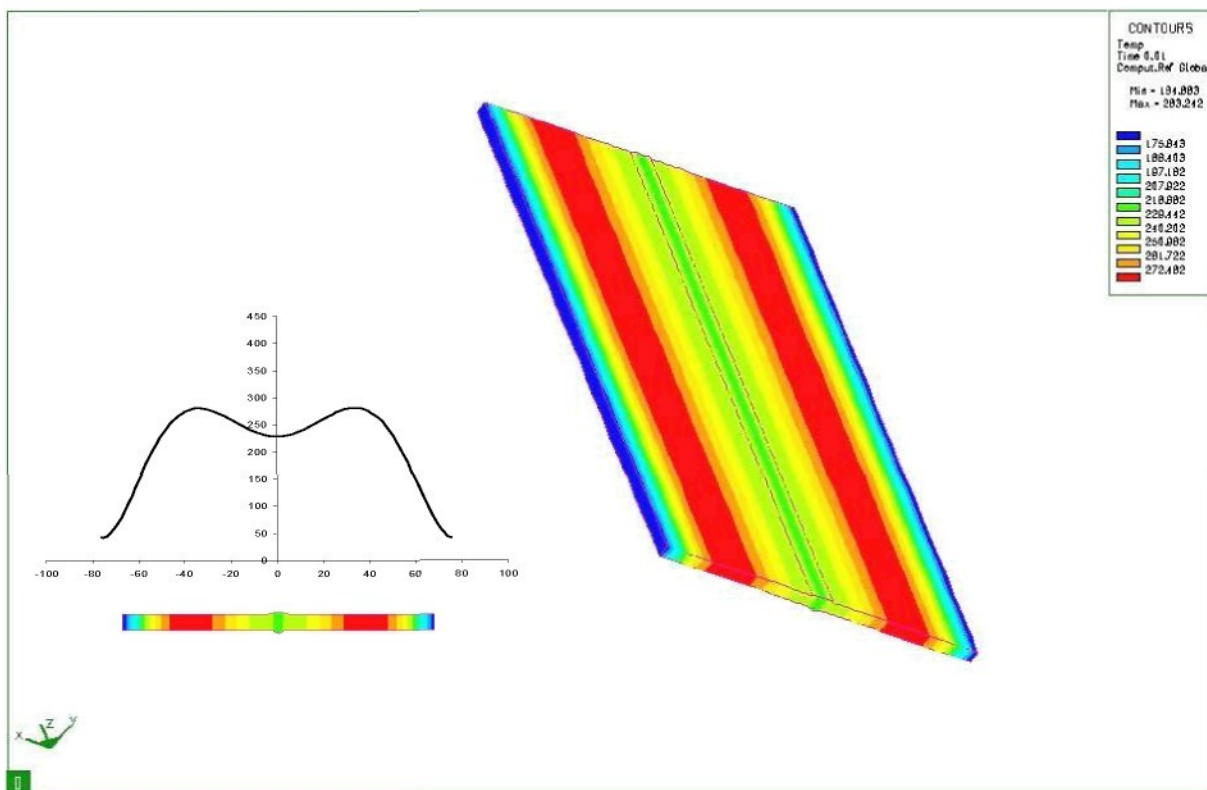
byly dva pohybující se ohřivací zdroje simulující pohyb dvou hořáků. Tyto hořáky se pohybovaly stejnou rychlostí jako zdroj tepla jak je vidět na obr. 9.42. Průběh teploty v příčném řezu v okamžiku průchodu zdrojů tepla (pro čas 153,333 s) je vidět na obr. 9.43. Výsledky simulací byly jako u každého z uvedených případů podrobeny vyhodnocení programem MOVYPRO 07 na počet kritických míst. Výstupy z programu MOVYPRO 07 pro všechny tři řešené případy jsou vidět na obr. 9.44 a 9.46 v příloze. Výsledný počet kritických míst v závislosti na čase je vidět z grafu na obr. 9.47.



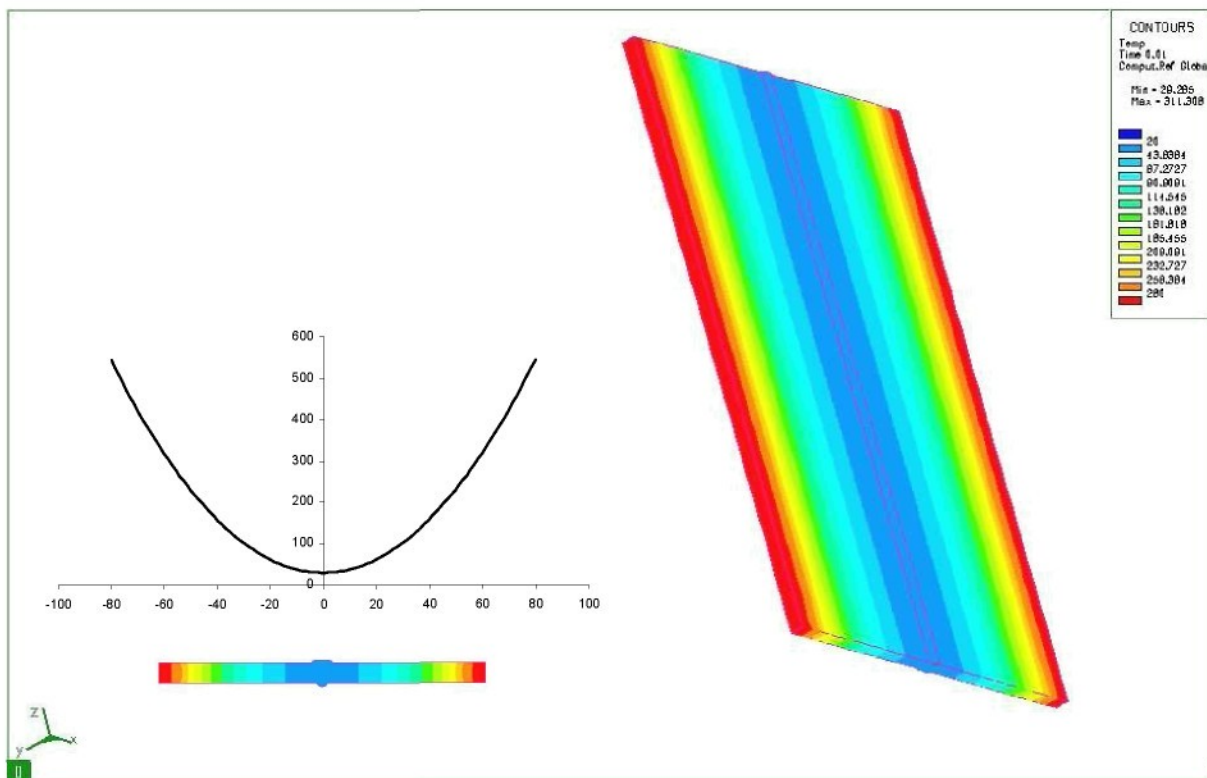
Obr. 9.38 Křivka průběhu teplotního pole a rovnice křivky (případ 1)



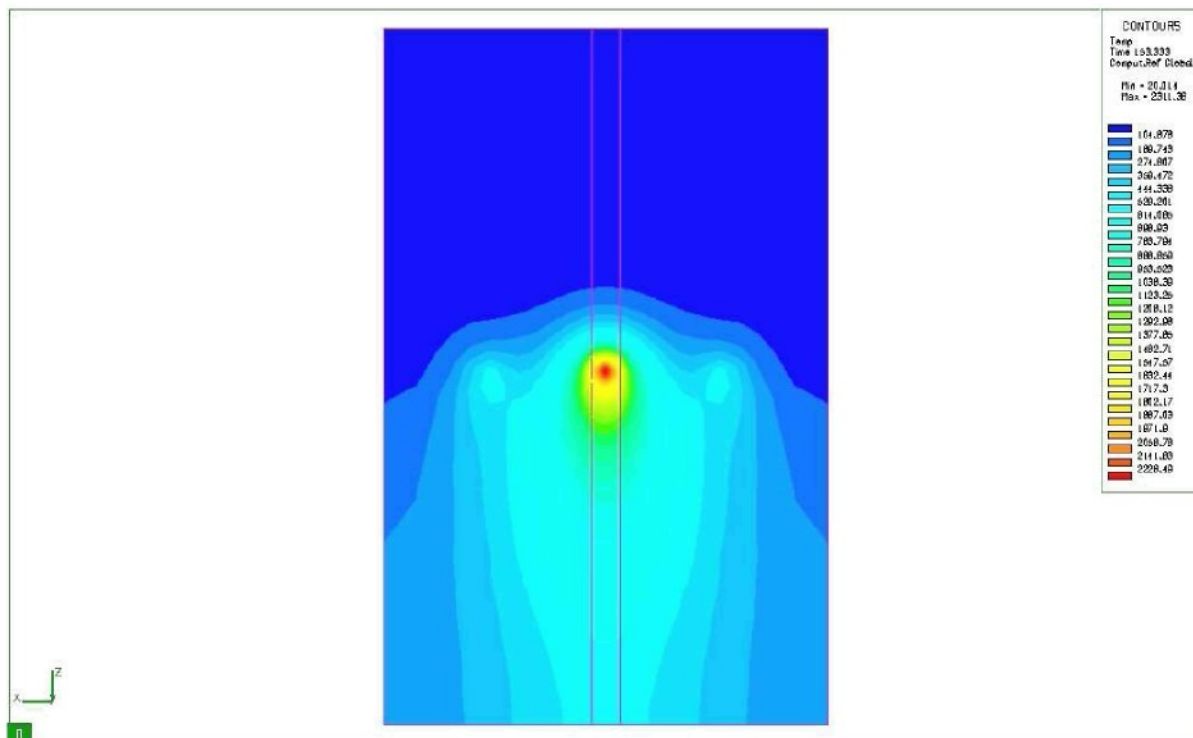
Obr. 9.39 Křivka průběhu teplotního pole a rovnice křivky (případ 2)



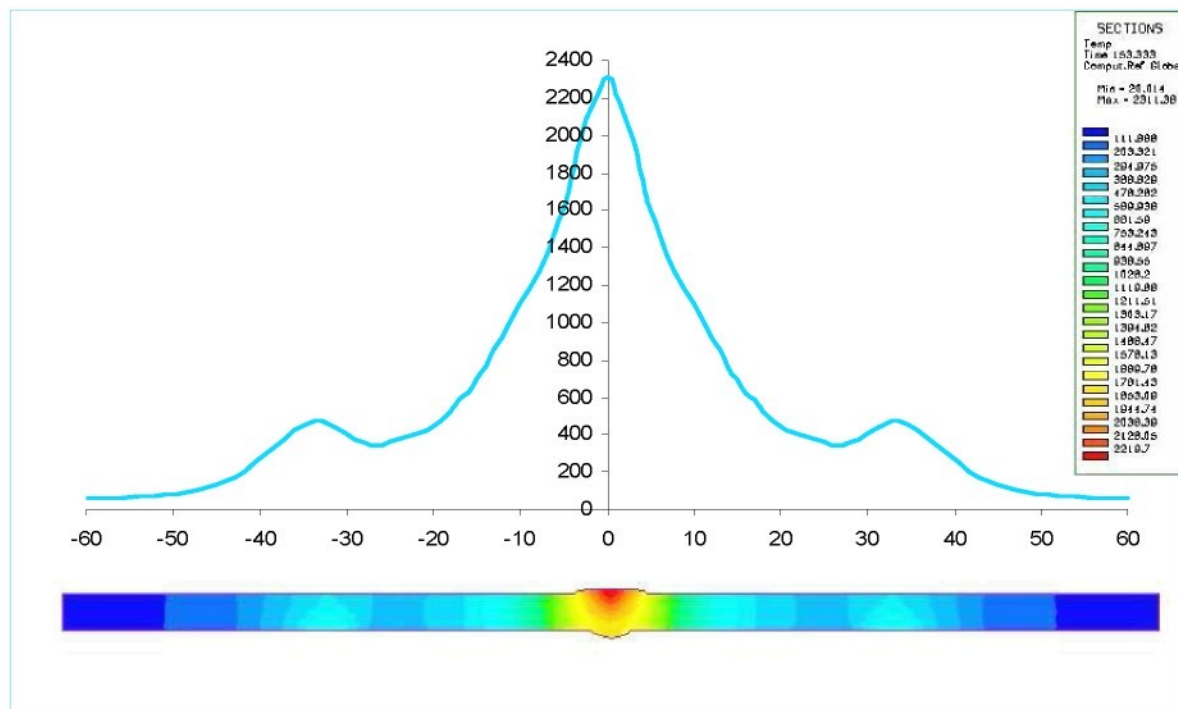
Obr. 9.40 Rozložení teplotního pole na modelu desky (případ 1)



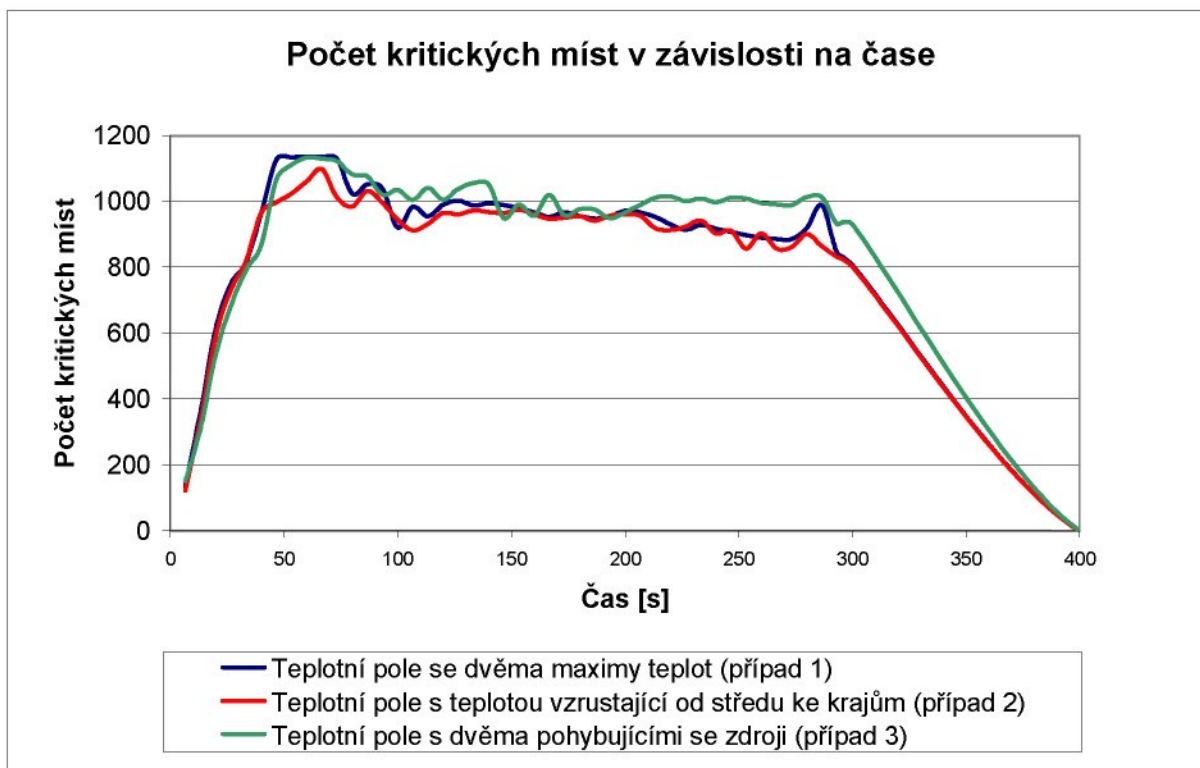
Obr. 9.41 Rozložení teplotního pole na modelu desky (případ 2)



Obr. 9.42 Teplotní pole na povrchu desky předehřívané dvěma pohybujícími se zdroji v čase kdy je zdroj tepla zhruba v polovině svařovacího procesu



Obr. 9.43 Křivka charakterizující rozložení teplot v řezu při průchodu zdrojů



Obr. 9.47 Graf závislosti počtu kritických míst na čase pro dva případy proměnlivého předehřevu

Při uplatnění simulačních výpočtů se zahrnutím reálných výsledků experimentů je nutno ve vybraných místech změřit časové průběhy teplot a tyto výsledky implementovat do simulačního programu SYSWELD. Parametry teplotního pole lze určit na základě stanovení časových průběhů teplot pomocí termočlánků nebo i s použitím termovize. Výsledné křivky teplotního pole je pak nutné matematicky popsat a zadat do výpočtového souboru simulačního programu SYSWELD způsobem, který je popsán v této kapitole. Poté je již možné simulovat jakýkoliv reálný tvar teplotního pole předehřevu.

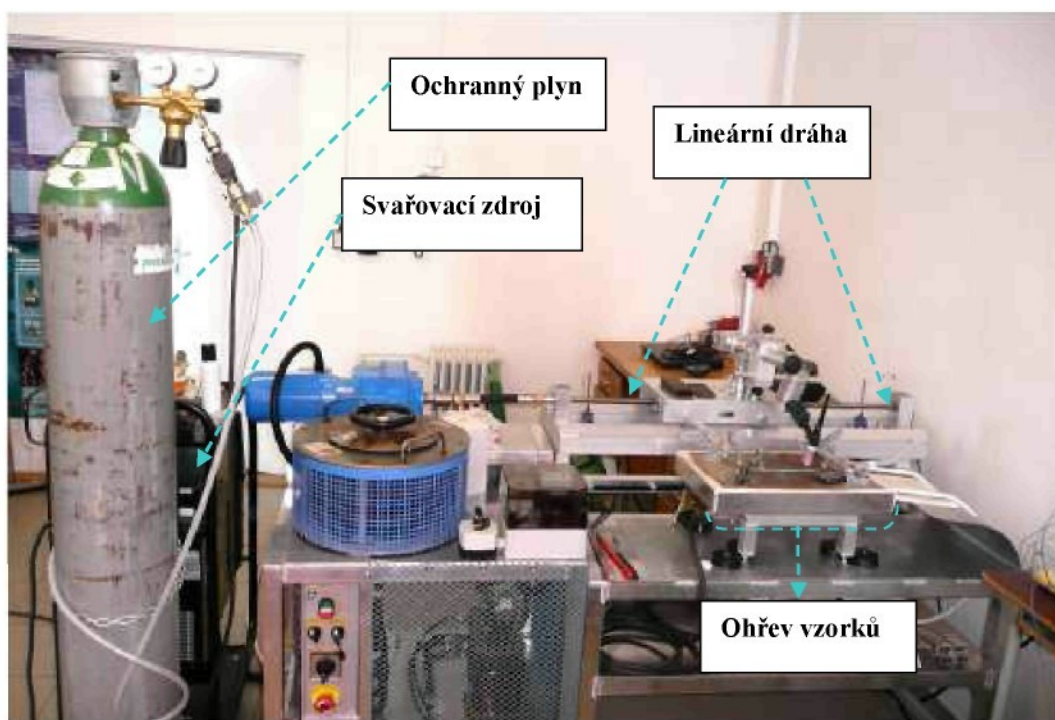
9.5. Reálné experimenty

Cíle provedených experimentálních prací byly následující:

- Ověřit postupy navržené pomocí simulačních výpočtů v předchozí kapitole.
- Odzkoušet vhodné svařovací parametry pro konkrétní případy včetně jejich monitorizace programem WeldMonitor.
- Zjistit reálné chování materiálu při svařování.
- Změřit teplotní pole během svařování a zbytkové napjatosti po svařování a porovnat výsledky se simulačními výpočty.

9.5.1. Svařovací pracoviště

Všechny vzorky byly svařovány na pro tyto účely nově vytvořeném pracovišti na katedře strojírenské technologie. Součástí pracoviště byl svařovací zdroj pro TIG svařování NAVIGATOR 3000 AC/DC, pojezd hořáku, láhev s ochranným plynem, zařízení pro ohřev vzorku a snímací zařízení pro snímání teplot a monitorizaci svařovacích parametrů WeldMonitor 3.5. Vše je vidět na následujícím obr. 9.48.



Obr. 9.48 Svařovací pracoviště s vyznačením jednotlivých komponentů

Svařovací zdroj

Ke svařování byl použit svařovací zdroj Navigator 3000 AC/DC-V od firmy Migatron. Jde o třífázové investorové zařízení s maximálním svařovacím proudem 300A. Digitální řízení umožňuje velmi rychlou odezvu na veškeré změny při procesu svařování. Zdroj obsahuje širokou škálu svařovacích programů pro různé typy svařovaných materiálů, ochranných plynů a přídavných materiálů. Dále je vybaven pojezdovým vozíkem pro snazší manipulaci. Hořáky jsou již od výrobce vybaveny regulací svařovacího proudu přímo z rukověti hořáku a integrovaným modulem vodního chlazení. Způsob ovládání a základní parametry svářečky jsou uvedeny v tab. 13 a na obr. 9.49.



Tab. 13 Základní parametry svářečky

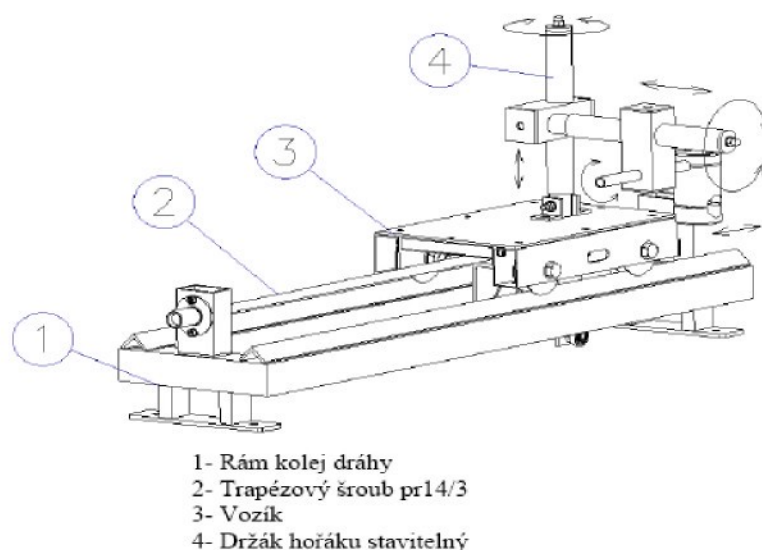
Navigátor 3000 AC/DC	
Napájecí napětí	3x400 V $\pm$ 15%
Jištění	16 A
Zatěžovatel 25% při 40°C	300 A/32 V
Zatěžovatel 60% při 40°C	240 A/29,6 V
Zatěžovatel 100% při 40°C	190 A/27,6 V
Maximální napětí oblouku	36 A/300 V
Napětí naprázdno	80 V
Proudový rozsah AC	5-300 A
Proudový rozsah DC	5-300 A
Označení	S
Krytí	IP 23
Norma	EN 60974-1, EN 50199
Rozměr (vxšxd)	583x300x698 cm
Hmotnost	38 kg



Obr. 9.49 Svářečka Navigátor 3000 a způsob ovládání

Lineární dráha pro pohyb hořáku

Lineární dráha byla navržena tak, aby odpovídala požadavku na nízké svařovací rychlosti, které se při svařování aluminidů používají. Pojezd je poháněn elektromotorem. Potřebná rychlost se nastavuje změnou otáček motoru (frekvenčním měničem). Pro náš případ to byla rychlost 0,6 mm/s a jí odpovídající frekvence 40Hz. Vztah mezi rychlostí posuvu a frekvencí měniče je možné sledovat v tabulce tab. 14. Popis jednotlivých částí dráhy je na obr. 9.50.



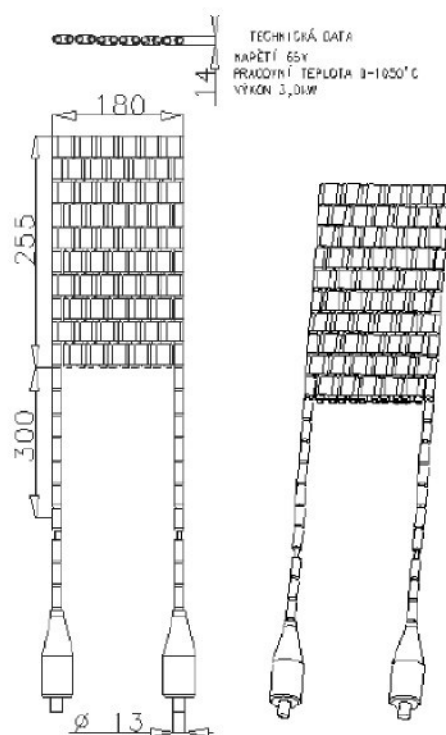
Obr. 9.50 Jednotlivé části lineární dráhy pro posuv hořáku

Tab. 14 Závislost rychlosti posuvu na frekvenci měniče

Frekvence [Hz]	Otáčky [1/min]	Rychlost v_s [mm/s]
10	3	0,15
15	4,5	0,225
20	6	0,3
25	7,5	0,375
30	9	0,47
35	10,5	0,525
40	12	0,6
45	13,5	0,675
50	15	0,75
60	18	0,9
100	30	1,5

Zařízení pro předehtřev vzorků

Pro předehtřev vzorků byla použita topná dečka s topným vláknem (obr. 9.51), o rozměrech 180x255x300/11 mm. Tato topná dečka předehtřívala desku z oceli X8CrNiTi18-10 (17248) o rozměrech 250x400/20 mm a je na obr. 9.52. Deska sloužila k akumulaci tepla a k jeho rovnoměrnému rozložení. Na desku byly pomocí svařovacích upínek připevněny vzorky, které byly následně svařovány.



Obr. 9.51 Keramická topná dečka s topným vláknem



Obr. 9.52 Ocelová předehtřivací deska

Měření teplot termočlánky

Během prvních testů zařízení pro ohřev bylo potřeba zjistit dobu, která je nutná k dosažení stanovených teplot a jejich následné regulaci. Například během výměny vzorků. Dále bylo důležité soustředit se na určité hodnoty teplot vzhledem k následným experimentům. Předpokládaly se teploty přehřevu 200°C a 400°C. Z tohoto důvodu byl stanoven čas náběhu na tyto maximální teploty. Termočlánky se umístily symetricky od osy ohřívací desky pod upínky (obr. 9.53). Po dokončení testu rychlosti náběhu a při ohřevu na uvedené teploty, se určilo vhodné nastavení autotransformátoru pro udržování teplot. Ovšem během zkoušek se termočlánky svařovaly přímo na vzorky do oblasti teplem ovlivněného pásma. Termoelektrické napětí z termočlánků se měří a údaje se přenáší přímo do počítače prostřednictvím WeldMonitoru. U zkušebních svarů se měření provádělo čtyřmi termočlánky. Termočlánky se přivařily k plechu pomocí kondenzátorové svářečky na předem zvolená místa. Před přímým účinkem svařovacího oblouku během vlastního měření se termočlánky překryly stínícím plechem.



Obr. 9.53 Rozmístění termočlánků na svařovací desce při měření teploty

9.5.2. Svařování zkušebních vzorků

Výchozí polotovary pro svařování vykazovaly z výrobního procesu různé odchylky od rovinného tvaru (prostorové deformace způsobené válcováním a nedokonalým vyrovnáním). Vzorky bylo před svařováním nutno pečlivě vybrat. Naší snahou bylo, aby svar byl pokud

možno na rovné ploše, případné nerovnosti vzorků se odstranily opatrným broušením hrncovou bruskou. Dalším krokem bylo odstranění oxidů v oblasti svaru a v místě budoucího přivaření měřících termočlánků drátěným kartáčem z nerezavějící oceli, případně brusným či lamelovým kotoučem. Čistění probíhalo tak, aby se polotovary co nejméně ohřály a ovlivnila se hladina vnitřního pnutí. Během experimentu bylo zjištěno, že některé vzorky obsahují v povrchových trhlinách zbytky oleje z lázně, ve kterých se ochlazovaly po dokončení válcování. Před svařováním se nečistění odstranilo vypálením v peci při teplotě 450°C po dobu jedné hodiny.

První ověřovací zkoušky se realizovaly na vzorcích, které byly menší než finální zkušební kusy. Bylo to z důvodu nedostatku materiálu. Použité polotovary byly opětovně připravovány k dalším testům stejným postupem.

V prvních testech byla posuzována vhodnost použití střídavého proudu analogicky, stejně jako u slitin na bázi Al, kde povrch materiálu je pokryt vrstvou oxidu hliníku. Oblouk byl však díky střídání polarit a hodně zoxidovanému povrchu nestabilní. Povrch vzorků má příliš odolnou vrstvu oxidů, kterou bylo potřeba předem odstranit.

Na základě předchozích zkoušek se v další zkoušce ověřovala, vhodnost použití stejnosměrného proudu s přímou polaritou a pečlivé odstranění oxidů před svařováním u vzorků v oblasti svaru. Přímá polarita šetří elektrodu a nedochází ke vzniku kaloty na jejím konci. Teplo se u přímé polarit rozděluje přibližně v poměru 1/3 na elektrodě a 2/3 jdou do materiálu, proto je vyšší průvar. Celý proces je více stabilní, oblouk hoří klidně. Při prvních svařovacích experimentech bylo zjištěno, že vysokofrekvenční zapalování nepříznivě ovlivňuje činnost monitorovacího systému. Docházelo k neustálým výpadkům záznamového zařízení. Tento problém byl vyřešen přechodem na dotykové zapalování. Nejspolehlivější zapálení oblouku bylo nakonec dosaženo použitím pomocné grafitové elektrody, zajišťující počáteční zkrat mezi základním materiálem a wolframovou elektrodou.

Tupé spoje byly svařovány přímo na ohřívací desce v poloze PA podle ISO 6947. Pokud nebyla zajištěna ochrana kořene svarů, nespojoval se natavený materiál a vznikaly vady kořene. Bylo zřejmé, že to způsobují oxidy, vznikající na nechráněné straně vzorku. Zajistit ochranu kořene přívodem ochranné atmosféry by však bylo problematické a bylo by nutné provést úpravy na přípravku. Proto bylo pro zajištění ochrany svaru v kořeni a formování svaru použito dostupné bazické tavidlo F 205 (OK Flux 10.47) od firmy ESAB, určené pro svařování pod tavidlem. Po aplikaci tavidla došlo k výraznému zlepšení a kořen byl uspokojivý. Po svařování byl realizován již ověřený postup s dohřevem v peci a pomalým chladnutím v peci do teploty alespoň 100°C. Tento postup zabránil i šíření vad, které již v materiálu byly před svařováním a vlivem pnutí se mohly dále šířit.

Každý realizovaný zkušební svar se prováděl na polotovarech, které neměly standardní rozměry z hlediska dalších zkoušek. Jednalo se vesměs o odřezky a zbytky. Ovšem pro určení základních parametrů procesu byly vyhovující. Většinou byly kratší než vzorky, které byly připraveny pro další práce. Vzhledem k obtížnému získávání materiálu bylo potřeba ho maximálně využít. Proto nebylo výjimkou, že se materiál po svaření opět rozdělil a znovu svařil.

9.5.3. Svařování vzorků

Svary byly provedeny jako tupé v poloze PA podle ISO 6947 na jednu housenku a bez přídavného materiálu. Všechny vzorky byly svařovány stejnosměrným proudem a přímou polaritou. Použité svařovací parametry byly zjištěny a předem odzkoušeny při svařování zkušebních vzorků. Vzorky byly stejně jako ty zkušební očištěny od zoxidované vrstvy v místě svaru opatrným broušením. Dále byly vzorky opatřeny termočládky (NiCr - Ni) a před samotným svařením předehřány na nerezové desce na teplotu 200 respektive 400°C s následným dohřevem v peci na 700°C ihned po jejich svaření. Ohřevová deska má v místě kořene svaru vyfrézovanou drážku o šířce 8 mm, ve které bylo umístěno tavidlo F205 (OK FLUX 10.47) pro ochranu kořene svaru.

Svar č. 1

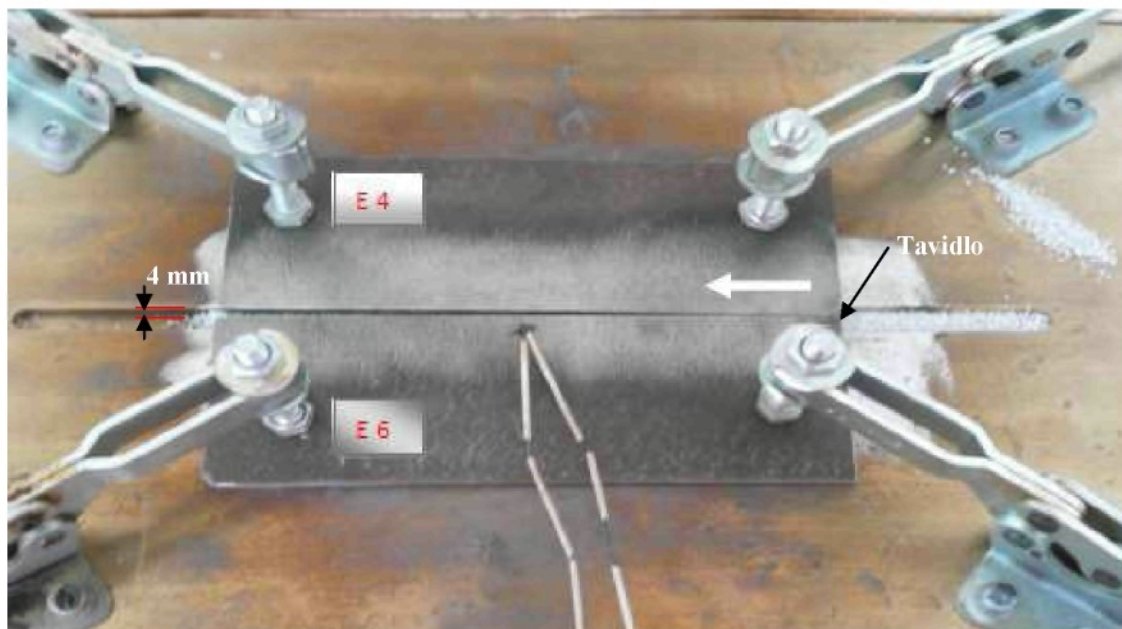
Byl vyhotoven ze vzorků s označením E4 a E6 (viz. kap. 9.1). Tyto vzorky byly upnuty na vyhřívané nerezové desce (obr. 9.54). Vzorek E6 byl upnut napevno, zatímco vzorek E4 byl upnut pevně pouze na jednom místě, a to z důvodů křížení plechů (kapitola 9.4.3). V Tab. 15 jsou uvedeny rozměry svařovaných vzorků. Tab. 16 zase ukazuje počáteční parametry svařování. Průměr elektrody WT 20 pro svařování byl zvolen 3,2 mm a bylo také použito hubice se sítkem pro lepší ochranu svarové lázně. Ochranným plynem byl Argon 4,8. Vzorek E6 byl opatřen termočládkem pro zaznamenání průběhu teploty vzdáleným od pravé hrany 90 mm a od horní hrany 6 mm. Rozevření obou vzorků na konci činilo 4 mm.

Tab. 15 Rozměry a označení vzorků

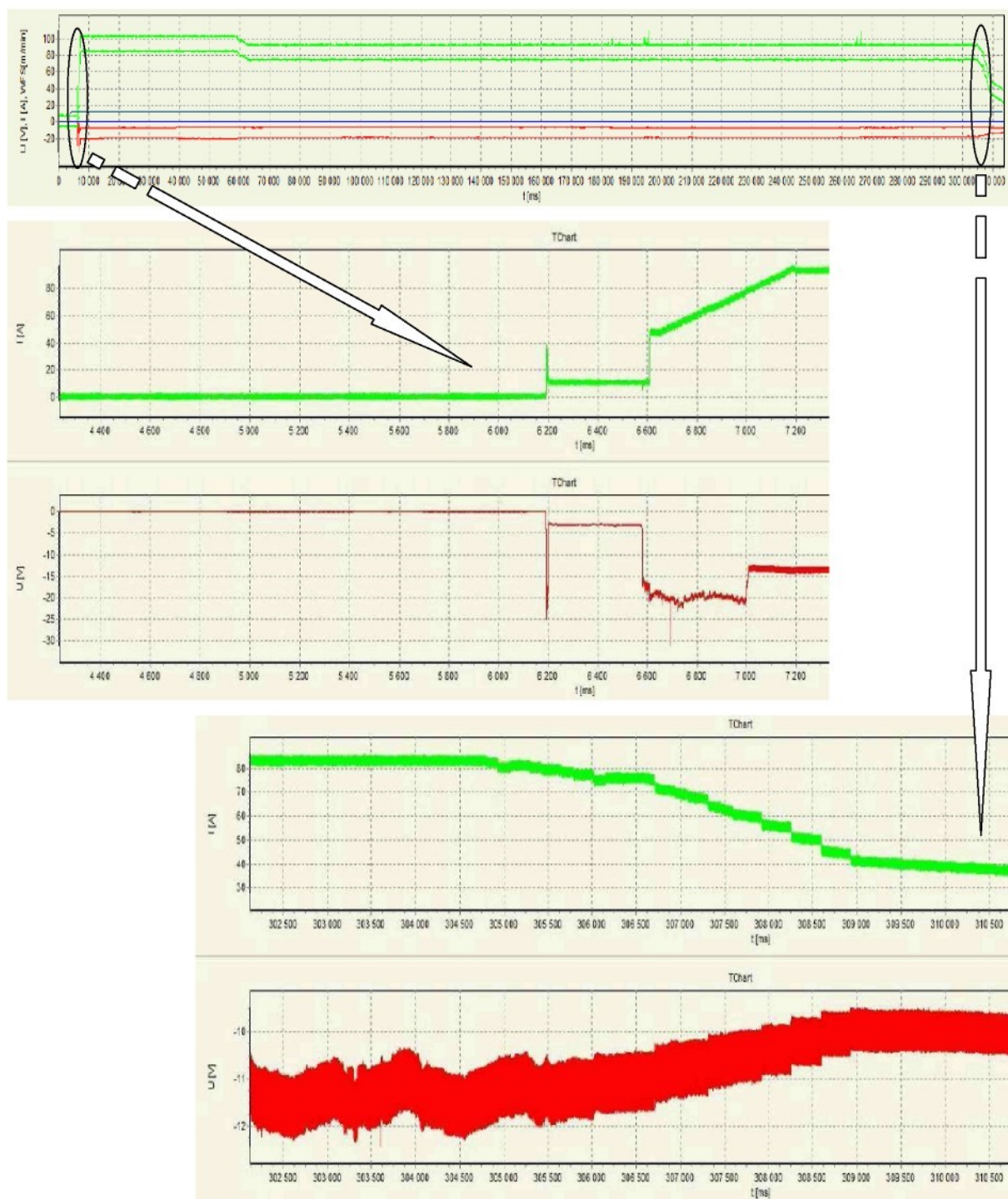
Označení vzorku	Rozměry [mm]
E4	180x60x4,5
E6	180x60x4,5

Tab. 16 Počáteční parametry svařování

Rychlost svařování [mm/s]	DC - I [A]	Průtok plynu [l/min]	Teplota předehřevu [°C]
0,6	90	12	400

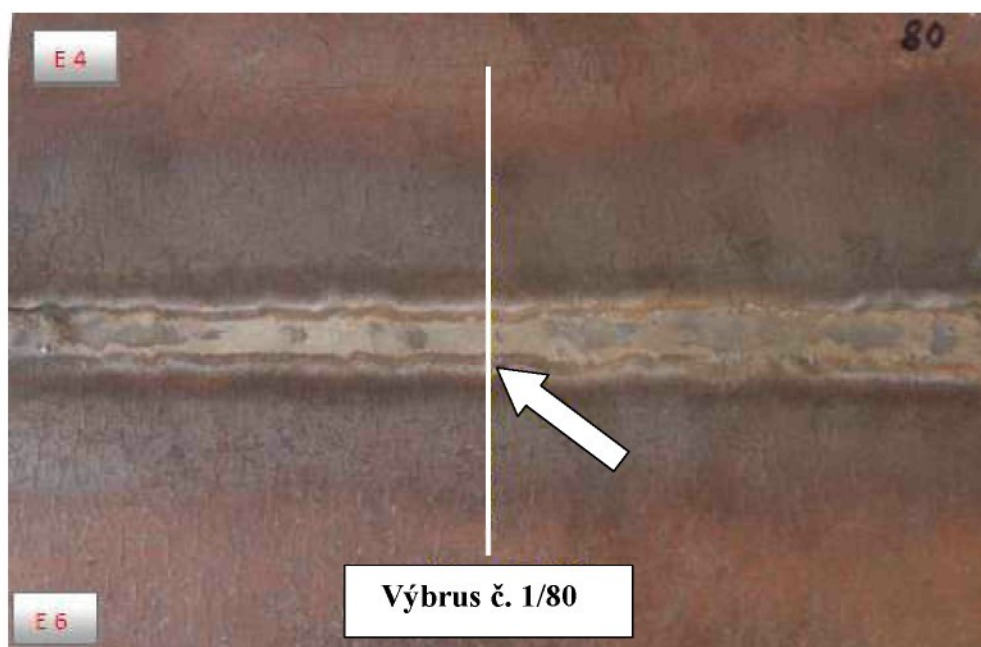
*Obr. 9.54 Vzorky před svařováním, bílá šipka značí směr svařování*

Průběh svařování byl následující. Nejdříve bylo zapnuto snímací zařízení a to v čase $t = 0$ s. Začátek svařování nastal po 7 s a rozjezd dráhy proběhl v čase $t = 15,9$ s. Po necelých 60 s měření následovalo snížení proudu z 90 A na 80 A z důvodu propadání svarové lázně. Ke konci svařování v čase $t = 305$ s následovalo další snížení proudu tentokrát na 40 A kvůli zamezení vzniku kráteru na konci svaru. K ukončení měření došlo v čase $t = 313$ s. Celkový průběh svařování včetně detailu začátku a konce svařování je vidět na záznamu z WeldMonitoru (obr. 9.55). Ihned po dokončení svařování byl svařený vzorek vložen do pece vyhřáté na 700°C a zde se ponechal 4 hodiny na výdrž při této teplotě a poté byl následně ochlazován až do jeho úplného vychladnutí za 21 hodin. Během svařování také došlo k poškození termočlánku z důvodu jeho blízkosti vůči svarové lázni.



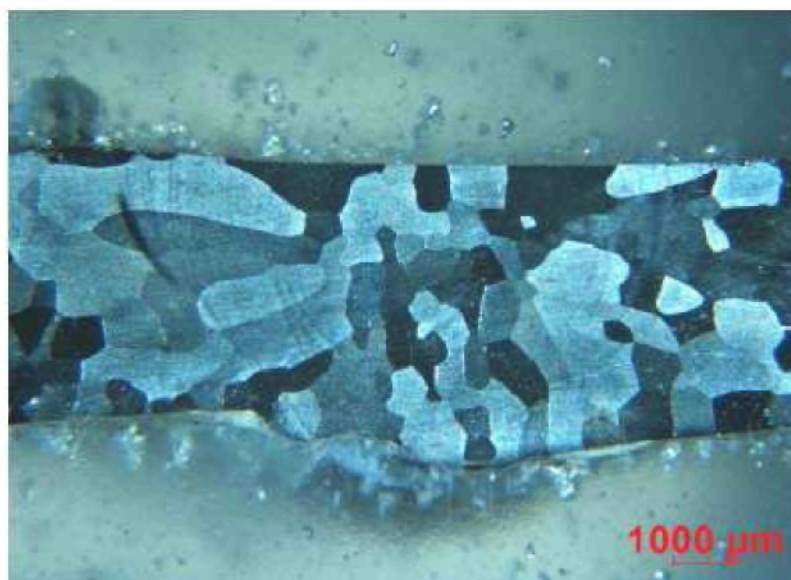
Obr. 9.55 Záznam průběhu svařovacího procesu s detaily začátku a konce svařování

Ze svařeného vzorku byly zhotoveny metalografické výbrusy. Místo odběru vzorku (bílá čára) je vidět spolu s umístěním termočlánku (bílá šipka) na obr. 9.56. Metalografická laboratoř byla vybavena optickým mikroskopem NEOPHOT 21, digitální kamerou Nikon, která byla napojena na počítač, jež je vybaven programem NIS Elements 2.3 CZ. Tento program dokáže vyhodnocovat geometrii svaru.



Obr. 9.56 Svařený kus s naznačeným místem odběru vzorku (bílá čára), umístění termočlánku (bílá šipka)

Na obrázku makrostruktury výbrusu č. 1/80 (obr. 9.57) je zřejmé, že bylo dosaženo provaření vzorku. Je zde vidět nestejnoseměrnost v provaření kořene, rovněž je svar bez převýšení. Ve středu svaru je struktura zrn jemnější oproti zbytku svaru. Ve svaru nejsou žádné další viditelné vady.



Obr. 9.57 Makrostruktura svaru výbrusu č. 1/80



Dále byl vyhodnocován teplotní průběh během svařování. Bohužel došlo k poškození termočlánku z důvodu překročení teploty, pro kterou je určen.

Následoval výpočet hodnot vneseného tepla podle vztahu (9.58). Výsledky hodnot vneseného tepla pro svar č.1 uvádí následující tab. 17.

$$Q = \eta \cdot \frac{U \cdot I}{v_s \cdot 1000} \quad (9.58)$$

kde je:

Q ... vnesené teplo [kJ/mm]

η ... účinnost oblouku - dle ČSN EN 1011-1 [32] u metody 141 $\eta = 0,6$

U ... napětí oblouku [V]

I ... proud oblouku [A]

v_s ... rychlost svařování [mm/s]

Tab. 17 Hodnoty vneseného tepla pro svar č.1

	Start		Změna 1		Změna 2	
$v_s = 0,6$ [mm/s]	I [A]	U [V]	I [A]	U [V]	I [A]	U [V]
$\eta = 0,6$	90	13,3	80	12,7	40	10,2
Q [kJ/mm]	1,197		1,016		0,408	

Svar č.2

Svar číslo dvě byl vytvořen ze vzorků D1 a D2. Vzorky byly opět upnuty na předeřívací desku. Vzorek D1 byl upnut napevno, zatímco vzorek D2 byl pevně upnut v jednom místě, aby mohlo dojít ke stažení obou vzorků při svařování (obr. 9.59). Tab. 18 uvádí rozměry svařovaných vzorků a tab. 19 počáteční parametry svařování. Průměr elektrody WT 20 pro svařování byl zvolen 3,2 mm a bylo také použito hubice se sítkem pro lepší ochranu svarové lázně. Ochranným plynem byl Argon 4,8. Vzorek D1 byl opatřen čtyřmi termočlánky pro zaznamenání teploty. Termočlánky byly umístěny od horní hrany v následujících vzdálenostech: č. 1 a č. 2 - 17 mm a č. 3 a č. 4 - 10 mm. Rozevření obou vzorků na konci činilo 5 mm.



Obr. 9.59 Vzorek složený z plechů D2 a D1 před započetím svařování

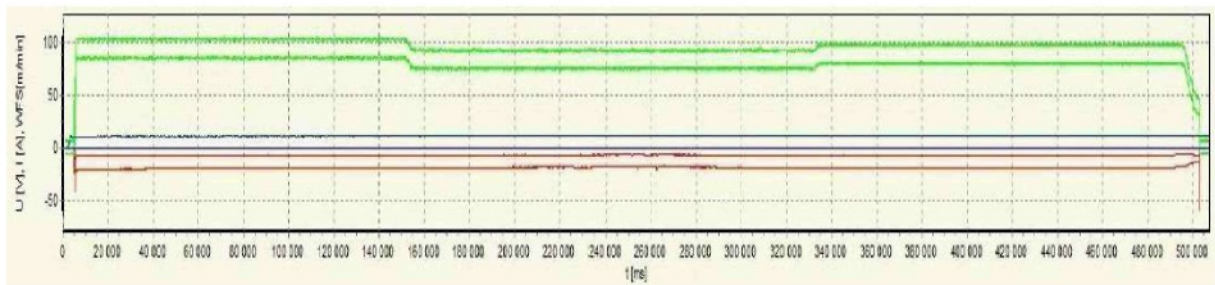
Tab. 18 Rozměry a označení vzorků

Označení vzorku	Rozměry [mm]
D1	180x50x5
D2	180x50x5

Tab. 19 Počáteční parametry svařování

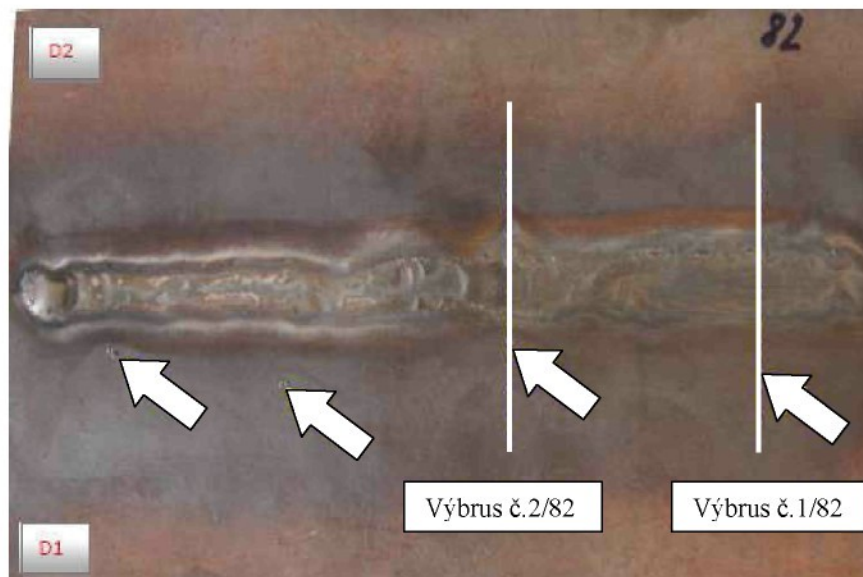
Rychlost svařování [mm/s]	DC - I [A]	Průtok plynu [l/min]	Teplota předehřevu [°C]
0,375	90	11	200

Snímací zařízení bylo zapnuto v čase $t = 0$ s. Začátek svařování byl po necelých 6 s, rozjezd dráhy nastal v čase $t = 23,9$ s. Po 152 s od začátku měření následovalo snížení proudu z 90 A na 80 A opět z důvodu šířky a propadání svarové lázně. V čase měření $t = 331$ s následovalo zvýšení proudu na 85 A, protože se zdálo, že nedochází k provaření. Ke konci svařování v čase $t = 495$ s došlo ke snížení proudu na 40 A kvůli zamezení vzniku kráteru a následovalo ukončení svařování v čase $t = 503$ s. Celkový průběh svařování je na obr. 9.60. Ihned po dokončení svařování byl svařený vzorek vložen do pece vyhřáté na 700°C a zde se ponechal 4 hodiny na výdrži při této teplotě s následným ochlazováním až do jeho úplného vychladnutí za 21 hodin.



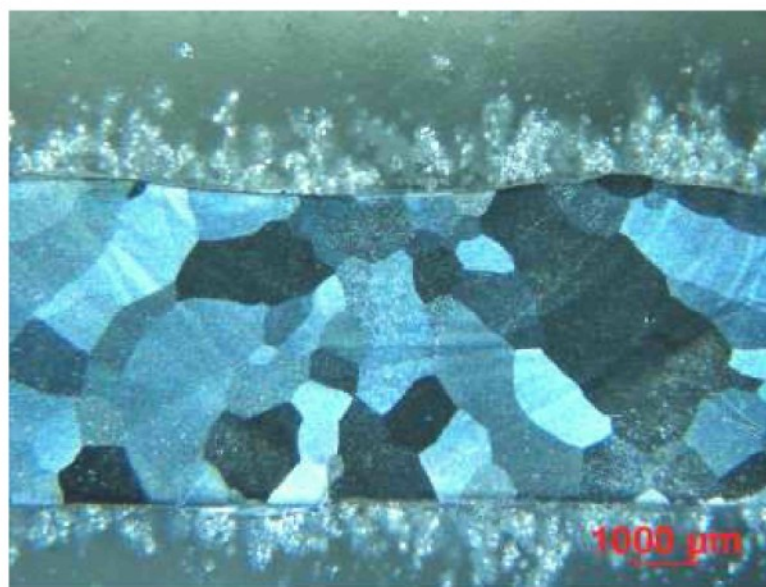
Obr. 9.60 Záznam průběhu svařovacího procesu z programu WeldMonitor

Následovalo odebrání a příprava vzorků identickým postupem jako u svaru č.1. Na obr. 9.61 jsou šipkami znázorněna umístění termočlánků a bílými čarami jsou znázorněna místa řezů pro metalografické výbrusy.

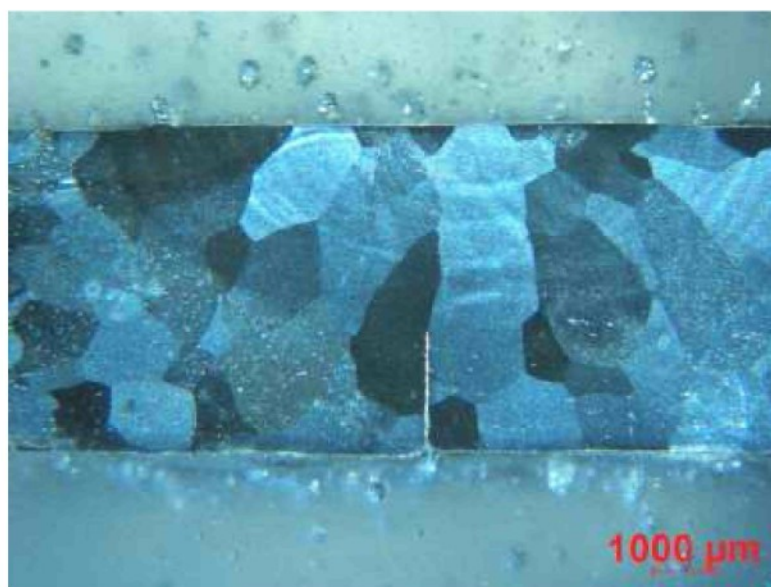


Obr. 9.61 Svařený kus s naznačeným místem odběru vzorků a umístěním termočlánků

Na obrázcích makrostruktur č. 1/82 a 2/82 (obr. 9.62 a obr. 9.63) je vidět, že ani v jednom případě nedošlo k úplnému provaření. Z obr. 9.62 je zřejmé, že k určitému provaření sice došlo, ale je zde také vidět proláklý povrch svaru, kvůli kterému byl při svařování snížen proud z 90 A na 80 A. To vedlo k ještě většímu neprovaření u výbrusu č. 2/82, kde je hrana velmi zřetelně vidět (obr. 9.63). Co se týče jemnosti zrn u výbrusu č. 1/82 je vidět, že jemnější zrna jsou v dolní a horní části svaru. Výbrusu svaru č. 2/82 je bez převýšení a jsou zde dobře viditelná hrubší zrna v celé ploše svaru. Ani u jednoho ze vzorků nejsou žádné další viditelné vady ve svaru.

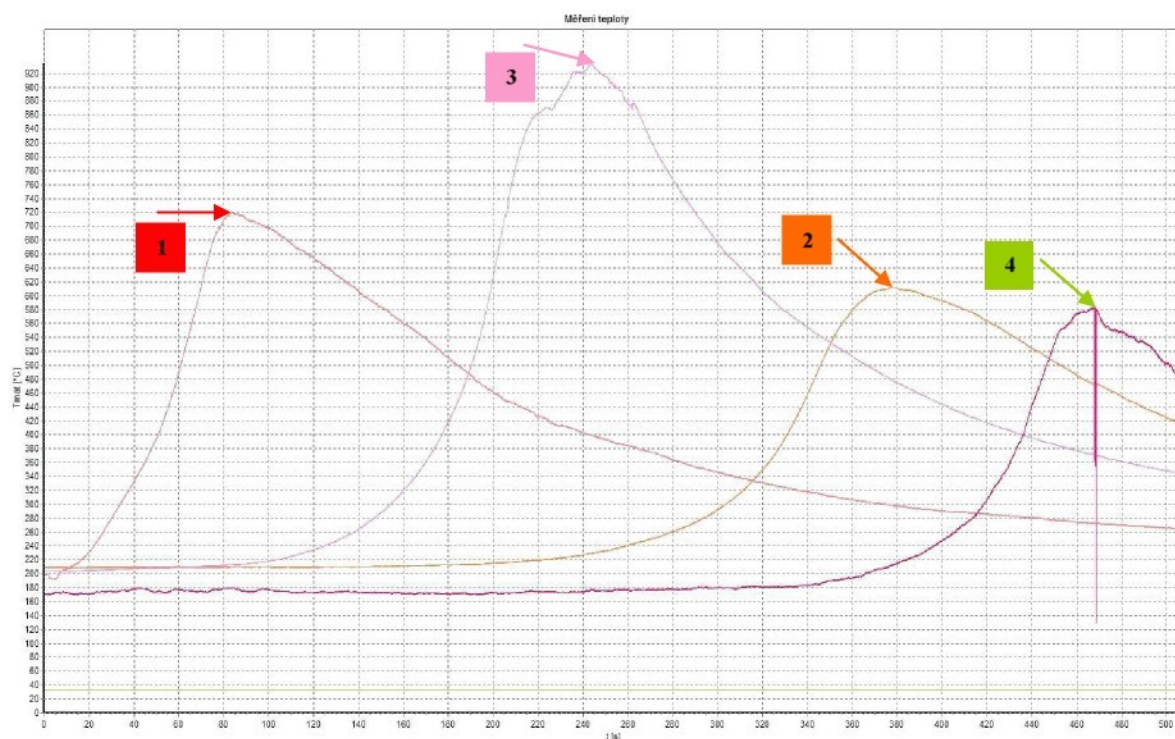


Obr. 9.62 Makrostruktura svaru výbrusu č. 1/82



Obr. 9.63 Makrostruktura svaru výbrusu č. 2/82

Stejně jako v předchozím případě byl sledován průběh teplot pomocí termočlánků. Na obr. 9.64 jsou čísla označeny termočlánky a šipkami znázorněny jejich maxima teplot.



Obr. 9.64 Průběh teplot v jednotlivých termočláncích v průběhu svařování

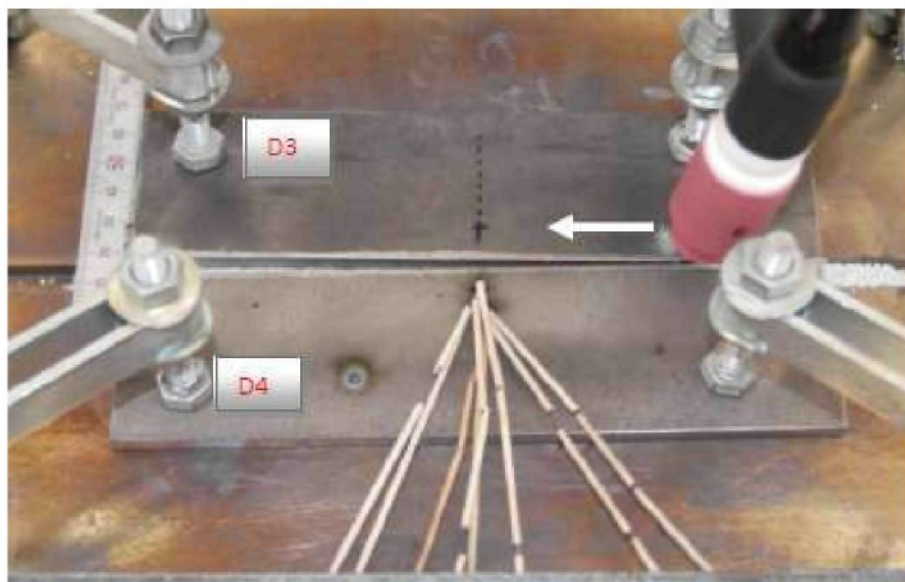
Následoval výpočet vneseného tepla, jehož hodnoty jsou uvedeny v tab. 20.

Tab. 20 Spočtené hodnoty vneseného tepla

	Start		Změna 1		Změna 2		Změna 3	
$v_s = 0,375$ [mm/s]	I [A]	U [V]	I [A]	U [V]	I [A]	U [V]	I [A]	U [V]
$\eta = 0,6$	90	13,1	80	12,7	85	12,9	40	10,1
Q [kJ/mm]	1,886		1,626		1,754		0,646	

Svar č.3

Byl zhotoven ze vzorků D3 a D4. Tyto vzorky byly upnuty na vyhřívané nerezové desce (obr. 9.65). Vzorek D4 byl upnut na pevně, vzorek D3 byl pevně upnut v jednom místě, aby mohlo dojít ke stažení vzorků v průběhu svařování. Tab. 21 uvádí rozměry svařovaných vzorků a tab. 22 počáteční parametry svařování. Průměr elektrody WT 20 pro svařování byl zvolen 3,2 mm a byla použita hubice se sítkem pro lepší ochranu svarové lázně. Ochranným plynem byl Argon 4,8. Vzorek D3 byl opatřen čtyřmi termočlánci pro zaznamenání teploty v ose ve vzdálenosti 90 mm od pravé hrany vzorku a od horní hrany byly vzdálenosti termočlánců následující: 6, 10, 12 a 15 mm. Rozevření obou vzorků na konci činilo 6 mm.



Obr. 9.65 Vzorky před svařováním, bílá šipka značí směr svařování

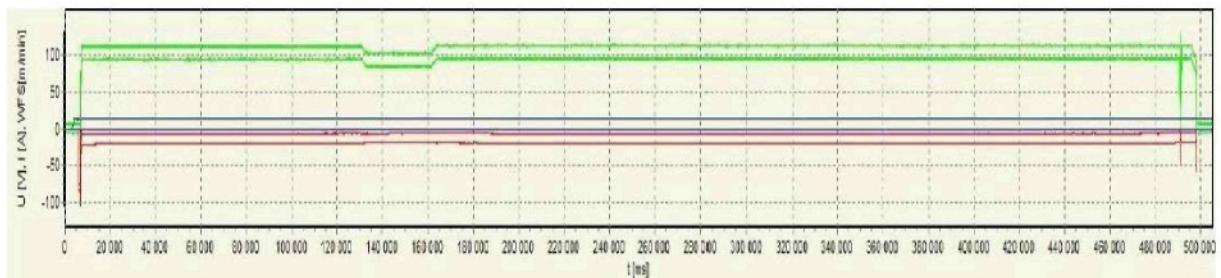
Tab. 21 Rozměry a označení vzorků

Označení vzorku	Rozměry [mm]
D3	180x50x5
D4	180x50x5

Tab. 22 Počáteční parametry svařování

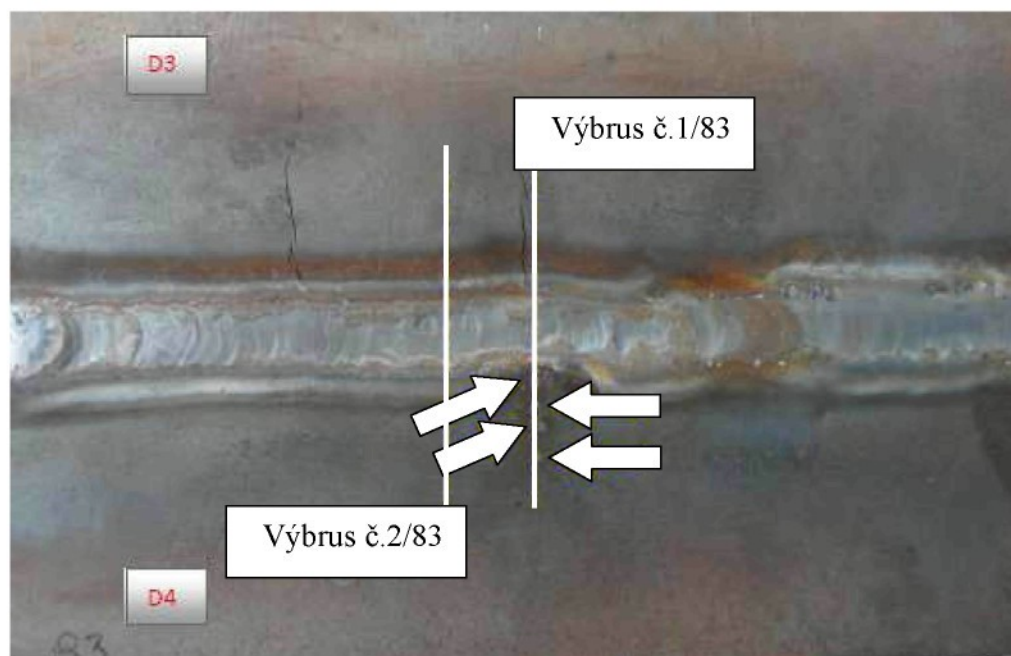
Rychlost svařování [mm/s]	DC - I [A]	Průtok plynu [l/min]	Teplota předehřevu [°C]
0,375	100	13,5	200

Snímací zařízení bylo spuštěno v čas $t = 0$ s. Začátek svařování byl po necelých 7,1 s, rozjezd dráhy nastal v čase $t = 24,2$ s. Po 131 s od začátku měření následovalo krátkodobé snížení proudu ze 100 A na 90 A, protože se objevily v místě svařování nečistoty z materiálu a to znesnadnilo na krátkou dobu svařování, po 30 s se znovu proud zvýšil na původní hodnotu 100 A, a to v čase $t = 161$ s. V čase měření $t = 490$ s došlo k přerušení svařování a k jeho opětovnému započetí a to vše během 1 sekundy. Po dalších 4 s došlo k ukončení svařování a stalo se tak v čase $t = 498$ s. Celkový průběh svařování je na obr. 9.66. Ihned poté byl svařený vzorek vložen do pece vyhřáté na 700°C a zde se ponechal 4 hodiny na výdrži při této teplotě s následným ochlazováním až do jeho úplného vychladnutí za 21 hodin. Během svařování byl bohužel poškozen termočlánek č. 1.

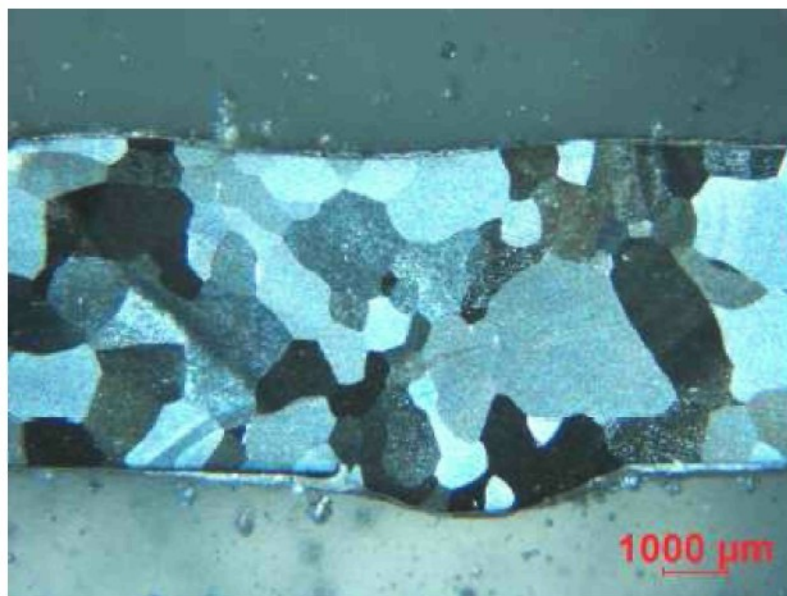


Obr. 9.66 Záznam průběhu svařovacího procesu z programu WeldMonitor

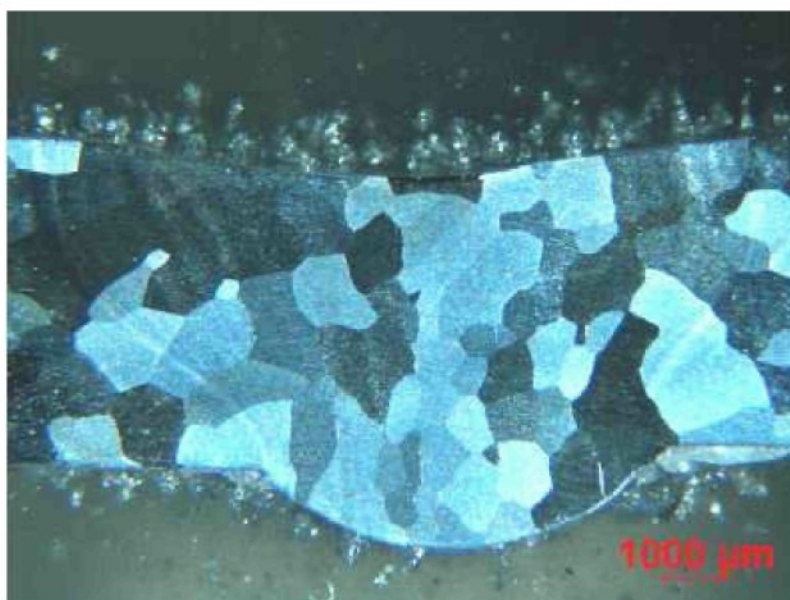
Vzorky pro metalografii byly odebrány obvyklým postupem. Na obr. 9.67 jsou šipkami znázorněna umístění termočlánků a bílými čarami jsou znázorněna místa řezů pro metalografické výbrusy (obr. 9.68 a obr. 9.69). Trhliny, které jsou vidět na obr. 9.67, nevznikly v důsledku svaření obou vzorků, ale byly v materiálu obsaženy již před svařením. Je i zřejmé, že tyto trhliny nezasahují do svaru. Také je zde vidět místo, ve kterém se objevily nečistoty, které znesnadnily svařování.



Obr. 9.67 Svařený kus s naznačeným místem odběru vzorků a umístěním termočlánků



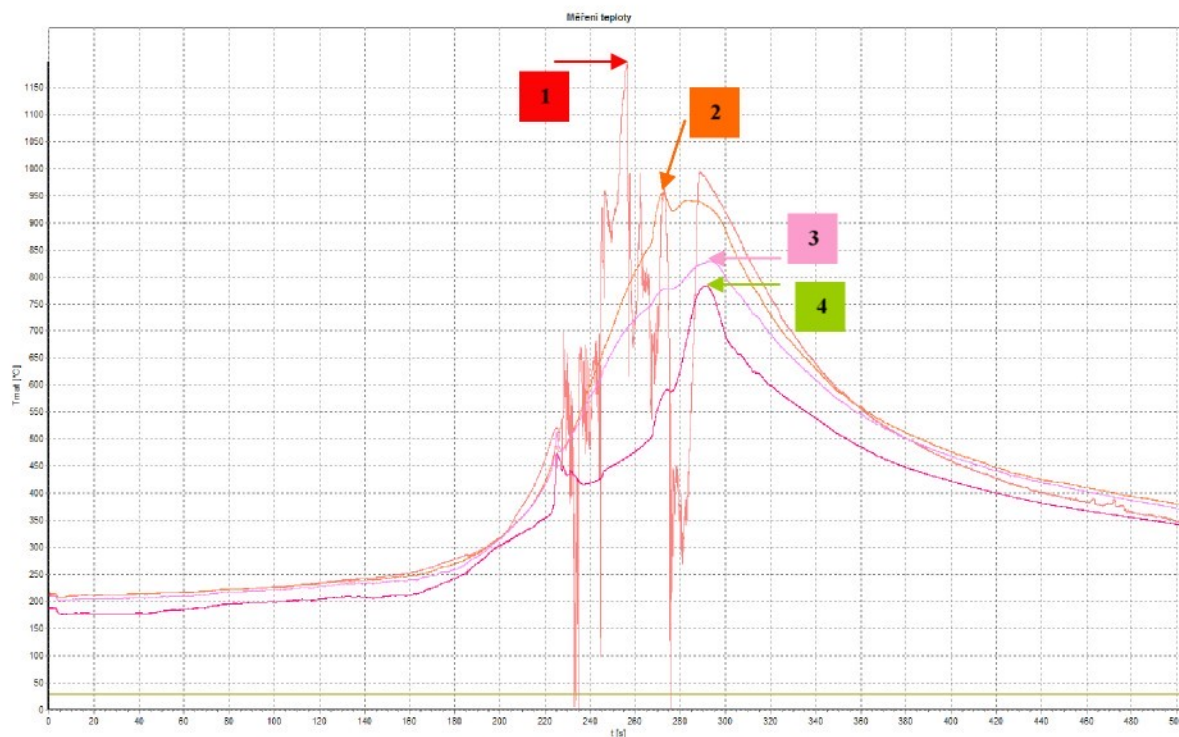
Obr. 9.68 Makrostruktura svaru výbrusu č. 1/83



Obr. 9.69 Makrostruktura svaru výbrusu č. 2/83

Na obr. 9.68 je vidět, že se povedlo provařit vzorek v tomto místě pouze z jedné části, a to z důvodu umístění azbestové krytky na termočlánky. Toto ovlivnění svaru je vidět i na obr. 9.67 v místě umístění termočlánků. Také je viditelný proláklý povrch svaru. Struktura je v místě svaru téměř shodná se strukturou tepelně ovlivněné oblasti. U výbrusu č. 2/83 bylo dosaženo provaření, svar je symetrický, struktura v kořeni svaru je jemnější než ve zbytku svaru a tepelně ovlivněné oblasti, ale je zde velmi proláklý povrch svaru (obr. 9.69). Ani u jednoho ze vzorků nejsou další viditelné vady.

Teplotní průběh je naznačen na obr. 9.70 kde jsou čísla označeny termočlánky a šipkami znázorněny jejich maxima teplot. Z průběhu termočlanků 1, 2 a 4 je vidět, že nebyly s největší pravděpodobností dobře přivařené k desce a docházelo tak ke ztrátám kontaktu.



Obr. 9.70 Průběh teplot v jednotlivých termočláncích v průběhu svařování

Hodnoty vneseného tepla jsou uvedeny v tab. 23.

Tab. 23 Spočtené hodnoty vneseného tepla

	Start		Změna 1		Změna 2	
$v_s = 0,375$ [mm/s]	I [A]	U [V]	I [A]	U [V]	I [A]	U [V]
$\eta = 0,6$	100	13,1	90	12,3	100	12,9
Q [kJ/mm]	2,096		1,771		2,064	

Svar č.4

Byl vytvořen ze vzorků s označením E1 a E2. Tyto vzorky byly upnuty na vyhřívané nerezové desce. Vzorek E1 byl upnut napevno, zatímco vzorek E2 byl upnut v jednom bodě a byl volný v místě rozevření, aby mohlo dojít ke stažení obou svařovaných vzorků. Tab. 24 uvádí rozměry svařovaných vzorků a tab. 25 počáteční parametry svařování. Průměr elektrody WT 20 pro svařování byl zvolen 3,2 mm a bylo také použito hubice se sítkem pro lepší ochranu svarové lázně. Ochranným plynem byl Argon 4,8. Vzorek E1 byl opatřen čtyřmi termočlánky pro zaznamenání teploty v ose, která byla ve vzdálenosti 90 mm od pravé hrany vzorku a od horní hrany byly vzdálenosti termočlanků pro č. 1, č. 2, č. 3 a č. 4 následující: 7, 11, 14 a 18 mm. Rozevření obou vzorků na konci činilo 5 mm.

Tab. 24 Rozměry a označení vzorků

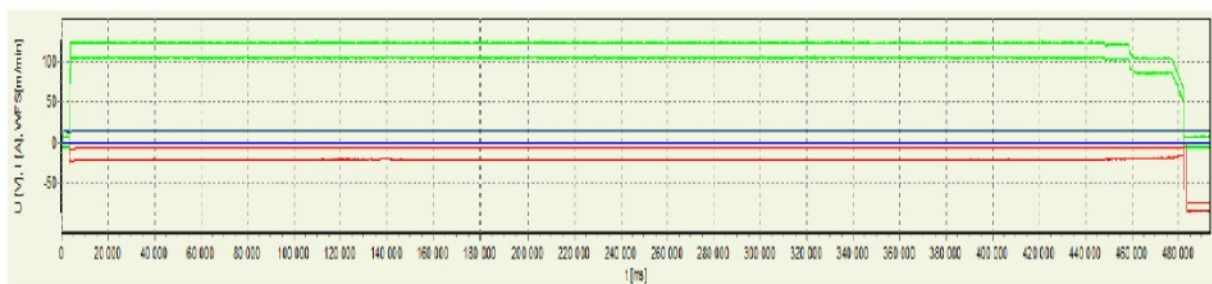
Označení vzorku	Rozměry [mm]
E1	180x60x4,5
E2	180x60x4,5

Tab. 25 Počáteční parametry svařování

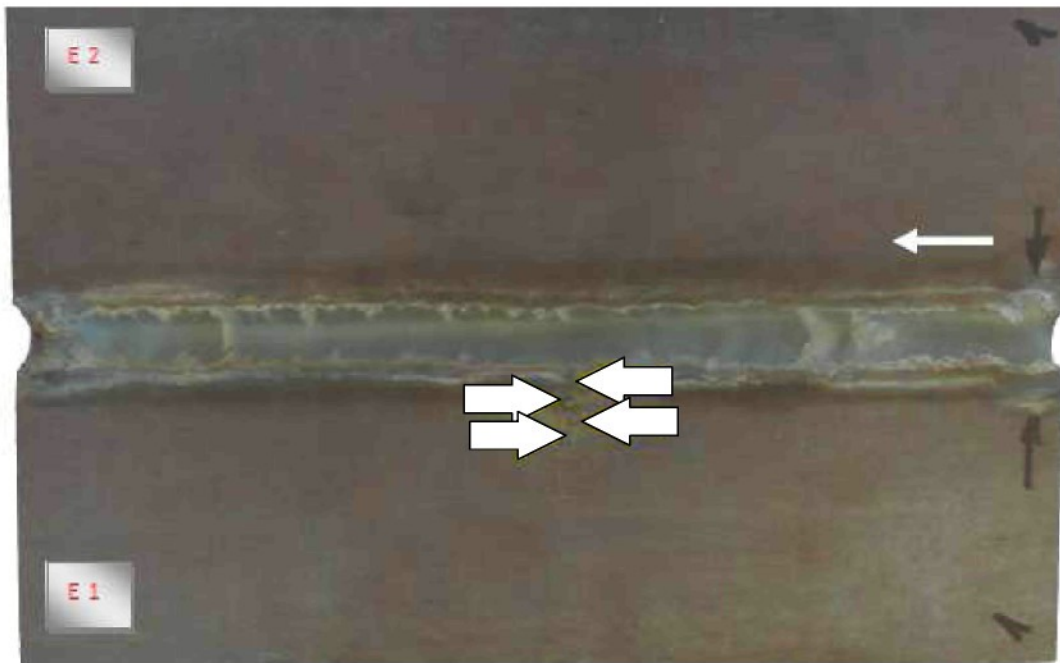
Označení vzorku	Rozměry [mm]	Číslo svaru ve WeldMonitoru 3.5
E1	180x60x4,5	86
E2	180x60x4,5	

Snímací zařízení bylo zapnuto v čase $t = 0$ s. Začátek svařování byl po necelých 4 sekundách, rozjezd dráhy nastal v čase $t = 17$ s. Po 455 s svařování přišlo snížení proudu ze 110 A na 90 A, protože se blížil konec svařování, po dalších 33 s došlo k jeho ukončení, to v čase $t = 492$ s. Celkový průběh svařování je na obr 9.71. Ihned poté byl svařený vzorek vložen do pece vyhřáté na 700°C a zde se ponechal 4 hodiny na výdrži při této teplotě s následným ochlazováním až do jeho úplného vychladnutí za 21 hodin. Svařený vzorek s naznačeným umístěním termočlánků je vidět na obr. 9.72.

U toho vzorku se neprováděl metalografický výbrus, protože byl nejprve poslán na měření zbytkového napětí na VŠB-TU Ostrava. Na vzorku můžeme vidět, že svarová lázeň měla během svařování téměř konstantní šířku a podařilo se také eliminovat vznik kráteru na konci svaru. Důležité dále bylo, že se povedlo dobře provařit vzorek po celé jeho délce.

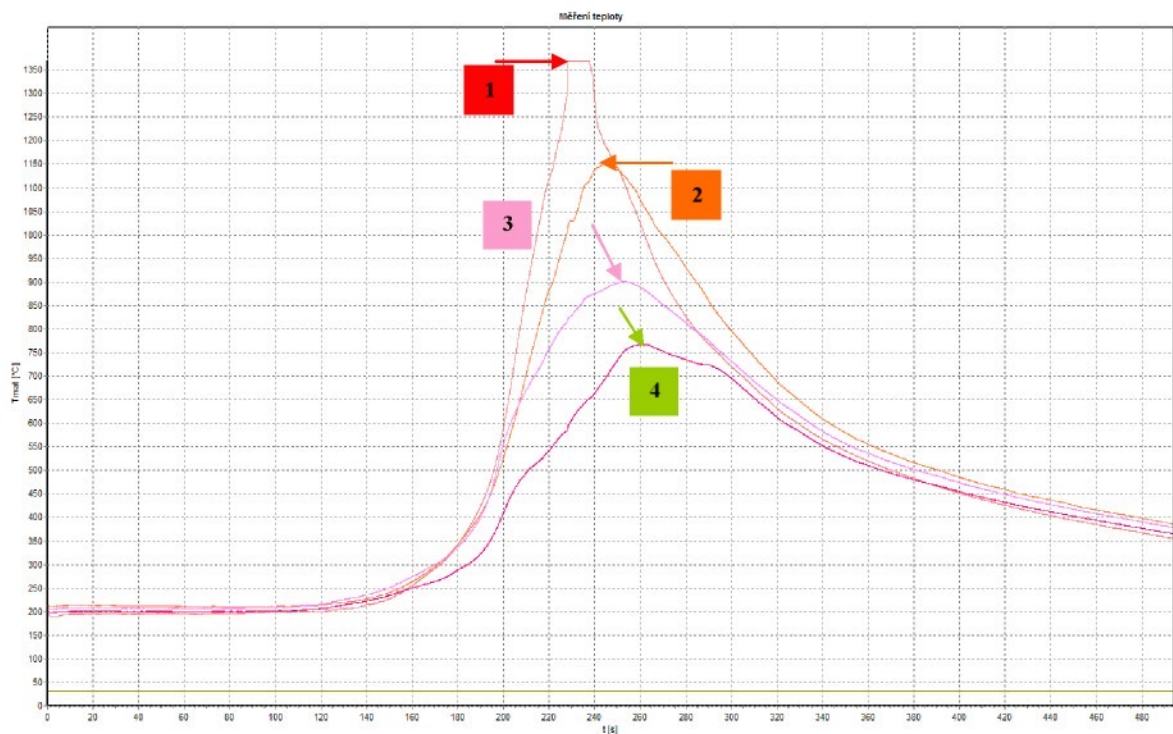


Obr. 9.71 Záznam průběhu svařovacího procesu z programu WeldMonitor



Obr. 9.72 Svařený kus s naznačeným umístěním termočlánků

Opět byl sledován teplotní průběh. Na obr. 9.73 jsou čísla označeny termočlánky a šipkami znázorněny jejich maxima teplot.



Obr. 9.73 Průběh teplot v jednotlivých termočláncích v průběhu svařování

Vypočtené množství vneseného tepla je v tab. 26.

Tab. 26 Spočtené hodnoty vneseného tepla

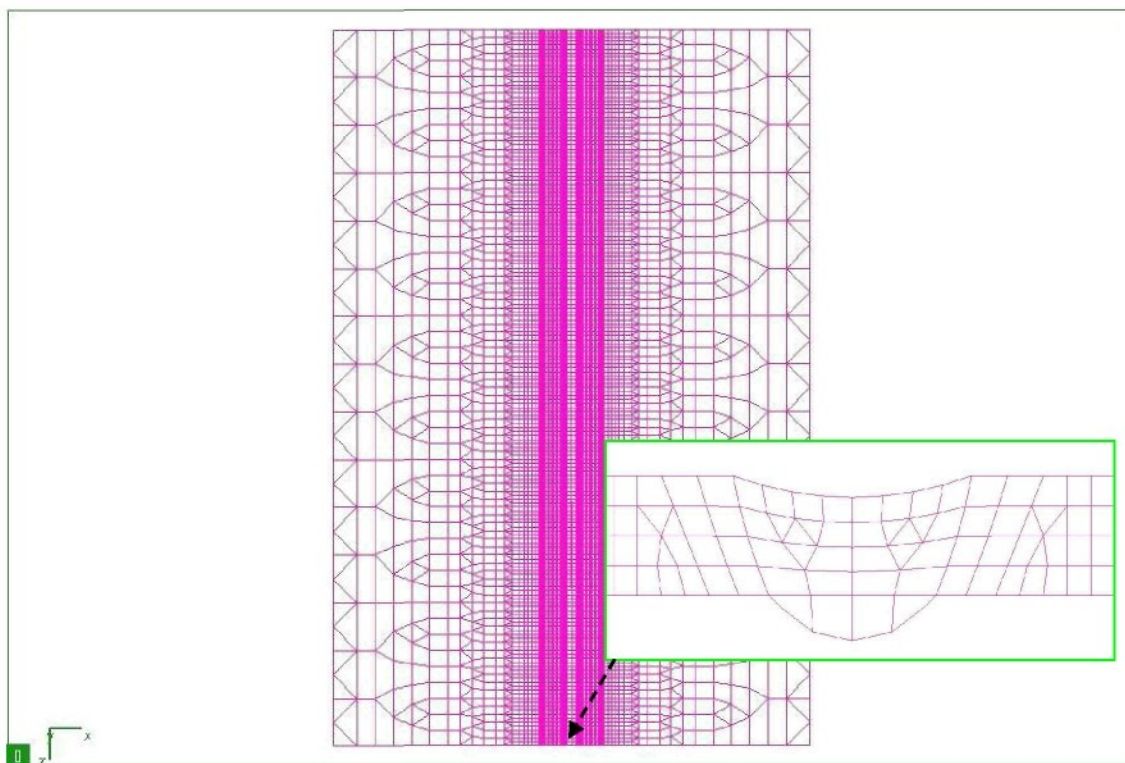
	Start		Změna 1	
$v_s = 0,375$ [mm/s]	I [A]	U [V]	I [A]	U [V]
$\eta = 0,6$	110	13,8	90	12,8
Q [kJ/mm]	2,428		1,843	

9.6. Metodika přípravy a vyhodnocení simulačního výpočtu

Způsob přípravy, odladění a vyhodnocení simulačního výpočtu na základě podkladů z experimentálních měření bude demonstrován pro zkušební vzorek označený „Svar č.4“ viz. předchozí kapitola, který byl po svaření podroben analýze zbytkových napětí na VŠB-TU Ostrava pomocí magnetoelastické metody.

9.6.1. Vytvoření simulačního modelu

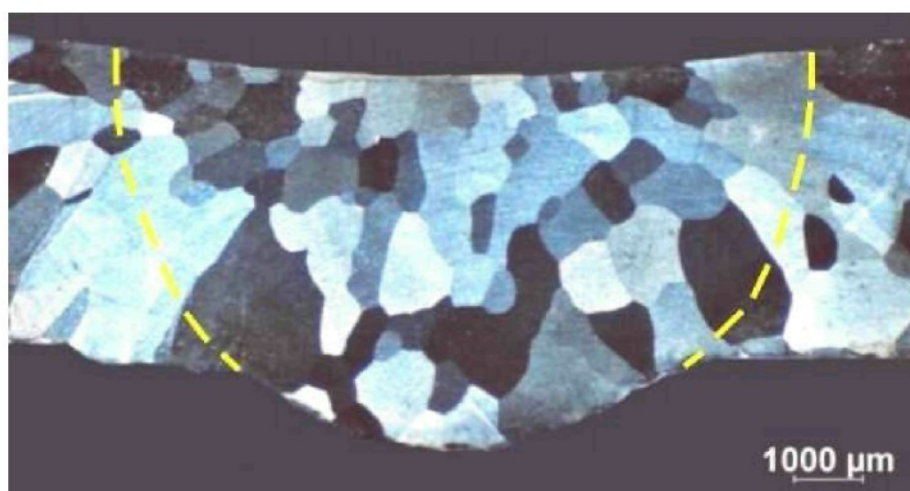
Prvním krokem bylo vytvoření simulačního modelu, který odpovídá reálnému vzorku. Na obr. 9.74 je vidět vytvořený prostorový model v programu SYSWELD. Rozměry modelu odpovídají reálnému kusu o rozměrech 180x120x5 mm. Důležité je též aby profil svaru (velikost převýšení, protečení kořene) odpovídal reálnému stavu.



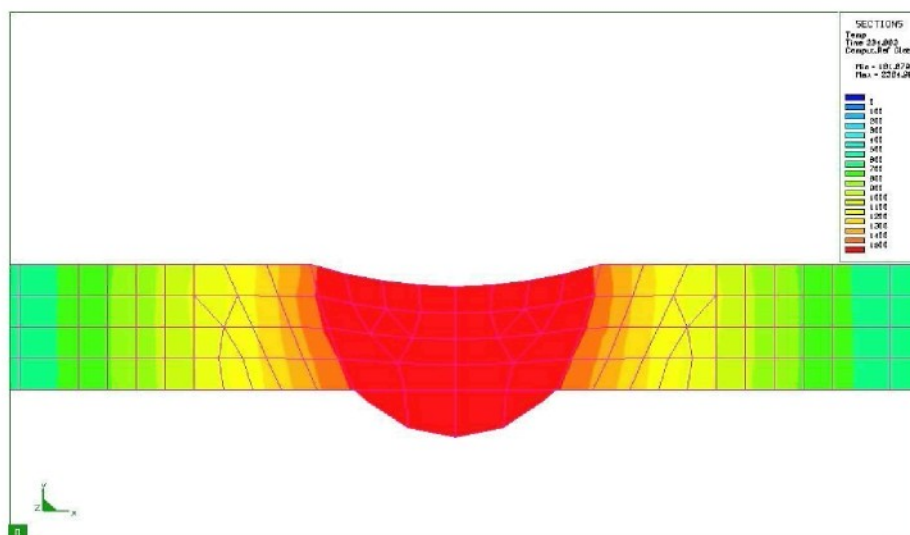
Obr. 9.74 Simulační model v programu SYSWELD odpovídající svařenému kusu

9.6.2. Určení natavené oblasti

Pro získání relevantních výsledků je důležité, aby velikost natavené oblasti zjištěná z metalografického výbrusu odebraného ze zkušební vzorku odpovídala natavené oblasti v simulačním modelu. Toho se dá docílit úpravou modelu tepelného zdroje, konkrétně úpravou koeficientů matematického popisu tepelného zdroje a získat tak požadovaný tvar tavné lázně. Na obr. 9.75 je vidět natavená oblast naznačená na makrovýbrusu a na obr. 9.76 už natavená oblast na modelu pro simulační výpočet. Po správném určení natavené oblasti je již možné provést celý výpočet teplotní analýzy.



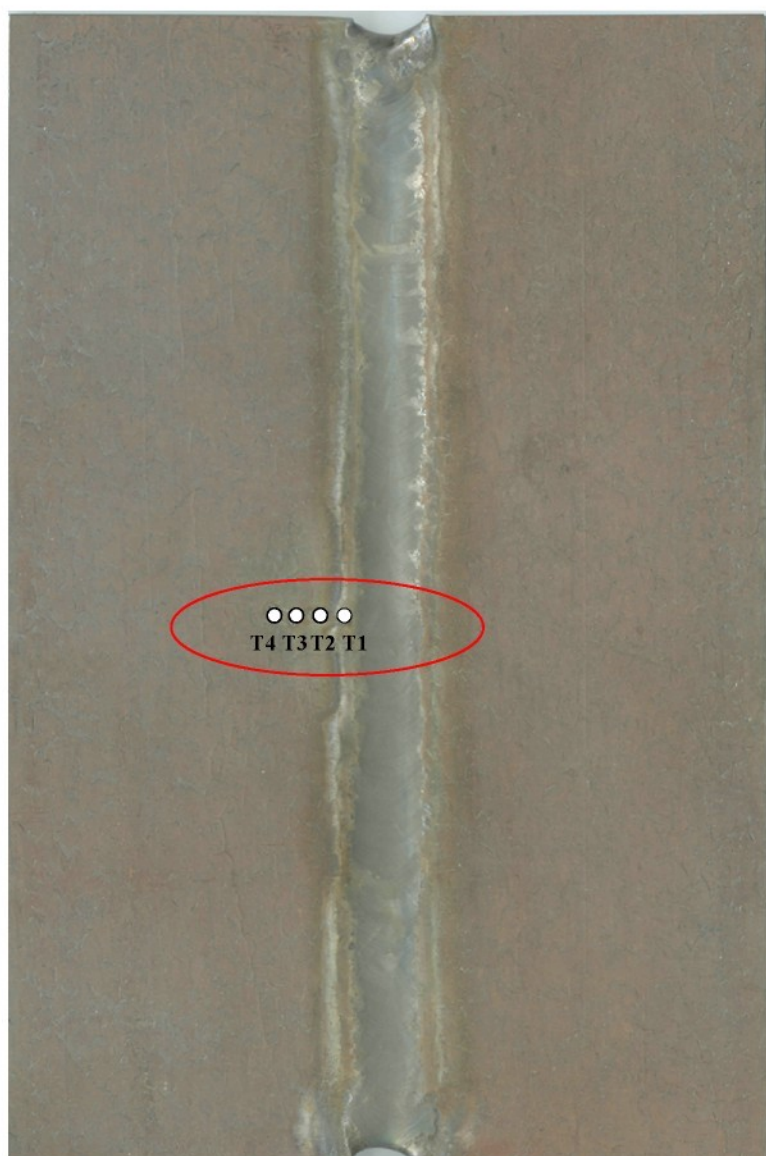
Obr. 9.75 Makrovýbrus svaru s naznačením natavené oblasti



Obr. 9.76 Odpovídající natavená oblast na simulačním modelu

9.6.3. Kontrola teplotního pole

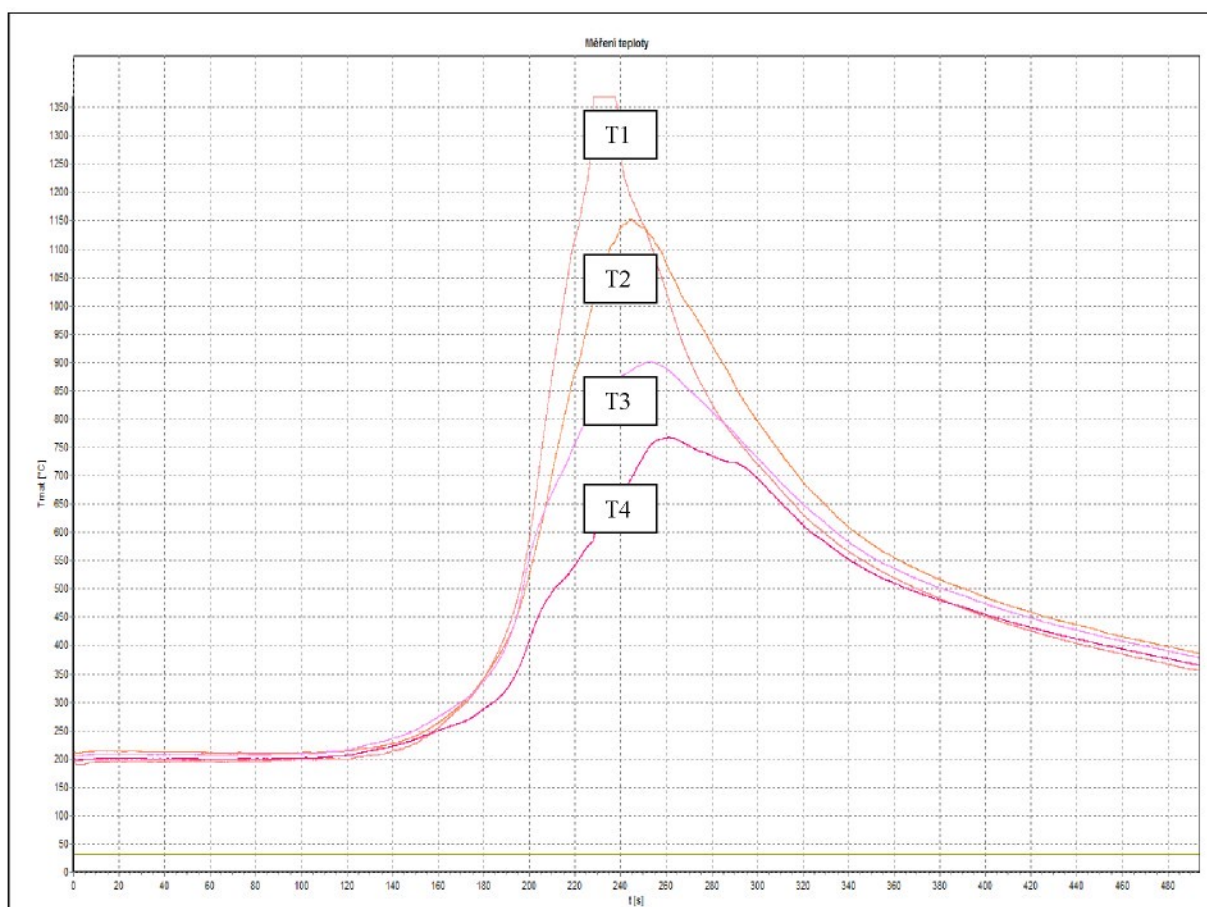
Po provedení teplotní analýzy je nutné zjistit zda vypočtený průběh teplot odpovídá průběhu teplot zjištěných z termočlánků na reálně svařeném kusu. Nejdříve musíme nalézt na modelu body, které přesně odpovídají umístění termočlánků. Nacházel-li se termočlánek v místě mezi dvěma body modelu je výsledná teplota zjištěna interpolací těchto dvou bodů. Na obr. 9.77 je vidět umístění termočlánků na svařeném kuse. Vzdálenost jednotlivých termočlánků od hranice ztavením uvádí tab. 27. Průběh teploty v závislosti na čase pro termočlánek ukazuje obr. 9.78. Na obr. 9.79 jsou body odpovídající umístění termočlánků v simulačním modelu. Průběhy teplot v těchto bodech simulačního modelu ukazuje obr. 9.80. Diference mezi naměřenými a vypočtenými hodnotami byla menší než 10% což je uspokojivá hodnota. Proto mohl následovat výpočet mechanické analýzy.



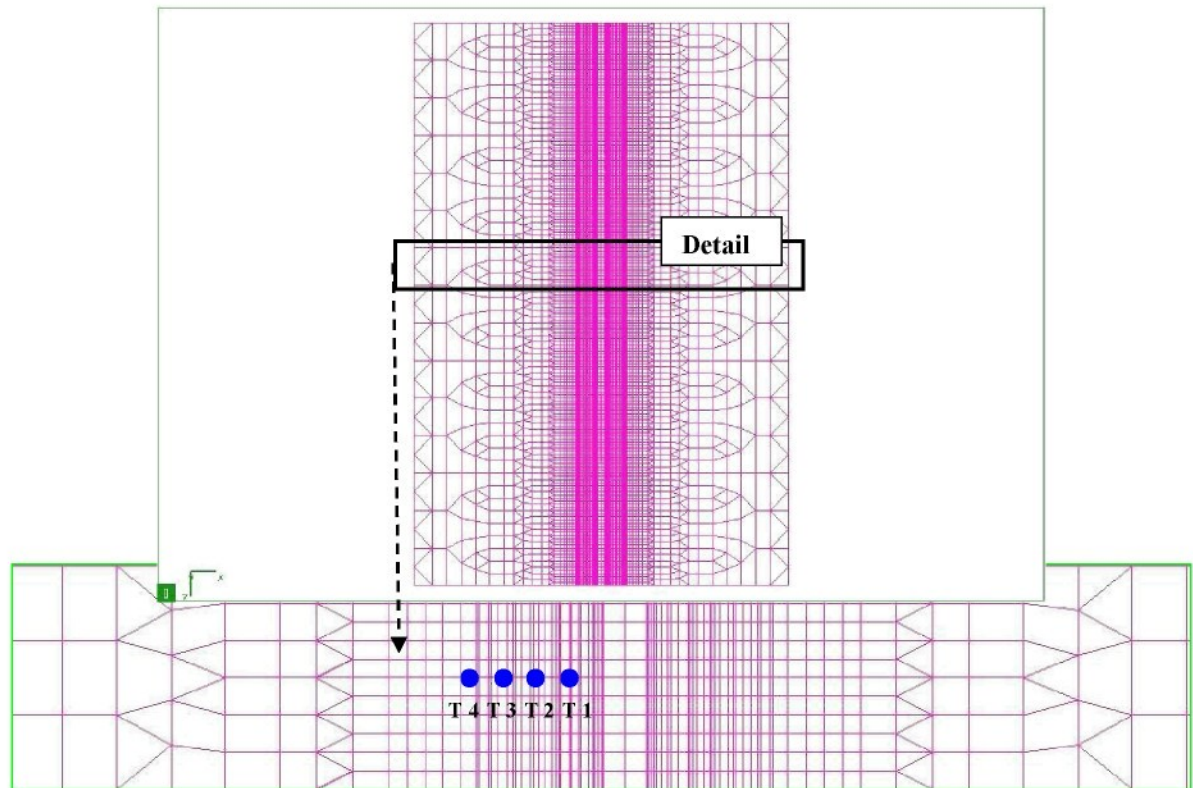
Obr. 9.77 Umístění termočlánků na svařovaném kusu

Tab. 27 Vzdálenost termočlánků od hranice ztavením

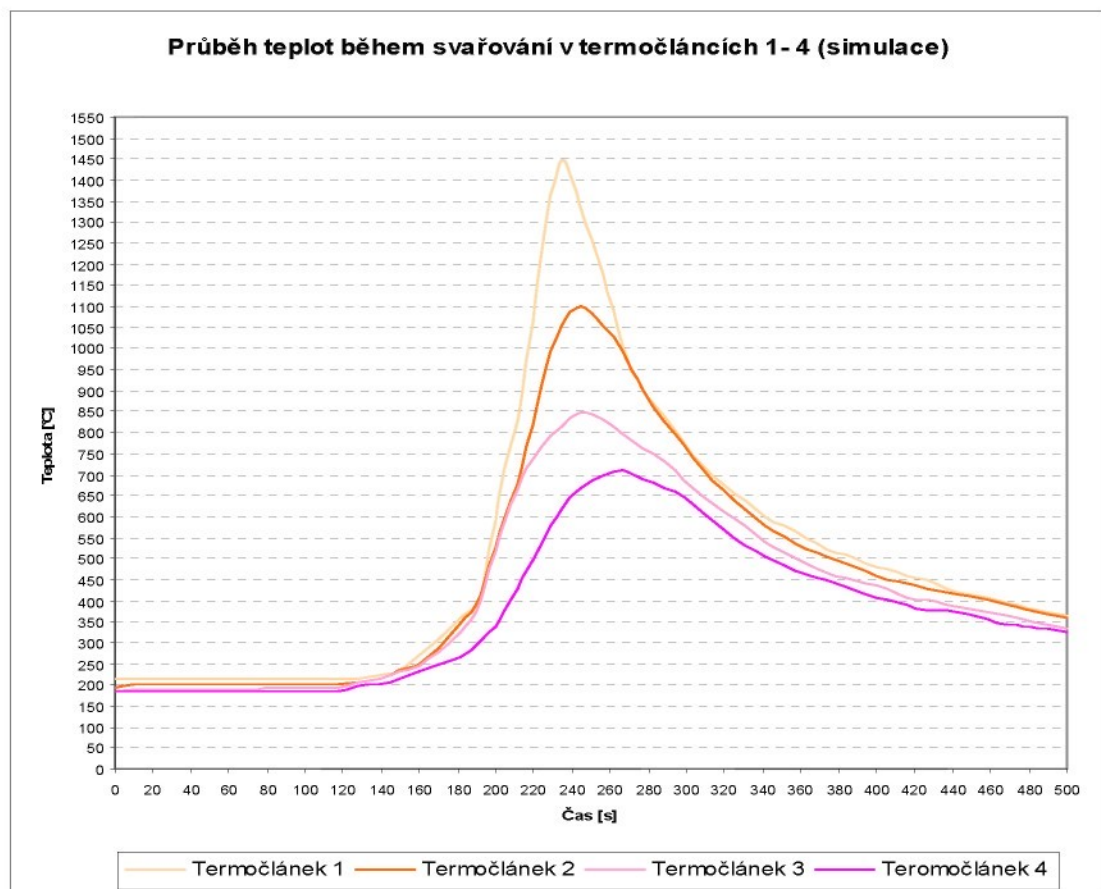
Termočlánek	Vzdálenost od hranice ztavením [mm]
T1	2,45
T2	6,3
T3	10,7
T4	13,7



Obr. 9.78 Průběh teplot pro jednotlivé termočlánky



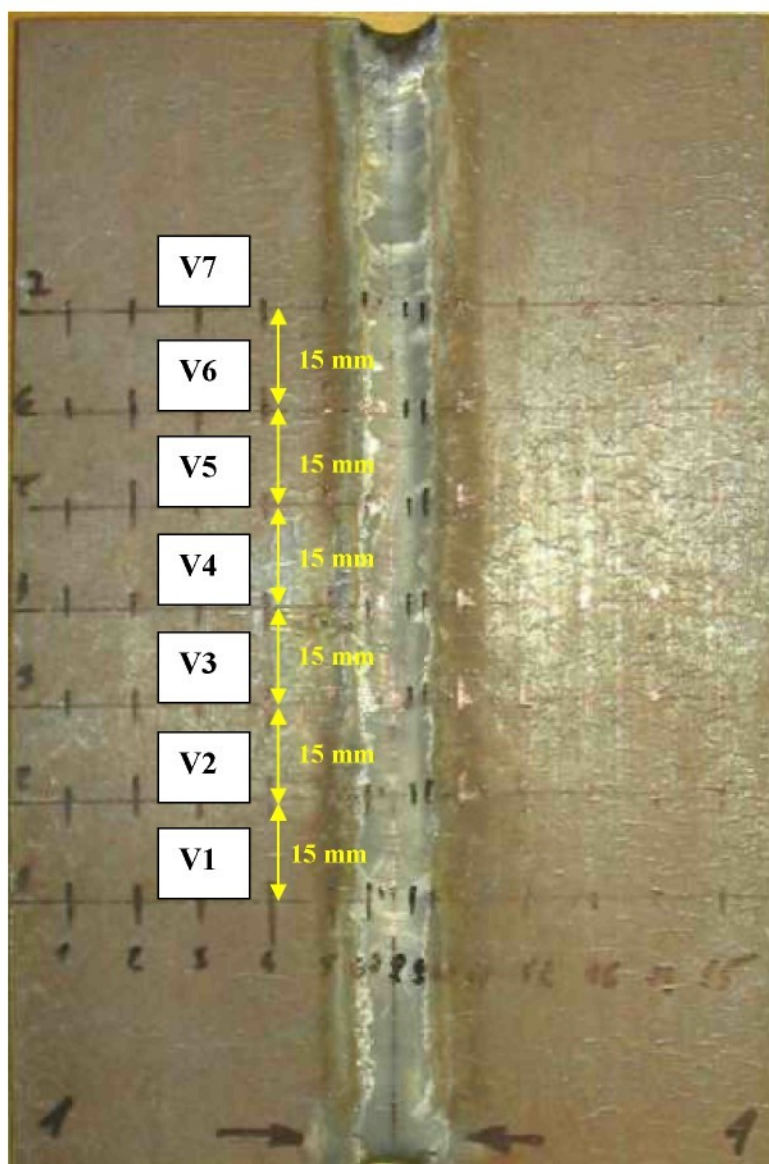
Obr. 9.79 Simulační model s detailem naznačení bodů odpovídajících termočláncům



Obr. 9.80 Průběh teplot pro jednotlivé body odpovídající termočláncům

9.6.4. Analýza zbytkových napětí po svařování

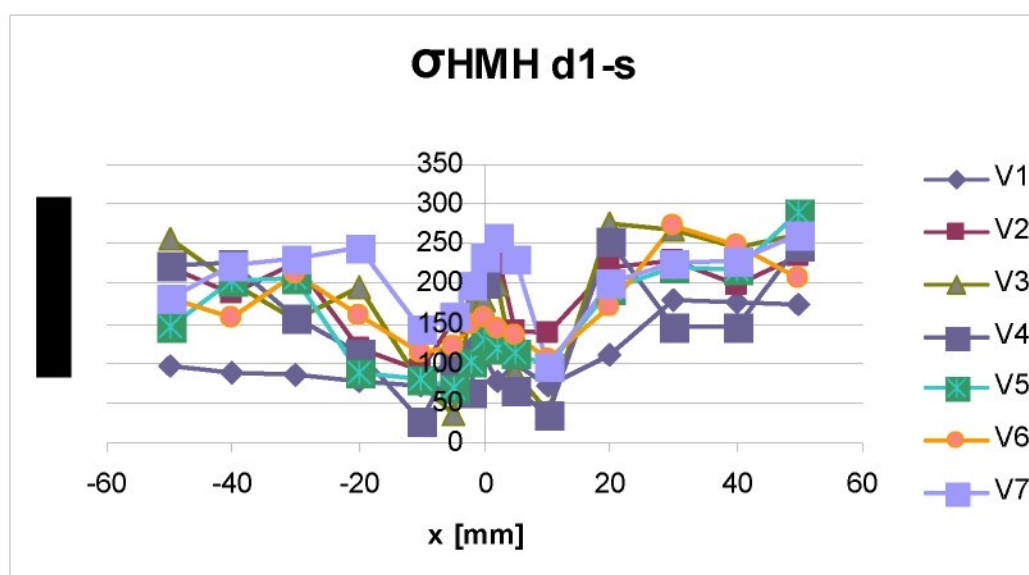
Po provedení mechanické analýzy bylo třeba jako v předchozím případě porovnat velikost spočtených napětí na povrchu vzorku s reálně naměřenými. Analýza napjatosti byla u zkoušeného vzorku provedena pomocí magnetoelastické metody na pracovišti VŠB-TU Ostrava, přičemž měření probíhalo v několika vrstvách za sebou ve směru svařování jak je vidět na obr. 9.81, kde jsou naznačeny jednotlivé vrstvy a body v kterých měření probíhalo. V tab. 28 jsou uvedeny vzdálenosti jednotlivých bodů v nichž byla napětí měřena [35]. Jsou zde hodnoty napětí přepočítané podle teorie HMM, ty samé hodnoty jsou i na grafu na obr. 9.82. Průběhy napětí v jednotlivých osách pro stejný vzorek jsou uvedeny na obr. 9.83 a obr. 9.84 v příloze [35].



Obr. 9.81 Grafické naznačení vrstev a jednotlivých bodů v nichž probíhalo měření

Tab. 28 Hodnoty napětí podle teorie HMM v jednotlivých bodech

č.b.	x [mm]	σ_{HMH} [MPa]						
		V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7
1	97	97	220	256	223	146	182	183
2	88	88	188	201	227	204	156	223
3	85	85	226	153	156	207	212	233
4	76	76	117	195	113	88	161	244
5	70	70	91	75	26	79	112	144
6	111	111	156	37	102	68	122	159
7	120	120	150	174	63	102	149	199
8	107	107	207	181	201	129	156	235
9	78	78	238	198	132	118	144	259
10	99	99	141	89	67	112	135	232
11	73	73	138	39	34	96	104	97
12	109	109	222	276	254	194	171	202
13	179	179	230	266	147	220	272	225
14	177	177	198	246	145	217	248	229
15	177	175	234	262	249	289	207	263

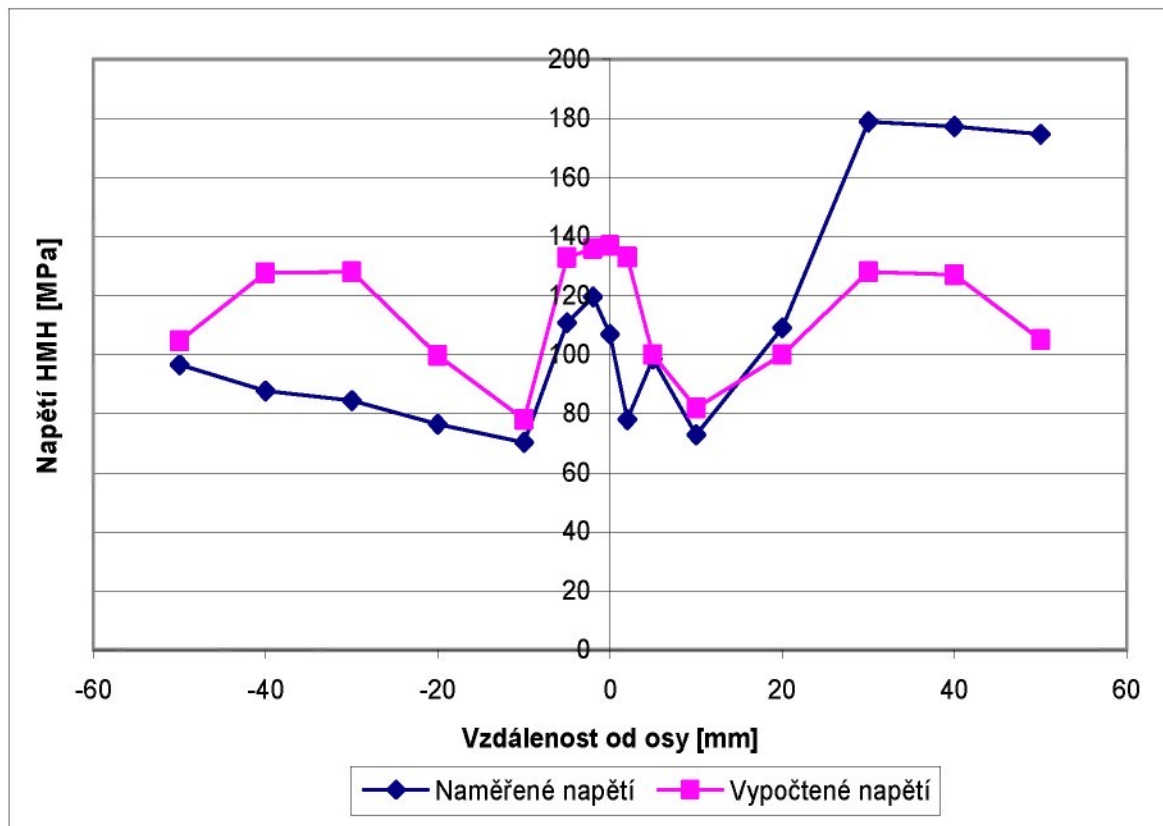


Obr. 9.82 Grafické znázornění rozložení napětí v jednotlivých vrstvách (HMH)

Pro zjištění průběhu napětí v odpovídajících vrstvách na simulačním modelu bylo zapotřebí zjistit čísla všech odpovídajících uzlových bodů na simulačním modelu a v nich zjistit hodnoty napětí. Čísla uzlových bodů odpovídající měřeným bodům jsou uvedeny v tab. 29 v příloze. Po realizaci simulačního výpočtu a získání výsledků z těchto bodů bylo již možné stanovit průběhy napětí v odpovídajících vrstvách.

Na obr. 9.85 je vidět porovnání výsledných napětí z měření a simulací pro příčný řez desky ve vzdálenosti $z = 42$ mm od počátku svařování (vrstva V1). Porovnání bylo provedeno

i pro ostatní vrstvy V2-V7 a je uvedeno na grafech na obr. 9.86 – 9.91 v příloze. S ohledem na použitou metodu určování zbytkové napjatosti lze pokládat výsledky za uspokojivé.



Obr. 9.85 Porovnání naměřených a vypočítaných hodnot zbytkového napětí (příčný řez)

9.6.5. Analýza kritických míst programem MOVYPRO 07

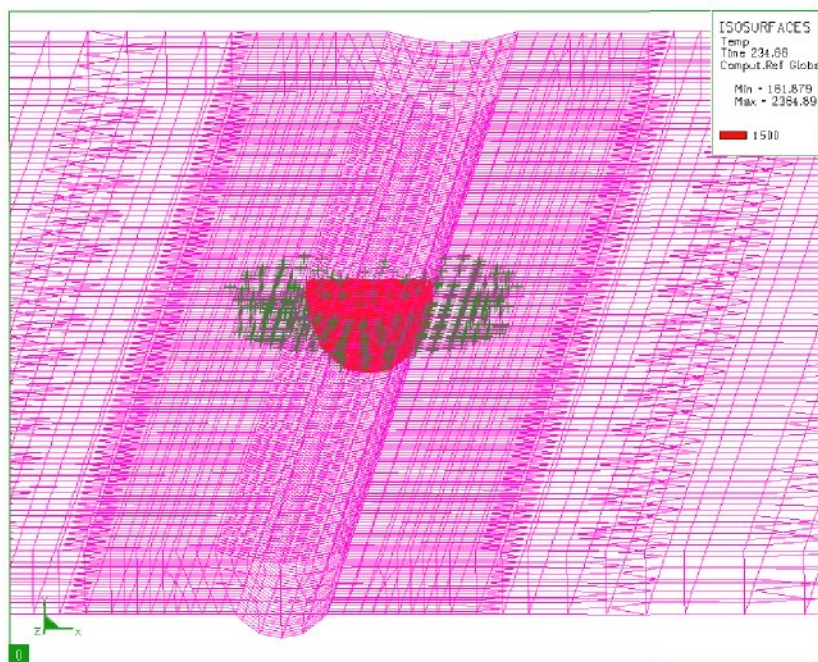
Po realizaci simulačního výpočtu bylo provedeno určení kritických míst. Výsledek analýzy z programu MOVYPRO 07 je zpracován do podoby podle tab. 30. V jednotlivých sloupcích jsou vlevo uvedeny výpočtové časy a vpravo počet stanovených kritických míst. Pokud nejsou zjištěna kritická místa je příslušné políčko pro daný výpočtový čas označeno žlutě, v případě zjištění kritických míst je políčko červené. Čas 480 s odpovídá ukončení svařovacího procesu. Do výpočtového času 500 s bylo uvažováno umístění desky na podložce o teplotě 200°C, potom následovalo 14400 s v peci vyhřáté na 700°C a dále chladnutí v peci (počítáno do času 90500 s). Křivka chladnutí pece je uvedena v příloze na obr. 9.92.



Tab. 30 Výsledky analýzy kritických míst

10.6667	78		309.333	484		1100	0		11500	0		50000	0	
21.3333	168		320	500		1200	0		12000	0		55000	0	
32	224		330.667	500		1300	0		12500	0		60000	0	
42.6667	348		341.333	494		1400	0		13000	0		65000	0	
53.3333	450		352	526		1500	0		13500	0		70100	0	
64	538		362.667	520		1600	0		14000	0		75200	0	
74.6667	614		373.333	532		1700	0		14900	0		80300	0	
85.3333	664		384	554		1800	0		15800	0		85400	0	
96	538		394.667	580		1900	0		16700	0		90500	0	
106.667	586		405.333	578		2000	0		17600	0		0	0	
117.333	580		416	608		2500	0		18500	0		0	0	
128	544		426.667	582		3000	0		19500	0		0	0	
138.667	544		437.333	630		3500	0		20500	0		0	0	
149.333	524		448	640		4000	0		21500	0		0	0	
160	524		458.667	594		4500	0		23500	0		0	0	
170.667	510		469.333	404		5000	0		24500	0		0	0	
181.333	476		480	332		5500	0		25500	0		0	0	
192	484		500	121		6000	0		27000	0		0	0	
202.667	482		550	0		6500	0		28500	0		0	0	
213.333	468		600	0		7000	0		30000	0		0	0	
224	458		650	0		7500	0		31500	0		0	0	
234.667	470		700	0		8000	0		33000	0		0	0	
245.333	442		750	0		8500	0		35000	0		0	0	
256	458		800	0		9000	0		37000	0		0	0	
266.667	476		850	0		9500	0		39000	0		0	0	
277.333	472		900	0		10000	0		41000	0		0	0	
288	470		950	0		10500	0		43000	0		0	0	
298.667	464		1000	0		11000	0		45000	0		0	0	

Pro jednotlivé výpočtové časy lze konkrétní umístění kritických míst následně určit znovu v programu SYSWELD. Pro výpočtový čas 234,6 s (zdroj tepla je přibližně v polovině délky svaru) je zobrazení rozložení kritických míst ve výpočtovém modelu na obr. 9.93. Kritická místa jsou označena tmavými křížky. Ohraničena je i svarová lázeň, která je zobrazena červeně.



Obr. 9.93 Rozložení kritických míst ve výpočtovém modelu v čase 234,6 s.

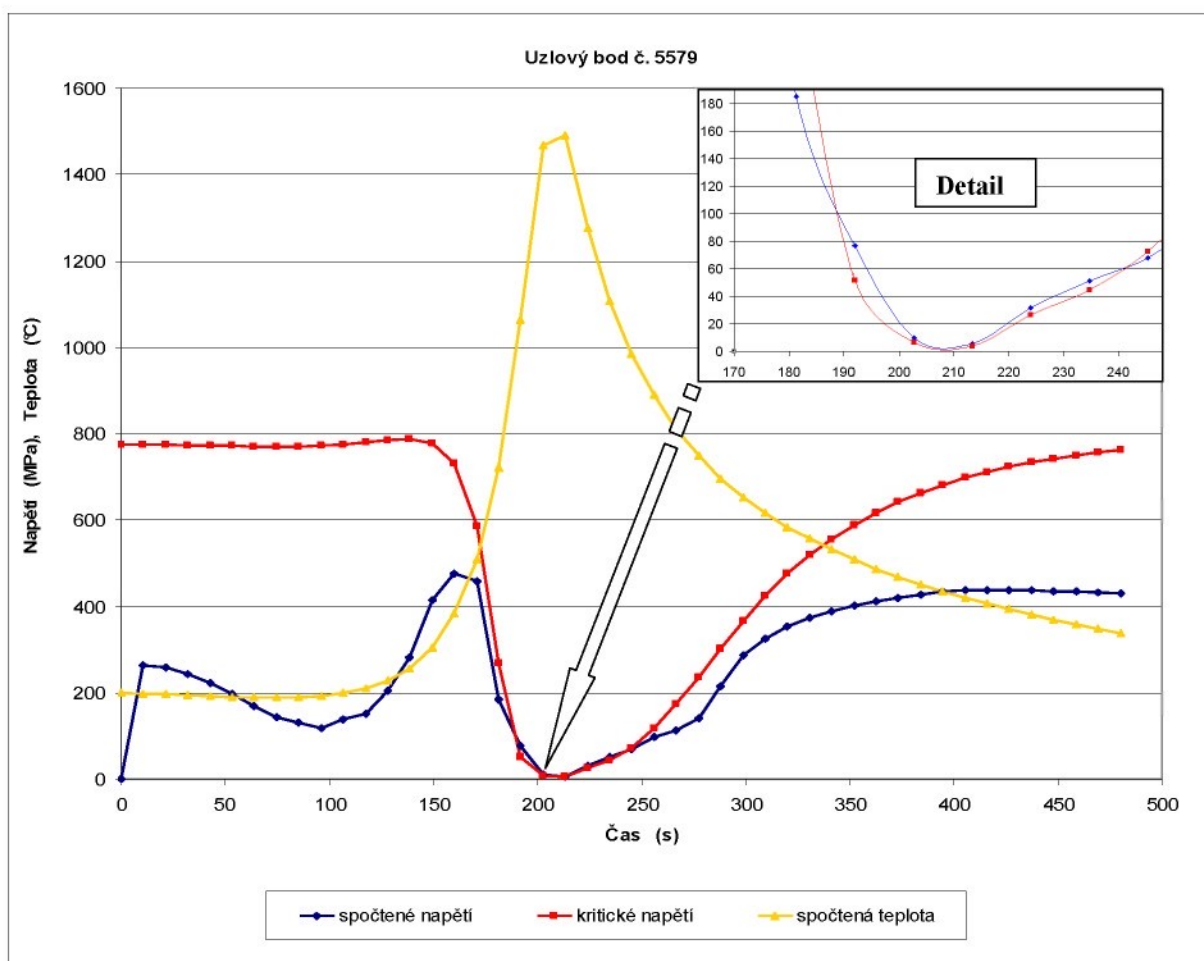
Vzhledem k tomu, že byla uvedenou analýzou detekována kritická místa a ve svarech přesto nebyly zjištěny žádné trhliny, bylo provedeno porovnání napjatostí stanovené simulačním výpočtem a příslušných hodnot kritických napětí v jednotlivých uzlových bodech v závislosti na čase. Tak bylo určeno v jakých časech a příslušných teplotách je vypočítané napětí větší než kritické a o kolik. Bylo prokázáno, že detekce kritických míst odpovídá převážně okamžikům, kdy je teplota vysoká a přesahuje 900 °C. Vzhledem k tomu, že pro simulační výpočty jsou prakticky všechna vstupní data pro teploty nad 900 °C stanovena aproximací nebo odhadem, jde o přijatelný výsledek.

Na základě výsledků srovnávací analýzy je možné zpětně v programu SYSWELD stanovit průběhy vypočítaných napjatostí v jednotlivých uzlových bodech v závislosti na čase a porovnat je s hodnotami kritického napětí. Pokud v tomto grafu uvedeme i průběh teploty můžeme posoudit v jakém období a při jaké teplotě jsou vypočítané napjatosti větší než kritické hodnoty.

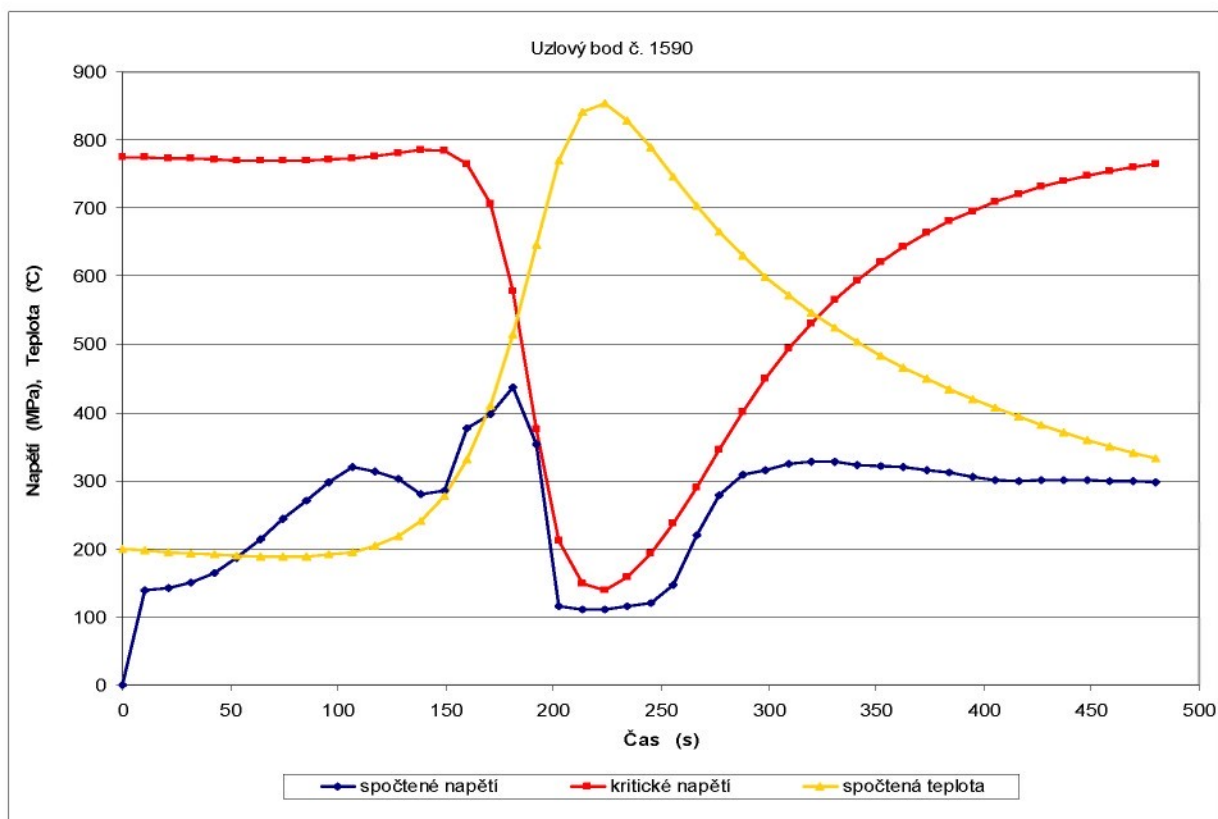
Na obr. 9.94 je výsledek analýzy napjatosti pro bod, ve kterém během svařovacího procesu došlo k překročení kritické napjatosti. Jde o bod, který je umístěn na hranici ztavením v polovině délky svaru a maximální dosažená teplota odpovídá 1500 °C.

Na obr. 9.95 je výsledek analýzy napjatosti pro bod, ve kterém během svařovacího procesu nedošlo k překročení kritické napjatosti. Jde o bod vzdálený 7 mm od hranice ztavením v polovině délky svaru a maximální dosažená teplota odpovídá 950 °C.

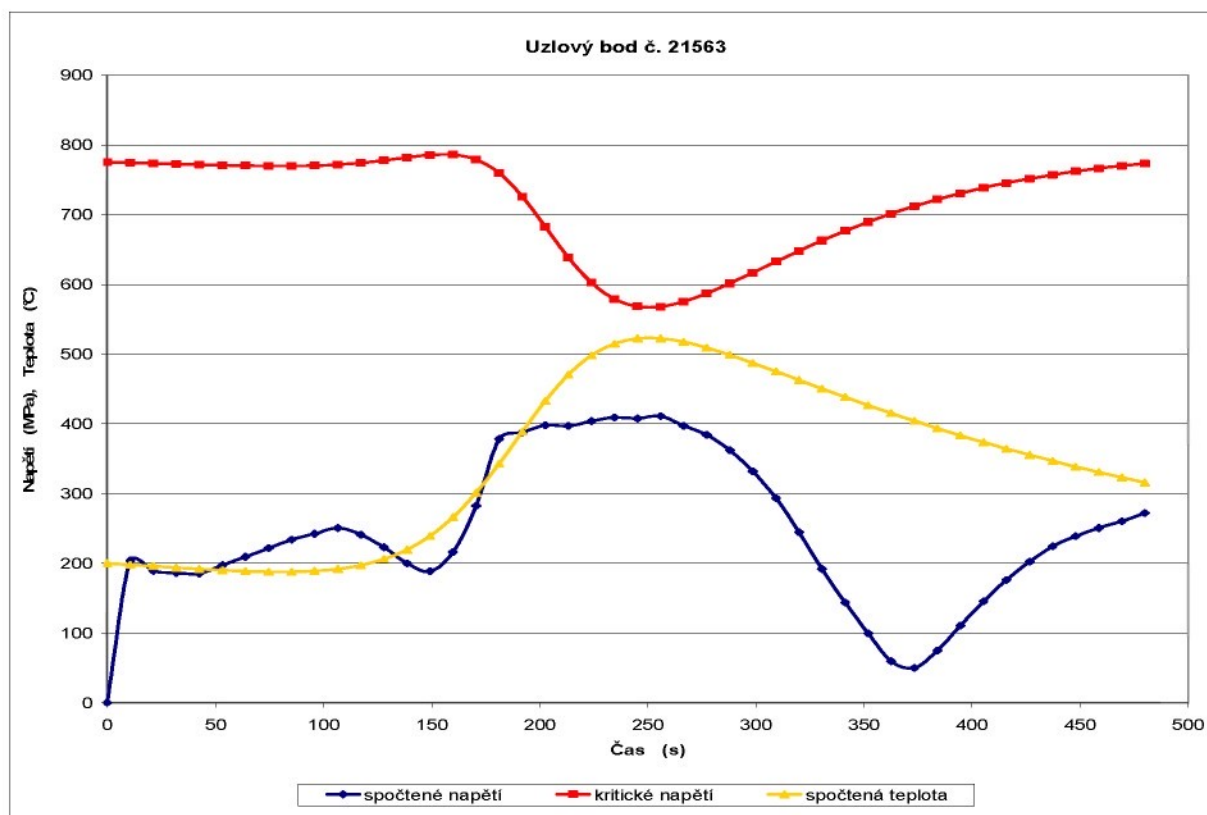
Na obr. 9.96 je výsledek analýzy napjatosti pro bod, ve kterém během svařovacího procesu nedošlo k překročení kritické napjatosti. Jde o bod vzdálený 16 mm od hranice ztavením v polovině délky svaru a maximální dosažená teplota odpovídá 520 °C.



Obr. 9.94 Analýza napjatosti v průběhu svařovacího procesu pro uzlový bod na hranici ztavením

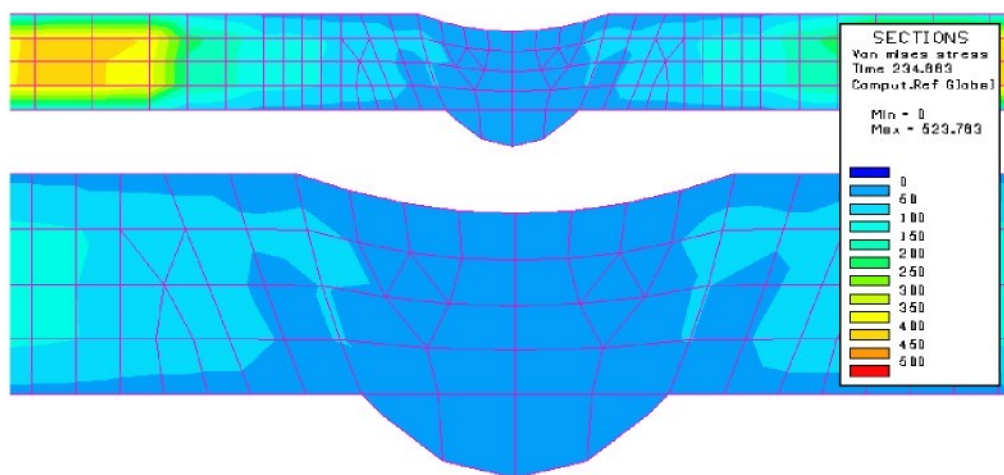


Obr. 9.95 Analýza napjatosti v průběhu svařovacího procesu pro uzlový bod vzdálený 7 mm od hranice ztavením

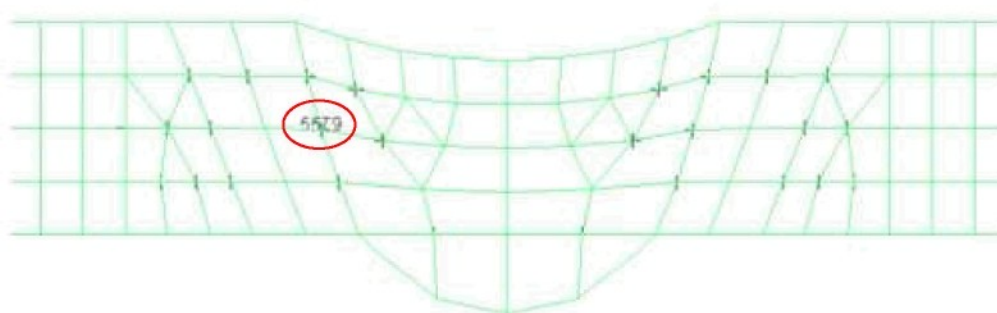


Obr. 9.96 Analýza napjatosti v průběhu svařovacího procesu pro uzlový bod vzdálený 16 mm od hranice ztavením

Rozdíl v klasickém pohledu na výsledky simulačních výpočtů a na výsledky doplněné analýzou kritických míst je zřejmý z následujících dvou obrázků. Na obr. 9.97 je rozložení napjatosti v příčném řezu desky v čase 234,6 s s detailem z oblasti svaru. Ve stejném místě a čase je znázorněno na obr. 9.98 rozložení kritických míst, vyznačen je zde uzlový bod č. 5579 na hranici ztavením. Je jasné, že kritická místa nejsou v místech s nejvyšší napjatostí. Klasický pohled na výsledky výpočtů z programu SYSWELD posuzující především místa s nejvyšší napjatostí je proto do jisté míry zavádějící.



Obr.9.97 Rozložení napjatosti v příčném řezu desky v čase 234,6 s.



Obr. 9.98 Kritická místa ve stejném řezu jako na obr. 9.96 (zelené křížky)



10. Vědecký přínos pro rozvoj technologických oborů a aplikace pro praktické využití

Přínos práce pro rozvoj vědy:

Přínosem této disertační práce pro rozvoj vědy je především určení metodiky přípravy a vyhodnocení simulačních výpočtů s využitím údajů z experimentálních měření. A to již od tvorby modelu a odladění zdroje tepla, až po verifikaci teplotních a napěťových polí přímými a nepřímými metodami. Dále se jedná o způsob dalšího zpracování výsledných dat. Především získání přehledu o potenciálních kritických místech v průběhu svařovacího procesu a chladnutí pomocí programu MOVYPRO 07.

Dalším vědeckým přínosem je získání materiálových dat aluminidu železa a jejich následná implementace do simulačního programu SYSWELD. Tímto způsobem je možné získat nové poznatky o technologickém chování aluminidu železa a navrhnout vhodné postupy při jeho svařování.

Na základě simulačních výpočtů a experimentů bylo dosaženo vyhovujících svarů aluminidu železa bez výskytu trhlin. A to zejména správnou volbu upnutí, optimálním nastavením svařovacích parametrů a stanovením správné teploty předehřevu.

Přínos práce pro rozvoj vědy můžeme shrnout v následujících bodech:

- ✓ Ověření svařitelnosti aluminidu železa, vytvoření svaru bez výskytu trhlin.
- ✓ Určení metodiky přípravy a vyhodnocení simulačních výpočtů.
- ✓ Získání a implementace vstupních dat aluminidu železa do simulačních výpočtů.
- ✓ Posouzení různých variant předehřevů. Stanovení vhodné teploty předehřevu při svařování aluminidu železa, jakož i ostatních svařovacích parametrů.
- ✓ Analýza kritických míst ve svarku a účelnost změn technologických parametrů během svařování na stav vnitřní napjatosti a na výskyt kritických míst ve svařovaných dílech.



Přínos práce pro praxi:

Největším přínosem pro praxi je stanovení optimálních svařovacích parametrů při svařování aluminidu železa. Především z hlediska volby správné teploty předehřevu a následného tepelného zpracování tak, aby se ve svarech nevyskytly trhliny.

Dalším přínosem je vytvořená metodika přípravy a vyhodnocení simulačního výpočtu v programu SYSWELD. Ta zahrnuje jednotlivé a na sebe navazující kroky, které je nutné během simulačního výpočtu provést, aby výsledné hodnoty ze simulací měly vysokou vypovídající schopnost.

Důležitým přínosem je i analýza kritických míst svařovacího procesu, na jejímž základě je možné se rozhodovat o volbě či úpravě technologických parametrů.

Přínos práce pro praxi můžeme shrnout v následujících bodech:

- ✓ Zhotovení tupých svarů aluminidu železa bez výskytu trhlin, což je důležitý předpoklad pro užití tohoto materiálu při svařování složitějších celků.
- ✓ Vytvoření podkladů pro návrh postupu svařování aluminidu železa.
- ✓ Využití analýzy kritických míst jako nástroje pro volbu a úpravu technologických parametrů.

11. Závěr

Analýza svařovacího procesu s využitím simulačních výpočtů je vítaným přínosem pro návrh složitých svařovaných konstrukcí i při řešení problémů souvisejících se svařováním obtížně svařitelných materiálů jako je aluminid železa.

Simulace svařování jsou v současnosti využívány především pro výpočty deformací velkých konstrukčních celků (např. příhradových konstrukcí, zásobníků sypkých hmot i kapalin, karosérií aut atd.), ovlivnění materiálu při opravách a renovacích (např. renovace rotorů turbín), nebo při zjišťování svařitelnosti či postupů svařování u nových nebo obtížně svařitelných materiálů.

Tato disertační práce je zaměřena především na problematiku spojenou s obtížně svařitelnými materiály typu aluminidu železa. Je řešena ve dvou částech - teoretické a experimentální. Teoretická část je složena z devíti kapitol. První kapitola popisuje stávající situaci a možné směry ve výzkumu svařitelnosti aluminidu železa. V kapitole 2 jsou popsány hlavní materiálové vlastnosti aluminidu železa a jejich vliv na výslednou svařitelnost. Teplotním a deformačním účinkem svařování se zabývají kapitoly 3 a 4, přičemž v kapitole 4 jsou dále popsány jednotlivé způsoby snižování vnitřních pnutí a deformací. Kapitola 5 se věnuje snižování vnitřních pnutí pomocí předehřevu. V kapitole 6 je popsán simulačnímu programu SYSWELD a v kapitole 7 vyhodnocovací programu MOVYPRO 07 zabývající se detekcí kritických míst. V kapitole 8 uzavírající teoretickou část jsou shrnuty předchozí kapitoly a definovány cíle disertační práce.

Cíle disertační práce byly následující:

1. Získat materiálová vstupní data aluminidu železa pro simulační výpočty.
2. Aplikovat všechna získaná materiálová vstupní data do simulačního programu SYSWELD.
3. Navrhnout vhodný svařovací postup pro aluminid železa na základě simulačních výpočtů.
4. Provést experimentální zkoušky, zjistit reálné chování materiálu při svařování a vytvořit svary bez výskytu trhlin. Ověřit navrhované svařovací postupy, analyzovat teplotní pole a zbytkové napjatosti po svařování.
5. Stanovit metodiku přípravy a vyhodnocení simulačního výpočtu s využitím podkladů z experimentálního měření

Tyto cíle byly řešeny v experimentální části práce. Co se týče prvního bodu, získání materiálových vstupních dat aluminidu železa pro simulační výpočty, byla získána všechna potřebná materiálová data. A to jednak pomocí mechanických zkoušek (kap. 9.2) a jednak měřením a výpočtem (kap. 9.4). Všechna data byla zjišťována v závislosti na teplotě, což je velice důležitý předpoklad k získání kvalitních výsledků simulací.

Druhý z cílů disertační práce „Aplikace všech získaných materiálových vstupních dat do simulačního programu SYSWELD“ je řešen v rámci kapitoly 9.3, kde je způsob vkládání těchto údajů je uveden.

Třetí cíl „Navrhnout vhodné svařovací postupy pro aluminid železa na základě simulačních výpočtů“ byl řešen v rámci kapitoly 9.4. Zde byly pomocí simulačních výpočtů navrženy a následně užity a ověřeny zvolené svařovací postupy. Jednalo se především o návrh sestavení desek před svařováním (svarová mezera, stehování, upnutí), dále pak o volbu správné teploty předehřevu, případně dohřevu (kap. 9.4.2, 9.4.3 a 9.4.4). Největší důraz byl kladen na volbu vhodné teploty předehřevu. Byly provedeny simulační výpočty jak pro stále tak pro nerovnoměrné teplotní pole předehřevu. Dále výpočty pro speciální tvar teplotního pole předehřevu (kap. 9.4.4). Všechny provedené simulační výpočty byly vyhodnoceny programem MOVYPRO 07 na počet a rozmístění kritických míst a vzájemně porovnány. Jako nejlepší, z hlediska množství kritických míst se ukázala varianta s předehřevem 200 a 400°C (kap. 9.4.4).

V rámci řešení čtvrtého cíle „Provést experimentální zkoušky, zjistit reálné chování materiálu při svařování a ověřit navrhované svařovací postupy“ byly provedeny experimenty na základě výsledků simulací. Nejdříve bylo vyhotoveno několik zkušebních svarů, kdy cílem bylo odzkoušet svařovací pracoviště, měřící techniku a zjistit reálné chování materiálu při svařování. Po odzkoušení svařovacího pracoviště už byly svařeny jednotlivé vzorky. Jednalo se o čtyři svary s různou teplotou předehřevu 200 a 400°C (kap. 9.5.4). U všech vzorků bylo měřeno teplotní pole v průběhu svařování i ostatní svařovací parametry pomocí programu WeldMonitor. Ani u jednoho ze vzorků se nevyskytly trhliny způsobené svařovacím procesem. Svařené vzorky byly po svařování zaslány na analýzu zbytkových napětí na VŠB-TU Ostrava, aby mohlo dojít i k porovnání zbytkových napětí se simulačními výpočty.

Posledním cílem bylo stanovení metodiky přípravy a vyhodnocení simulačního výpočtu s využitím podkladů z experimentálního měření. Tento cíl byl řešen v rámci kapitoly 9.6, kde je uveden postup tvorby a realizace simulačního výpočtu. A to již od tvorby modelu a odladění zdroje tepla, až po verifikaci teplotních a napěťových polí přímými a nepřímými metodami. Dále se jednalo o způsob dalšího zpracování výsledných dat. Především získání



přehledu o potenciálních kritických místech v průběhu svařovacího procesu a chladnutí pomocí vyhodnocovacího programu MOVYPRO 07.

Tato disertační práce přímo navazuje na další práce, především na disertační práci [21]. Ověřuje teoretické poznatky z této práce, nyní již při reálném svařování. Také využívá programu MOVYPRO 07, jenž se ukázal jako vhodný doplňkový nástroj k ověření svařovacího postupu při svařování obtížně svařitelných materiálů, jakým je i aluminid železa.

Jako doporučení pro další výzkum navrhuji realizovat svary na složitějších dílech (koutové, rohové, atp.). S ohledem na dosažené výsledky srovnávacích analýz se jako důležité jeví i upřesnění vstupních dat materiálových vlastností pro oblast vysokých teplot.

Práce vznikla v rámci řešení výzkumného záměru MŠM 4674788501
a grantového projektu GAČR 106/07/1288.

12. Seznam použité literatury

- [1] KRATOCHVÍL, P., NEUMANN, H.: *Welds of Fe₃Al-type alloy with hardened structure*. Intermetallics 17 (2009), s. 378–380, 2009.
- [2] VODIČKOVÁ, V.: *Fyzikálně metalurgické postupy při úpravě mechanických vlastností slitin na bázi FeAl*. Disertační práce, Technická univerzita v Liberci, 2004.
- [3] MC KAMEY, DE VAN, TORTORELLI, SIKKA: *A review of recent developments on Fe₃Al-based alloys*. Intermetallics 1991 6(8), 1779-805, 1991
- [4] KURUVILLA, A., STOLOF, N.: *High temperature ordered intermetallics II*. MRS Symp. Proc. 81, s. 229-238, 1987.
- [5] BAKER, I., MUNROE, P.: *High-temperature aluminides and intermetallics*. Warrendale 1990, s. 425-451, The materials Society, 1990.
- [6] DAVID, S., ZACHARIA, T.: *Heat resistant materials*. Materials Park 1991, s. 169-73, OH: ASM Int. Eds., 1991.
- [7] BORDEAU, R.: *Development of iron aluminides*. AFWALL-TR-4009, 1987.
- [8] MCKAMEY, C.G.: *Iron aluminides*. In Physical metalurgy and processing of intermetallic compounds. Ed. Stoloff, Sikka, Chapman&Hall, s. 351-391, 1996.
- [9] LIU, C., MCKAMEY C.G.: *Alloy development of FeAl aluminide alloys for structural usage*. ORNL/TM-12199, Oak Ridge Laboratory, 1993.
- [10] REGINA, J., DUPONT, J.: *Fe-Al based alloys containing Cr additions Part II. Scale morphology*, Materials Science and Engineering 2005, A. 405(1-2), s. 102-110, 2005.
- [11] BANOVIC, S., DUPONT J.: *The role of aluminium on the weldability and sulfidation behavior of iron aluminium cladding*. Welding Journal 78, s. 2-25, 1999.
- [12] SLOVÁČEK, M.: *Numerické simulace svařování, výpočet a hodnocení distorzí a zbytkových napětí*. Disertační práce, Univerzita obrany, Brno, 2005.
- [13] TMĚJ, J., NEUMANN, H., JENŠÍ, S.: *Teorie svařování*. TUL Liberec, 1990.
- [14] MORAVEC, J.- BRADÁČ, J. - NEUMANN, H.: *Sysweld programme output data analysis*. PROTECHMA 08, Košice, Acta mechanica slovak, ISSN 1335-2393.
- [15] BARTÁK, J. aj.: *Navrhování a posuzování svařovaných konstrukcí a tlakových zařízení*. Učební texty pro kurzy svářečských inženýrů, ZEROSS Ostrava, 2001.
- [16] KREBS, J.: *Deformace a pnutí ve svařovaných konstrukcích*. SNTL Praha, 1964.
- [17] MORAVEC, J.- BRADÁČ, J.: *Selection of right technological welding procedure on the simulations computations basis*. Nové poznatky v technologiích, Ústí 2008, Sborník příspěvků, s. 100 , ISBN 978-80-7044-969-1.



- [18] RADAJ, D.: *Heat effects of welding—temperature field, residual stresses, distortion*. Berlin, ger-Verlag, 1992.
- [19] VINOKUROV V.A.: *Welding stresses and distortion*. Wethebery, British Library, 1977.
- [20] CENGL Y.A.: *Heat transfer*, New York, McGraw-Hill Companies. United States, 2003, ISBN 0-07-245893-3.
- [21] MORAVEC, J.: *Analýza kritických míst svařovacího procesu na základě simulací v programu SYSWELD*. Disertační práce, Technická univerzita v Liberci, 2008.
- [22] DIVIŠ, V.: *Numerické analýzy MKP v oblasti technologie svařování*. Disertační práce, Fakulta strojního inženýrství, VUT Brno, 2007.
- [23] NEUMANN, H., MORAVEC, J.- BRADÁČ, J.: *Iron aluminides ultimate thermal and strain effects analysis*. Numercial Analysis of Weldability, Graz, 2009.
- [24] HORÁK, O.: *Mechanizované svařování tupých svarů aluminidu železa metodou 141*. Diplomová práce, Technická univerzita v Liberci, 2009.
- [25] ŠEDIVÁ, I.: *Vlastnosti slitiny Fe28Al14Cr z hlediska použití za vysokých teplot*. Disertační práce, Technická univerzita v Liberci, 2003.
- [26] KVASNICA, J.: *Termodynamika*. SNTL/ALFA Praha, 1965.
- [27] LAUER, K.: *Corosion fatigue of iron aluminide alloy weld cladding exposed to combustion environments*. Adv. Mater. Processes 157, 24s-28s, 2000.
- [28] Kolektiv autorů: *Výroba a aplikované inženýrství ve svařování*. Učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů, ZEROSS Ostrava 2001.
- [29] NOVOTNÝ, J.: *Vnitřní pnutí a deformace svarových spojů a svařovaných konstrukcí*. Učební texty pro specializační kurz WT/WI, ČVUT Praha, 2004.
- [30] Barták, J.aj.: *Učební texty pro svářečské specialisty, praktiky a inspektory*. ZEROS Ostrava, 2002.
- [31] OCHODEK, V.: *Měření zbytkových napětí magnetoelastickou metodou na plynovodních potrubích z materiálu X70*. VŠB–TU Ostrava, r. 2006. (Arcellor Mital)
- [32] ČSN EN 1011, *Doporučení pro svařování kovových materiálů*. Český normalizační institut, 2004.
- [33] REGINA, J., DUPONT J., MARDER, A.: *The effect of chromium on the weldability and microstructure of Fe-Cr-Al weld cladding*. Welding Journal 86, 170s-178s, 2007.
- [34] DIVIŠ, V., JUNEK, L.: *Simulace svařovacího procesu, numerická analýza svařování plechů z aluminidu železa*. Zkušební zpráva, Ústav aplikované mechaniky Brno, 2004.

- [35] OCHODEK, V.: *Ověření použitelnosti magnetoelastické metody pro stanovení zbytkových napětí ve svarových spojích aluminidu železa*. Zkušební zpráva, Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2009.
- [36] MORAVEC, J., NEUMANN, H.: *Analýza vlivu přesnosti vybraných vstupních dat na výsledek simulace svařovacího procesu programem SYSWELD*. PRO-TECH-MA 2006. Časopis Acta Mechanica Slovaca, s. 235-240, ISSN 1335-2393.
- [37] MORAVEC, J., BRADÁČ, J.: *Modifications of heat transfer coefficient in welding simulations of iron aluminides Fe_3Al profile components*. MITECH 07, Praha, s. 217-221, ISBN 978-80-213-1650-8.
- [38] BRADÁČ, J - MORAVEC, J.: *Local-Global Approach using by welding Simulations*. Mezinárodní konference (SI 2008), Bratislava 2008, zborník abstraktov ISBN 978-80-227-2987-1 s CD (Proceedings of papers), ISBN 978-80-227-2982-6.
- [39] ČSN EN ISO 13916, *Svařování—Směrnice pro měření teploty předehřevu, teploty interpass a teploty ohřevu*. Český normalizační institut, 1998.

13. Seznam autorských publikací k dané problematice

- [1] MORAVEC, J., BRADÁČ, J.: *Modifications of heat transfer coefficient in welding simulations of iron aluminides Fe_3Al profile components*. MITECH 07, Praha, s. 217-221, ISBN 978-80-213-1650-8.
- [2] BRADÁČ, J., MORAVEC, J.: *Examination of the impact of selected input parameter on the resulting accuracy of welding simulations*. Mezinárodní konference Erin 2007, Bratislava, Sborník abstraktů, s. 63, ISBN: 978-80-227-2636-8.
- [3] MORAVEC, J., NEUMANN, H., BRADÁČ, J.: *The distribution of longitudinal and trasnversal residual stresses in welding of Fe_3Al plate*. TECHNOLOGIA 2007, Bratislava, s. 350, ISBN 978-80-227-2712-9.
- [4] BRADÁČ, J.: *Preheating temperature effect on residual stresses in welding of Fe_3Al plate*. International conference of mechanical engineering (SI 2007), Bratislava, s.73 ISBN 978-80-227-2768.
- [5] MORAVEC, J.- BRADÁČ, J.: *Selection of right technological welding procedure on the simulations computations basis*. Nové poznatky v technologiích, Ústí 2008, Sborník příspěvků, s. 100 (CD), ISBN 978-80-7044-969-1.
- [6] MORAVEC, J., BRADÁČ, J - NEUMANN, H.: *Movypro 07 programme using to critical places detection of welding prosess*. ERIN 2008, ročník II., recenzovaný sborník, s. 252 (CD), ISBN 978-80-7318-529-9.
- [7] MORAVEC, J.- BRADÁČ, J - NEUMANN, H.: *Sysweld programme output data analysis*. Konference PROTECHMA 2008, Košice, Časopis: Acta mechanica slovak, ISSN 1335-2393.
- [8] MORAVEC, J., BRADÁČ, J.: *Acquisition of input data for fusion welding simulations based on real experiments*. Mezinárodní konference ERIN 09, Ostrava 2009, Sborník abstraktů, CD sborník přednášek, ISBN 978-80-248-1982-2.
- [9] BRADÁČ, J - MORAVEC, J.: *Preheating effect to the final stresses by welding of iron aluminide*. Mezinárodní konference MITECH 09, Praha 2009, s. 45, ISBN 978-80-213-1931-8.
- [10] NEUMANN, H., MORAVEC, J.- BRADÁČ, J.: *Iron aluminides ultimate thermal and strain effects analysis*, Numercial Analysis of Weldability, Graz, 2009.

Přílohy

Tabulka 9 teplotní závislost součinitele přestupu tepla prouděním	138
Tabulka 10 teplotní závislost součinitele přestupu tepla sáláním	138
Obrázek 9.18 výstup z programu MOVYPRO 07 pro teplotu předehřevu 20°C	139
Obrázek 9.19 výstup z programu MOVYPRO 07 pro teplotu předehřevu 100°C	139
Obrázek 9.20 výstup z programu MOVYPRO 07 pro teplotu předehřevu 200°C	140
Obrázek 9.21 výstup z programu MOVYPRO 07 pro teplotu předehřevu 300°C	140
Obrázek 9.22 výstup z programu MOVYPRO 07 pro teplotu předehřevu 400°C	141
Obrázek 9.27 křivka průběhu teplotního pole a rovnice křivky pro variantu 150°C	141
Obrázek 9.28 křivka průběhu teplotního pole a rovnice křivky pro variantu 250°C	142
Obrázek 9.29 křivka průběhu teplotního pole a rovnice křivky pro variantu 450°C	142
Obrázek 9.30 zápis polynomu do souboru „THERM0.DAT“ pro variantu 150°C	143
Obrázek 9.31 zápis polynomu do souboru „THERM0.DAT“ pro variantu 250°C	144
Obrázek 9.32 zápis polynomu do souboru „THERM0.DAT“ pro variantu 450°C	145
Obrázek 9.33 výstup z programu MOVYPRO 07 pro teplotu předehřevu 150°C	146
Obrázek 9.34 výstup z programu MOVYPRO 07 pro teplotu předehřevu 250°C	146
Obrázek 9.35 výstup z programu MOVYPRO 07 pro teplotu předehřevu 350°C	147
Obrázek 9.36 výstup z programu MOVYPRO 07 pro teplotu předehřevu 450°C	147
Obrázek 9.44 výstup z programu MOVYPRO 07 pro variantu s dvěma maximy teplot	148
Obrázek 9.45 výstup z programu MOVYPRO 07 pro variantu s rostoucí tepl. ke krajům	148
Obrázek 9.46 výstup z programu MOVYPRO 07 pro variantu s pohybujícími se zdroji	149
Obrázek 9.83 grafické znázornění rozložení napětí v ose x v jednotlivých vrstvách	149
Obrázek 9.84 grafické znázornění rozložení napětí v ose y v jednotlivých vrstvách	150
Tabulka 29 čísla uzlových bodů simulačního modelu odpovídajících měřeným místům	150
Obrázek 9.86 porovnání zbytkových napětí z měření a simulací vrstva V2 (příčný řez)	151
Obrázek 9.87 porovnání zbytkových napětí z měření a simulací vrstva V3 (příčný řez)	151
Obrázek 9.88 porovnání zbytkových napětí z měření a simulací vrstva V4 (příčný řez)	152
Obrázek 9.89 porovnání zbytkových napětí z měření a simulací vrstva V5 (příčný řez)	152
Obrázek 9.90 porovnání zbytkových napětí z měření a simulací vrstva V6 (příčný řez)	153
Obrázek 9.91 porovnání zbytkových napětí z měření a simulací vrstva V7 (příčný řez)	153
Obrázek 9.92 křivka chlazení pece ze 700°C	154

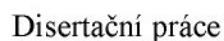


Tab. 9 Teplotní závislost součinitele přestupu tepla prouděním

Teplota [°C]	20	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
α [W.m⁻².K⁻¹]	0	19,5	26,4	30,3	33	35,1	36,7	38,1	39,2	40,2	41
Teplota [°C]	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1000	1050
α [W.m⁻².K⁻¹]	41,7	42,4	43	43,5	44	44,4	44,8	45,1	45,5	45,8	46
Teplota [°C]	1100	1150	1200	1250	1300	1350	1400	1450	1500	1550	1600
α [W.m⁻².K⁻¹]	46,3	46,5	46,8	47	47,2	47,4	47,5	47,7	47,9	48	48,1
Teplota [°C]	1650	1700	1750	1800	1850	1900	1950	2000	2050	2100	2150
α [W.m⁻².K⁻¹]	48,3	48,4	48,5	48,6	48,8	48,9	49	49,1	49,2	49,2	49,3

Tab. 10 Teplotní závislost součinitele přestupu tepla sáláním

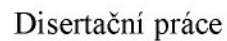
Teplota [°C]	20	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
α [W.m⁻².K⁻¹]	0	6,7	8,5	10,8	13,5	16,6	20,4	24,6	29,5	35,1	41,3
Teplota [°C]	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1000	1050
α [W.m⁻².K⁻¹]	48,3	56,1	64,7	74,2	84,5	95,9	108,2	121,6	136	151,6	168,3
Teplota [°C]	1100	1150	1200	1250	1300	1350	1400	1450	1500	1550	1600
α [W.m⁻².K⁻¹]	186,3	205,5	226	247,8	271	295,6	321,7	349,3	378,5	409,2	441,6
Teplota [°C]	1650	1700	1750	1800	1850	1900	1950	2000	2050	2100	2150
α [W.m⁻².K⁻¹]	475,6	511,4	548,9	588,2	629,4	672,5	717,5	764,4	813,4	864,5	917,6

[illegible]

Obr. 9.18 Výstup z programu MOVYPRO 07 pro 20°C

[illegible]

Obr. 9.19 Výstup z programu MOVYPRO 07 pro 100°C

[illegible]

Obr. 9.20 Výstup z programu MOVYPRO 07 pro 200°C

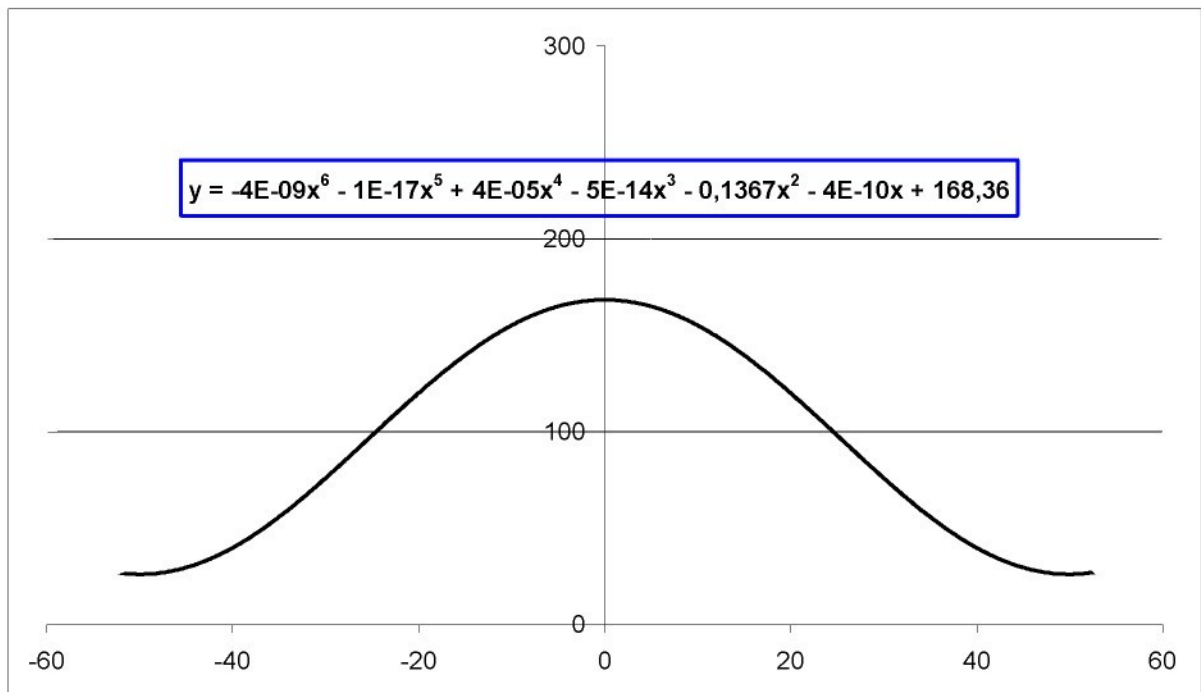
[illegible]

Obr. 9.21 Výstup z programu MOVYPRO 07 pro 300°C

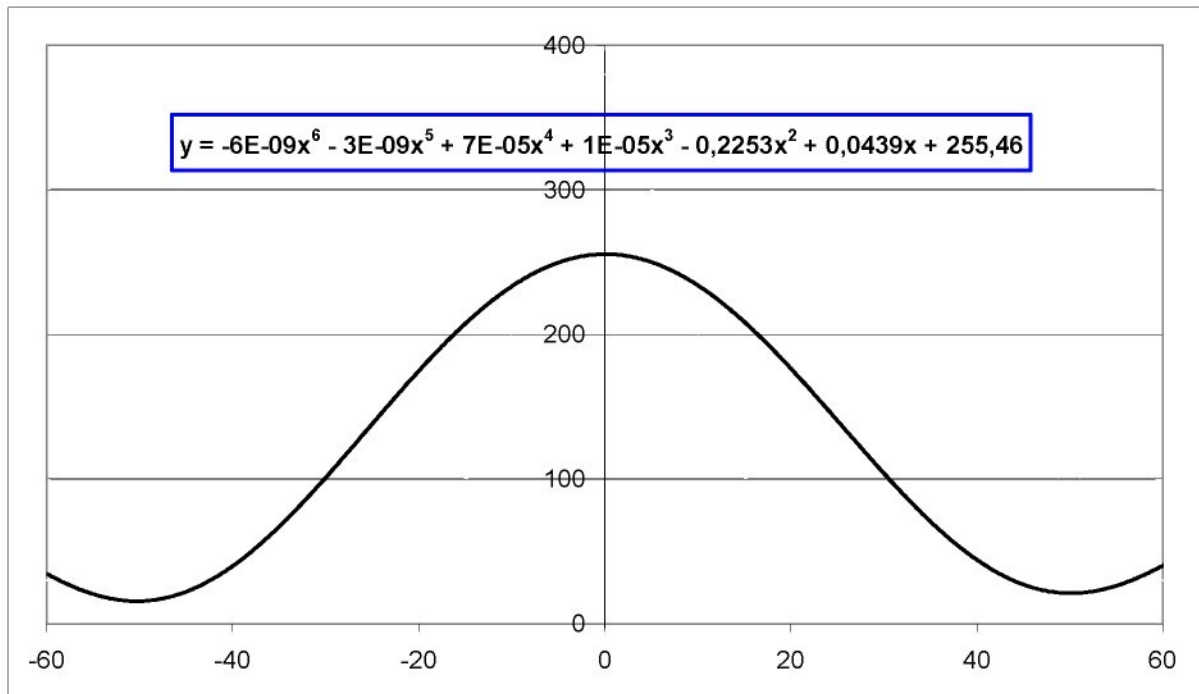


6.6667	44	193.333	883	0	0	0	0	0	0	0	0
13.3333	281	200	866	0	0	0	0	0	0	0	0
20	504	206.667	868	0	0	0	0	0	0	0	0
26.6667	707	213.333	867	0	0	0	0	0	0	0	0
33.3333	783	220	853	0	0	0	0	0	0	0	0
40	955	226.667	842	0	0	0	0	0	0	0	0
46.6667	967	233.333	842	0	0	0	0	0	0	0	0
53.3333	967	240	838	0	0	0	0	0	0	0	0
60	942	246.667	832	0	0	0	0	0	0	0	0
66.6667	939	253.333	828	0	0	0	0	0	0	0	0
73.3333	921	260	820	0	0	0	0	0	0	0	0
80	915	266.667	813	0	0	0	0	0	0	0	0
86.6667	925	273.333	860	0	0	0	0	0	0	0	0
93.3333	938	280	852	0	0	0	0	0	0	0	0
100	913	286.667	842	0	0	0	0	0	0	0	0
106.667	928	293.333	827	0	0	0	0	0	0	0	0
113.333	913	300	799	0	0	0	0	0	0	0	0
120	901	400	0	0	0	0	0	0	0	0	0
126.667	906	500	0	0	0	0	0	0	0	0	0
133.333	903	600	0	0	0	0	0	0	0	0	0
140	898	700	0	0	0	0	0	0	0	0	0
146.667	899	800	0	0	0	0	0	0	0	0	0
153.333	896	900	0	0	0	0	0	0	0	0	0
160	891	1000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
166.667	891	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
173.333	887	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
180	881	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
186.667	923	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

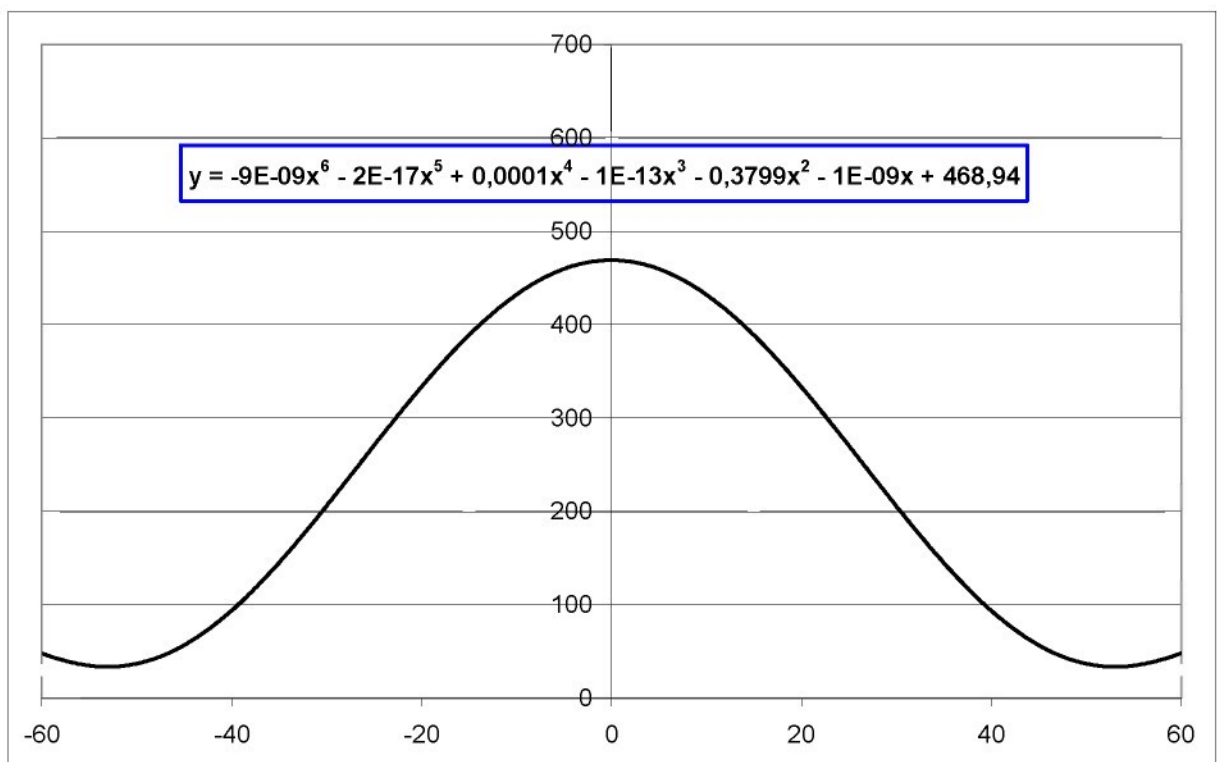
Obr. 9.22 Výstup z programu MOVYPRO 07 pro 400°C



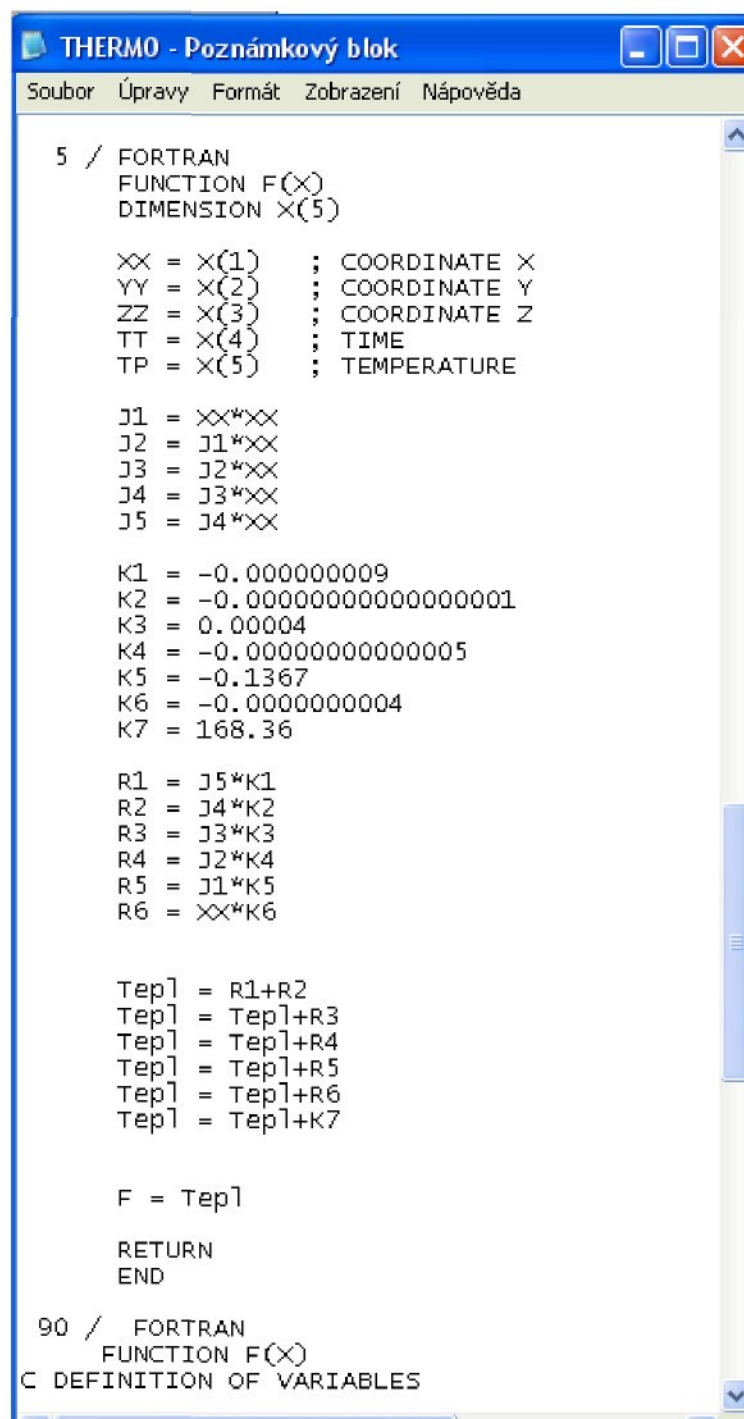
Obr. 9.27 Křivka průběhu teplotního pole a rovnice křivky pro variantu 150°C



Obr. 9.28 Křivka průběhu teplotního pole a rovnice křivky pro variantu 250°C



Obr. 9.29 Křivka průběhu teplotního pole a rovnice křivky pro variantu 450°C



```
THERM0 - Poznámkový blok
Soubor  Úpravy  Formát  Zobrazení  Nápověda

5 /  FORTRAN
    FUNCTION F(X)
    DIMENSION X(5)

    XX = X(1)      ; COORDINATE X
    YY = X(2)      ; COORDINATE Y
    ZZ = X(3)      ; COORDINATE Z
    TT = X(4)      ; TIME
    TP = X(5)      ; TEMPERATURE

    J1 = XX*XX
    J2 = J1*XX
    J3 = J2*XX
    J4 = J3*XX
    J5 = J4*XX

    K1 = -0.000000009
    K2 = -0.00000000000000000001
    K3 = 0.00004
    K4 = -0.0000000000000005
    K5 = -0.1367
    K6 = -0.0000000004
    K7 = 168.36

    R1 = J5*K1
    R2 = J4*K2
    R3 = J3*K3
    R4 = J2*K4
    R5 = J1*K5
    R6 = XX*K6

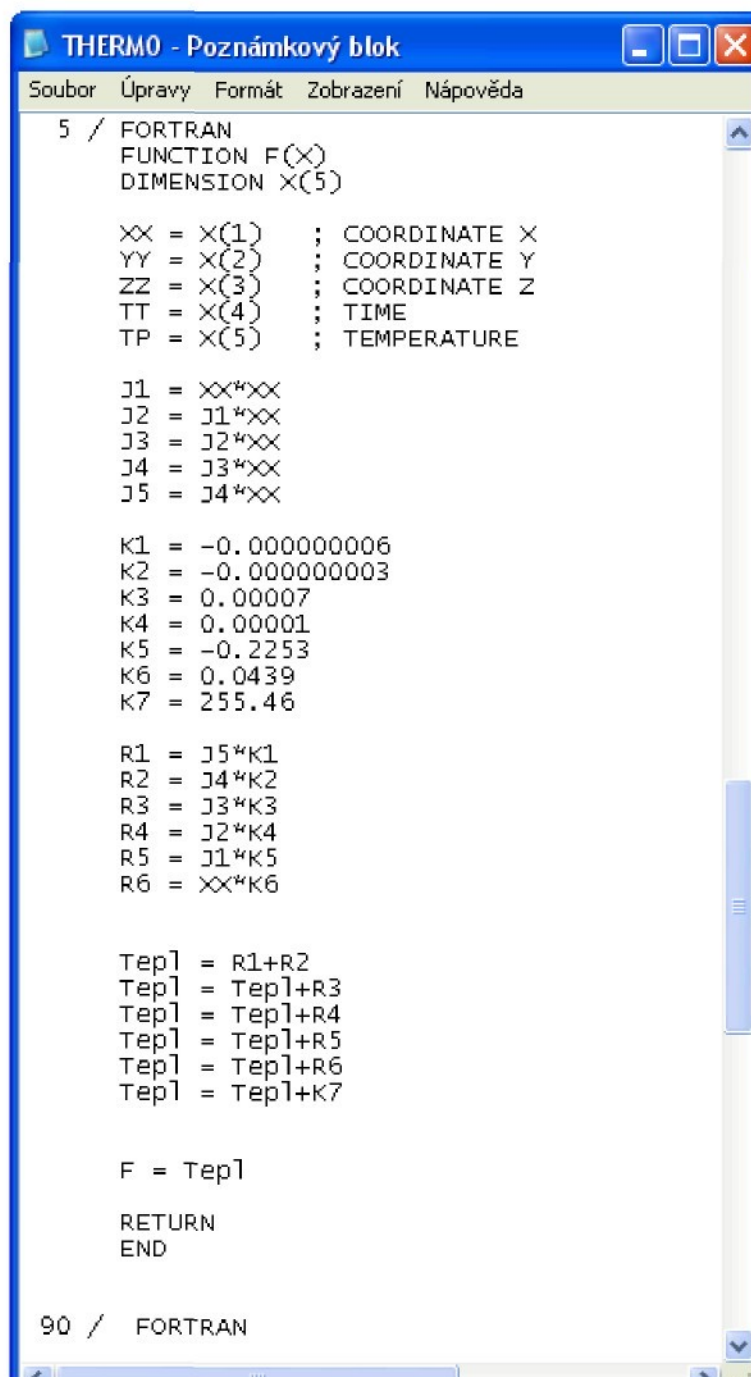
    Tep1 = R1+R2
    Tep1 = Tep1+R3
    Tep1 = Tep1+R4
    Tep1 = Tep1+R5
    Tep1 = Tep1+R6
    Tep1 = Tep1+K7

    F = Tep1

    RETURN
    END

90 /  FORTRAN
    FUNCTION F(X)
    C DEFINITION OF VARIABLES
```

Obr. 9.30 Zápis polynomu do souboru „THERM0.DAT“ pro variantu 150°C



```
5 / FORTRAN
FUNCTION F(X)
DIMENSION X(5)

XX = X(1) ; COORDINATE X
YY = X(2) ; COORDINATE Y
ZZ = X(3) ; COORDINATE Z
TT = X(4) ; TIME
TP = X(5) ; TEMPERATURE

J1 = XX*XX
J2 = J1*XX
J3 = J2*XX
J4 = J3*XX
J5 = J4*XX

K1 = -0.000000006
K2 = -0.000000003
K3 = 0.00007
K4 = 0.00001
K5 = -0.2253
K6 = 0.0439
K7 = 255.46

R1 = J5*K1
R2 = J4*K2
R3 = J3*K3
R4 = J2*K4
R5 = J1*K5
R6 = XX*K6

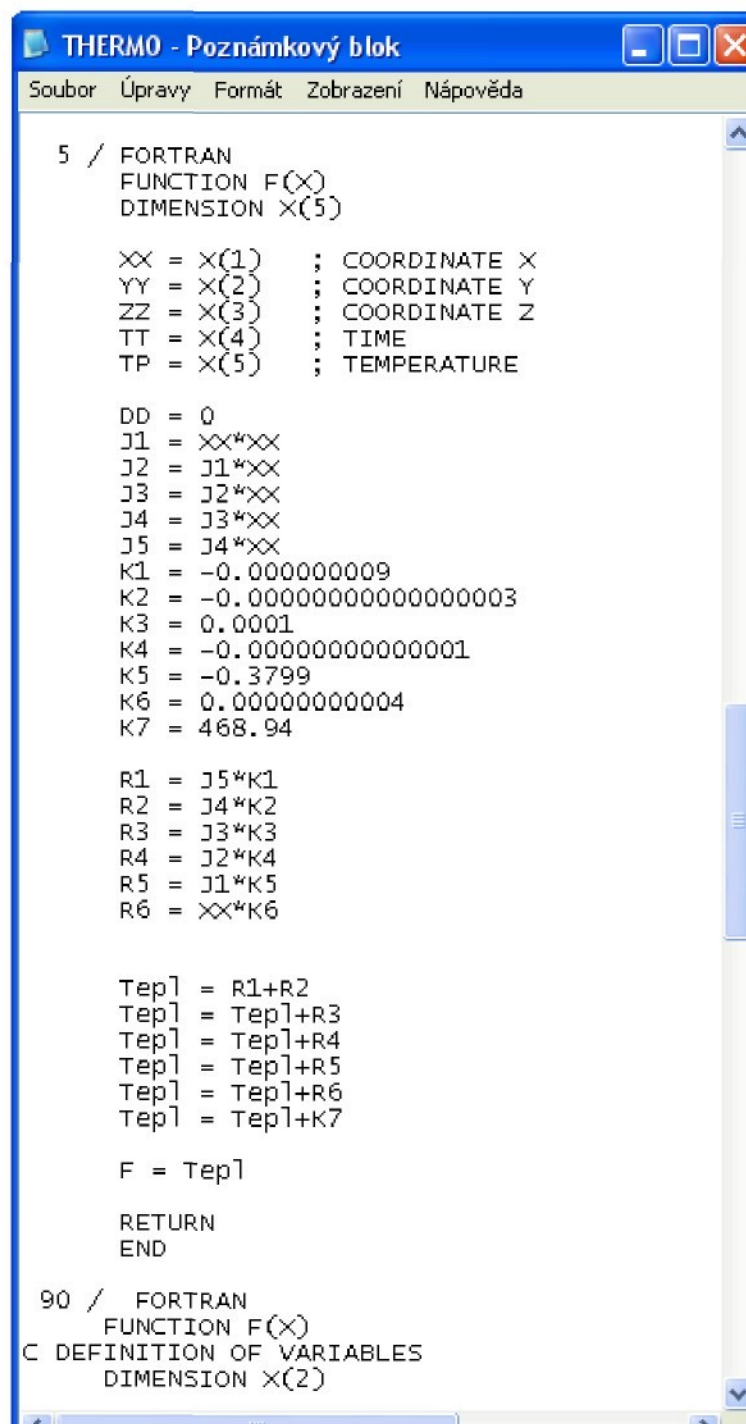
Tep1 = R1+R2
Tep1 = Tep1+R3
Tep1 = Tep1+R4
Tep1 = Tep1+R5
Tep1 = Tep1+R6
Tep1 = Tep1+K7

F = Tep1

RETURN
END

90 / FORTRAN
```

Obr. 9.31 Zápis polynomu do souboru „THERM0.DAT“ pro variantu 250°C



```
THERM0 - Poznámkový blok
Soubor  Úpravy  Formát  Zobrazení  Nápověda

5 /  FORTRAN
    FUNCTION F(X)
    DIMENSION X(5)

    XX = X(1)      ; COORDINATE X
    YY = X(2)      ; COORDINATE Y
    ZZ = X(3)      ; COORDINATE Z
    TT = X(4)      ; TIME
    TP = X(5)      ; TEMPERATURE

    DD = 0
    J1 = XX*XX
    J2 = J1*XX
    J3 = J2*XX
    J4 = J3*XX
    J5 = J4*XX
    K1 = -0.000000009
    K2 = -0.0000000000000000003
    K3 = 0.0001
    K4 = -0.0000000000000001
    K5 = -0.3799
    K6 = 0.000000000004
    K7 = 468.94

    R1 = J5*K1
    R2 = J4*K2
    R3 = J3*K3
    R4 = J2*K4
    R5 = J1*K5
    R6 = XX*K6

    Tep1 = R1+R2
    Tep1 = Tep1+R3
    Tep1 = Tep1+R4
    Tep1 = Tep1+R5
    Tep1 = Tep1+R6
    Tep1 = Tep1+K7

    F = Tep1

    RETURN
    END

90 /  FORTRAN
    FUNCTION F(X)
    C DEFINITION OF VARIABLES
    DIMENSION X(2)
```

Obr. 9.32 Zápis polynomu do souboru „THERM0.DAT“ pro variantu 450°C



6.66667	183	193.333	908	0	0	0	0	0	0	0	0
13.33333	418	200	897	0	0	0	0	0	0	0	0
20	686	206.667	887	0	0	0	0	0	0	0	0
26.6667	741	213.333	887	0	0	0	0	0	0	0	0
33.3333	777	220	869	0	0	0	0	0	0	0	0
40	932	226.667	873	0	0	0	0	0	0	0	0
46.6667	1047	233.333	867	0	0	0	0	0	0	0	0
53.3333	1048	240	863	0	0	0	0	0	0	0	0
60	1034	246.667	857	0	0	0	0	0	0	0	0
66.6667	1026	253.333	845	0	0	0	0	0	0	0	0
73.3333	1015	260	838	0	0	0	0	0	0	0	0
80	946	266.667	828	0	0	0	0	0	0	0	0
86.6667	932	273.333	842	0	0	0	0	0	0	0	0
93.3333	929	280	867	0	0	0	0	0	0	0	0
100	934	286.667	944	0	0	0	0	0	0	0	0
106.667	943	293.333	850	0	0	0	0	0	0	0	0
113.333	948	300	761	0	0	0	0	0	0	0	0
120	946	400	0	0	0	0	0	0	0	0	0
126.667	958	500	0	0	0	0	0	0	0	0	0
133.333	958	600	0	0	0	0	0	0	0	0	0
140	959	700	0	0	0	0	0	0	0	0	0
146.667	957	800	0	0	0	0	0	0	0	0	0
153.333	956	900	0	0	0	0	0	0	0	0	0
160	961	1000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
166.667	964	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
173.333	962	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
180	957	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
186.667	952	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Obr. 9.33 Výstup z programu MOVYPRO 07 pro teplotu předehřevu 150°C

6.66667	126	193.333	866	0	0	0	0	0	0	0	0
13.3333	327	200	890	0	0	0	0	0	0	0	0
20	555	206.667	880	0	0	0	0	0	0	0	0
26.6667	684	213.333	879	0	0	0	0	0	0	0	0
33.3333	746	220	858	0	0	0	0	0	0	0	0
40	953	226.667	861	0	0	0	0	0	0	0	0
46.6667	1019	233.333	849	0	0	0	0	0	0	0	0
53.3333	971	240	849	0	0	0	0	0	0	0	0
60	977	246.667	844	0	0	0	0	0	0	0	0
66.6667	978	253.333	832	0	0	0	0	0	0	0	0
73.3333	965	260	824	0	0	0	0	0	0	0	0
80	949	266.667	822	0	0	0	0	0	0	0	0
86.6667	883	273.333	818	0	0	0	0	0	0	0	0
93.3333	926	280	848	0	0	0	0	0	0	0	0
100	882	286.667	956	0	0	0	0	0	0	0	0
106.667	877	293.333	791	0	0	0	0	0	0	0	0
113.333	877	300	779	0	0	0	0	0	0	0	0
120	878	400	4	0	0	0	0	0	0	0	0
126.667	897	500	0	0	0	0	0	0	0	0	0
133.333	905	600	0	0	0	0	0	0	0	0	0
140	911	700	0	0	0	0	0	0	0	0	0
146.667	910	800	0	0	0	0	0	0	0	0	0
153.333	911	900	0	0	0	0	0	0	0	0	0
160	905	1000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
166.667	932	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
173.333	911	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
180	905	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
186.667	893	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Obr. 9.34 Výstup z programu MOVYPRO 07 pro teplotu předehřevu 250°C



13.3333	433	200	885	0	0	0	0	0	0	0	0
20	700	206.667	884	0	0	0	0	0	0	0	0
26.6667	701	213.333	879	0	0	0	0	0	0	0	0
33.3333	872	220	855	0	0	0	0	0	0	0	0
40	990	226.667	848	0	0	0	0	0	0	0	0
46.6667	1034	233.333	840	0	0	0	0	0	0	0	0
53.3333	1009	240	830	0	0	0	0	0	0	0	0
60	960	246.667	828	0	0	0	0	0	0	0	0
66.6667	940	253.333	812	0	0	0	0	0	0	0	0
73.3333	953	260	807	0	0	0	0	0	0	0	0
80	1003	266.667	805	0	0	0	0	0	0	0	0
86.6667	963	273.333	809	0	0	0	0	0	0	0	0
93.3333	944	280	824	0	0	0	0	0	0	0	0
100	929	286.667	928	0	0	0	0	0	0	0	0
106.667	965	293.333	791	0	0	0	0	0	0	0	0
113.333	946	300	746	0	0	0	0	0	0	0	0
120	946	400	4	0	0	0	0	0	0	0	0
126.667	896	500	8	0	0	0	0	0	0	0	0
133.333	925	600	0	0	0	0	0	0	0	0	0
140	948	700	0	0	0	0	0	0	0	0	0
146.667	947	800	0	0	0	0	0	0	0	0	0
153.333	948	900	0	0	0	0	0	0	0	0	0
160	946	1000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
166.667	962	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
173.333	955	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
180	924	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
186.667	884	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Obr. 9.35 Výstup z programu MOVYPRO 07 pro teplotu předehřevu 350°C

6.66667	71	193.333	926	0	0	0	0	0	0	0	0
13.3333	290	200	937	0	0	0	0	0	0	0	0
20	541	206.667	938	0	0	0	0	0	0	0	0
26.6667	689	213.333	929	0	0	0	0	0	0	0	0
33.3333	705	220	902	0	0	0	0	0	0	0	0
40	849	226.667	891	0	0	0	0	0	0	0	0
46.6667	1058	233.333	884	0	0	0	0	0	0	0	0
53.3333	1061	240	882	0	0	0	0	0	0	0	0
60	1014	246.667	891	0	0	0	0	0	0	0	0
66.6667	996	253.333	884	0	0	0	0	0	0	0	0
73.3333	971	260	876	0	0	0	0	0	0	0	0
80	931	266.667	871	0	0	0	0	0	0	0	0
86.6667	932	273.333	853	0	0	0	0	0	0	0	0
93.3333	919	280	813	0	0	0	0	0	0	0	0
100	906	286.667	893	0	0	0	0	0	0	0	0
106.667	936	293.333	781	0	0	0	0	0	0	0	0
113.333	922	300	734	0	0	0	0	0	0	0	0
120	906	400	3	0	0	0	0	0	0	0	0
126.667	898	500	0	0	0	0	0	0	0	0	0
133.333	921	600	0	0	0	0	0	0	0	0	0
140	931	700	0	0	0	0	0	0	0	0	0
146.667	981	800	0	0	0	0	0	0	0	0	0
153.333	979	900	0	0	0	0	0	0	0	0	0
160	968	1000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
166.667	975	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
173.333	946	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
180	916	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
186.667	903	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Obr. 9.36 Výstup z programu MOVYPRO 07 pro teplotu předehřevu 450°C



6,66667	151	193,333	949	0	0	0	0	0	0	0	0
13,3333	310	200	967	0	0	0	0	0	0	0	0
20	537	206,667	989	0	0	0	0	0	0	0	0
26,6667	684	213,333	1011	0	0	0	0	0	0	0	0
33,3333	792	220	1015	0	0	0	0	0	0	0	0
40	867	226,667	1001	0	0	0	0	0	0	0	0
46,6667	1068	233,333	1009	0	0	0	0	0	0	0	0
53,3333	1111	240	998	0	0	0	0	0	0	0	0
60	1133	246,667	1011	0	0	0	0	0	0	0	0
66,6667	1130	253,333	1009	0	0	0	0	0	0	0	0
73,3333	1122	260	995	0	0	0	0	0	0	0	0
80	1082	266,667	991	0	0	0	0	0	0	0	0
86,6667	1076	273,333	989	0	0	0	0	0	0	0	0
93,3333	1020	280	1013	0	0	0	0	0	0	0	0
100	1035	286,667	1013	0	0	0	0	0	0	0	0
106,667	1004	293,333	931	0	0	0	0	0	0	0	0
113,333	1041	300	930	0	0	0	0	0	0	0	0
120	1005	400	1	0	0	0	0	0	0	0	0
126,667	1038	500	0	0	0	0	0	0	0	0	0
133,333	1056	600	0	0	0	0	0	0	0	0	0
140	1051	700	0	0	0	0	0	0	0	0	0
146,667	948	800	0	0	0	0	0	0	0	0	0
153,333	991	900	0	0	0	0	0	0	0	0	0
160	957	1000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
166,667	1020	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
173,333	958	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
180	976	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
186,667	975	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

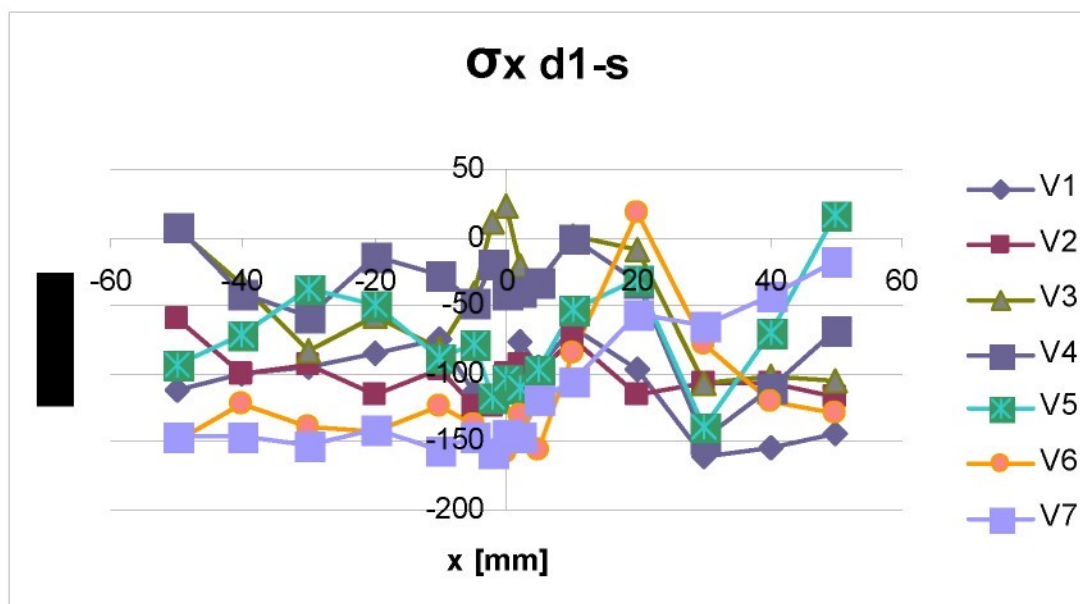
Obr. 9.44 Výstup z programu MOVYPRO 07 pro variantu s dvěma maximy teplot

6,66667	122	193,333	957	0	0	0	0	0	0	0	0
13,3333	337	200	962	0	0	0	0	0	0	0	0
20	594	206,667	957	0	0	0	0	0	0	0	0
26,6667	732	213,333	919	0	0	0	0	0	0	0	0
33,3333	819	220	913	0	0	0	0	0	0	0	0
40	965	226,667	923	0	0	0	0	0	0	0	0
46,6667	998	233,333	942	0	0	0	0	0	0	0	0
53,3333	1024	240	903	0	0	0	0	0	0	0	0
60	1061	246,667	911	0	0	0	0	0	0	0	0
66,6667	1058	253,333	857	0	0	0	0	0	0	0	0
73,3333	1012	260	903	0	0	0	0	0	0	0	0
80	985	266,667	857	0	0	0	0	0	0	0	0
86,6667	1032	273,333	862	0	0	0	0	0	0	0	0
93,3333	996	280	901	0	0	0	0	0	0	0	0
100	945	286,667	864	0	0	0	0	0	0	0	0
106,667	912	293,333	832	0	0	0	0	0	0	0	0
113,333	932	300	802	0	0	0	0	0	0	0	0
120	965	400	0	0	0	0	0	0	0	0	0
126,667	961	500	0	0	0	0	0	0	0	0	0
133,333	972	600	0	0	0	0	0	0	0	0	0
140	968	700	0	0	0	0	0	0	0	0	0
146,667	964	800	0	0	0	0	0	0	0	0	0
153,333	975	900	0	0	0	0	0	0	0	0	0
160	961	1000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
166,667	947	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
173,333	951	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
180	956	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
186,667	941	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

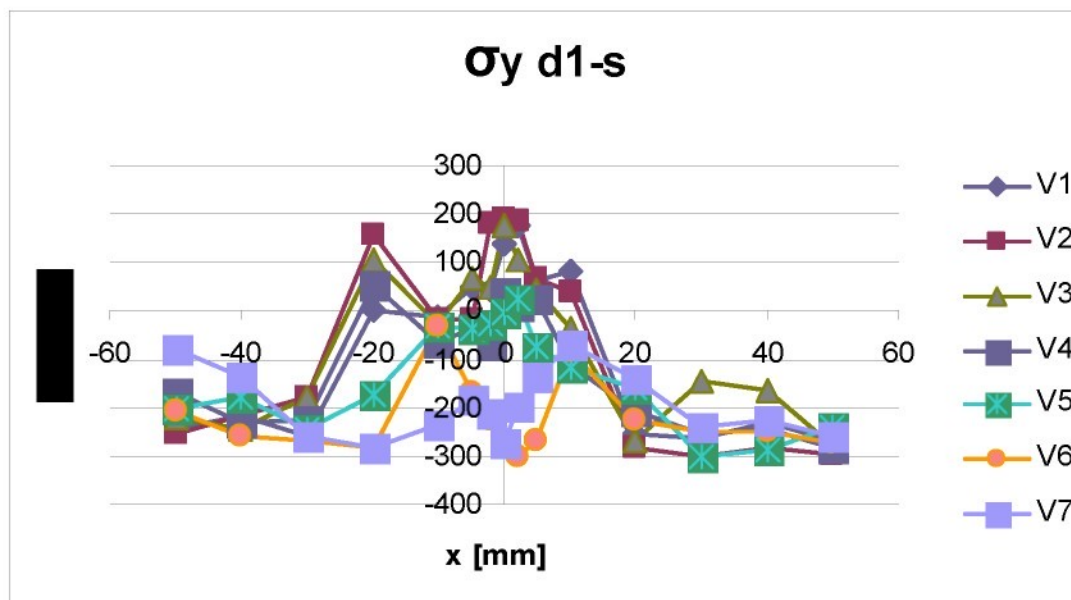
Obr. 9.45 Výstup z programu MOVYPRO 07 pro variantu s teplotou vzrůstající ke krajům

6.6667	137	193.333	953	0	0	0	0	0	0	0	0
13.3333	360	200	972	0	0	0	0	0	0	0	0
20	616	206.667	967	0	0	0	0	0	0	0	0
26.6667	750	213.333	953	0	0	0	0	0	0	0	0
33.3333	816	220	930	0	0	0	0	0	0	0	0
40	963	226.667	914	0	0	0	0	0	0	0	0
46.6667	1127	233.333	928	0	0	0	0	0	0	0	0
53.3333	1133	240	917	0	0	0	0	0	0	0	0
60	1137	246.667	907	0	0	0	0	0	0	0	0
66.6667	1135	253.333	898	0	0	0	0	0	0	0	0
73.3333	1129	260	890	0	0	0	0	0	0	0	0
80	1023	266.667	886	0	0	0	0	0	0	0	0
86.6667	1052	273.333	886	0	0	0	0	0	0	0	0
93.3333	1039	280	919	0	0	0	0	0	0	0	0
100	921	286.667	988	0	0	0	0	0	0	0	0
106.667	984	293.333	842	0	0	0	0	0	0	0	0
113.333	955	300	806	0	0	0	0	0	0	0	0
120	996	400	0	0	0	0	0	0	0	0	0
126.667	1002	500	0	0	0	0	0	0	0	0	0
133.333	988	600	0	0	0	0	0	0	0	0	0
140	993	700	0	0	0	0	0	0	0	0	0
146.667	989	800	0	0	0	0	0	0	0	0	0
153.333	980	900	0	0	0	0	0	0	0	0	0
160	967	1000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
166.667	953	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
173.333	967	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
180	956	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
186.667	948	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Obr. 9.46 Výstup z programu MOVYPRO 07 pro variantu s pohyblivými se zdroji



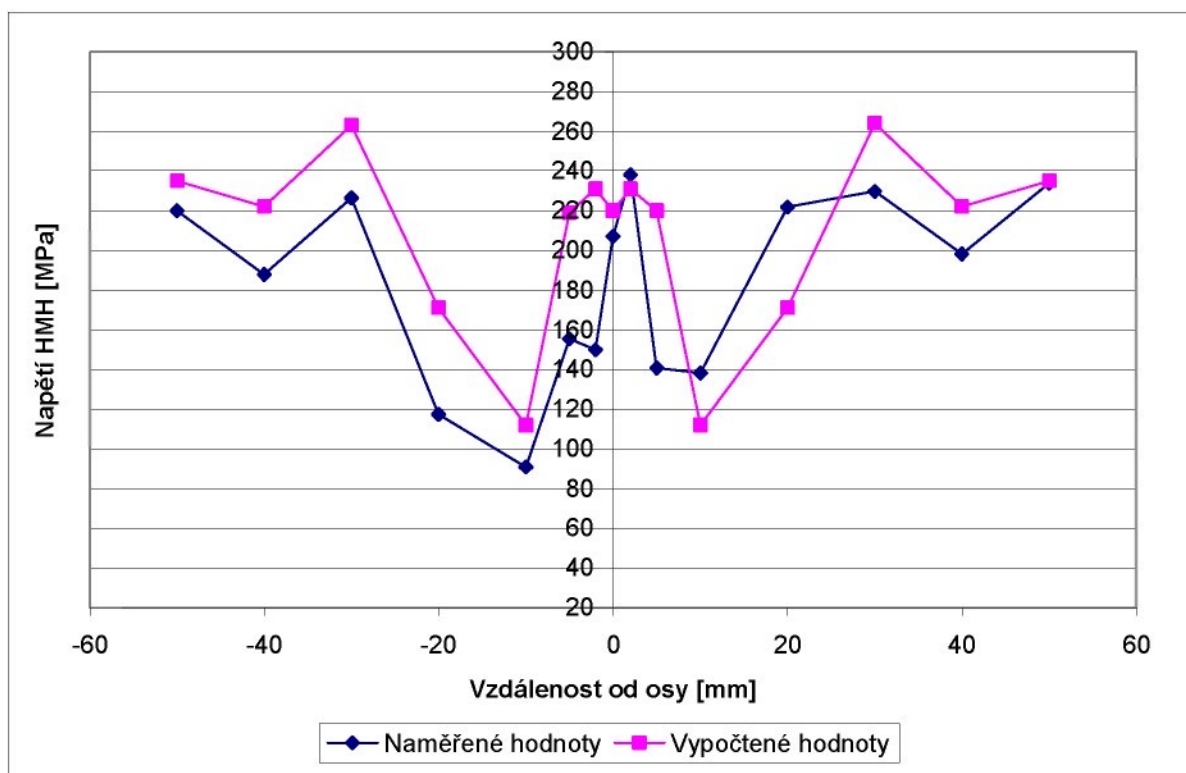
Obr. 9.83 Grafické znázornění rozložení napětí v ose x v jednotlivých vrstvách



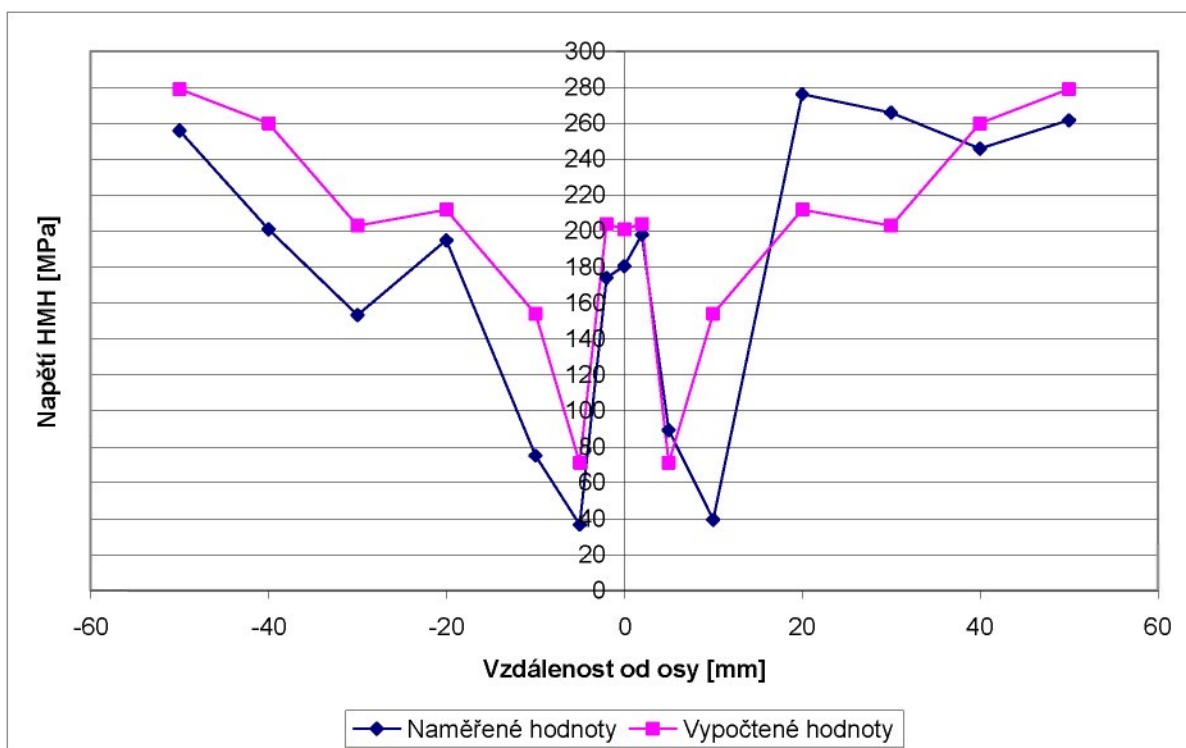
Obr. 9.84 Grafické znázornění rozložení napětí v ose y v jednotlivých vrstvách

Tab. 29 Čísla odpovídajících uzlových bodů v jednotlivých vrstvách

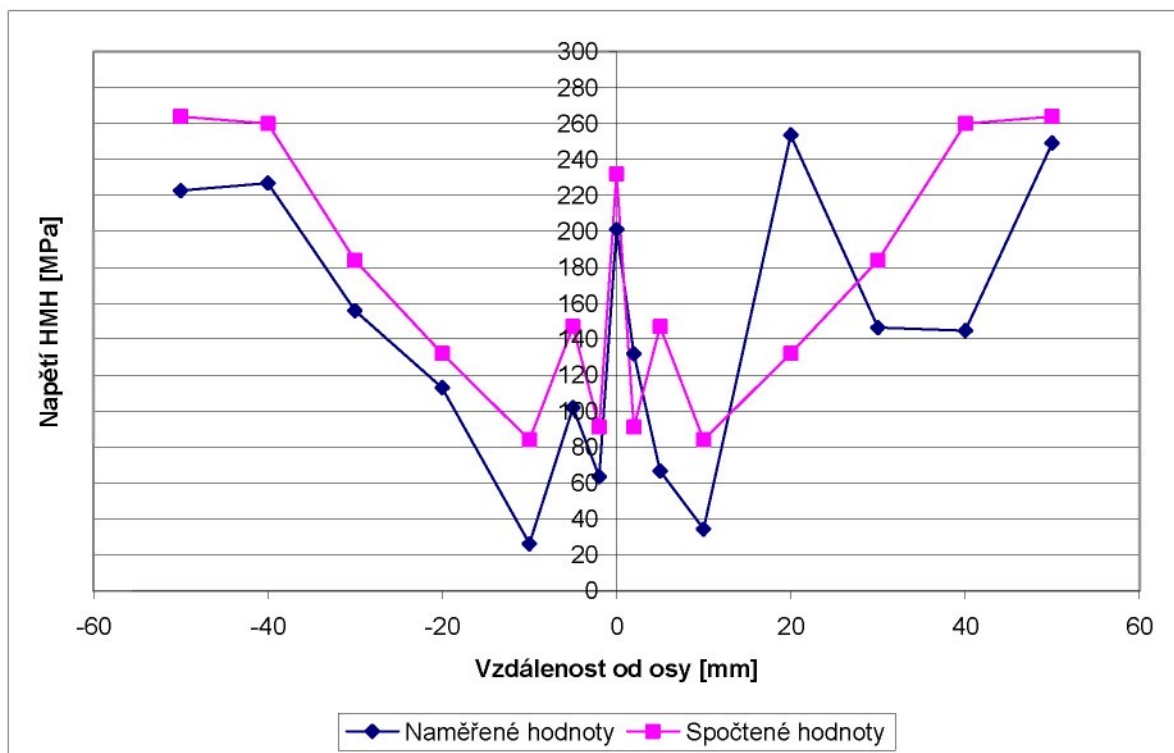
č.b.	Číslo uzlového bodu						
	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7
1	20565	20567	20568	20569	20570	20571	20573
2	20036	20039	20042	20045	20047	20050	20054
3	21235	21238	21242	21245	21248	21250	21254
4	22758	22766	22773	22780	22788	22795	22803
5	884	1184	1464	1764	2089	2399	2709
6	7652	8027	8377	8752	9152	9527	9902
7	7651	8026	8376	8751	9151	9526	9901
8	7649	8024	8374	8749	9149	9524	9899
9	7646	8021	8371	8746	9146	9521	9896
10	13203	13368	13522	13687	13863	14028	14193
11	17911	18141	18356	18586	18831	19056	19281
12	27251	27243	27236	27229	27221	27214	27206
13	28667	28664	28661	28658	27406	28652	28648
14	20243	20240	20237	20324	20228	20226	20225



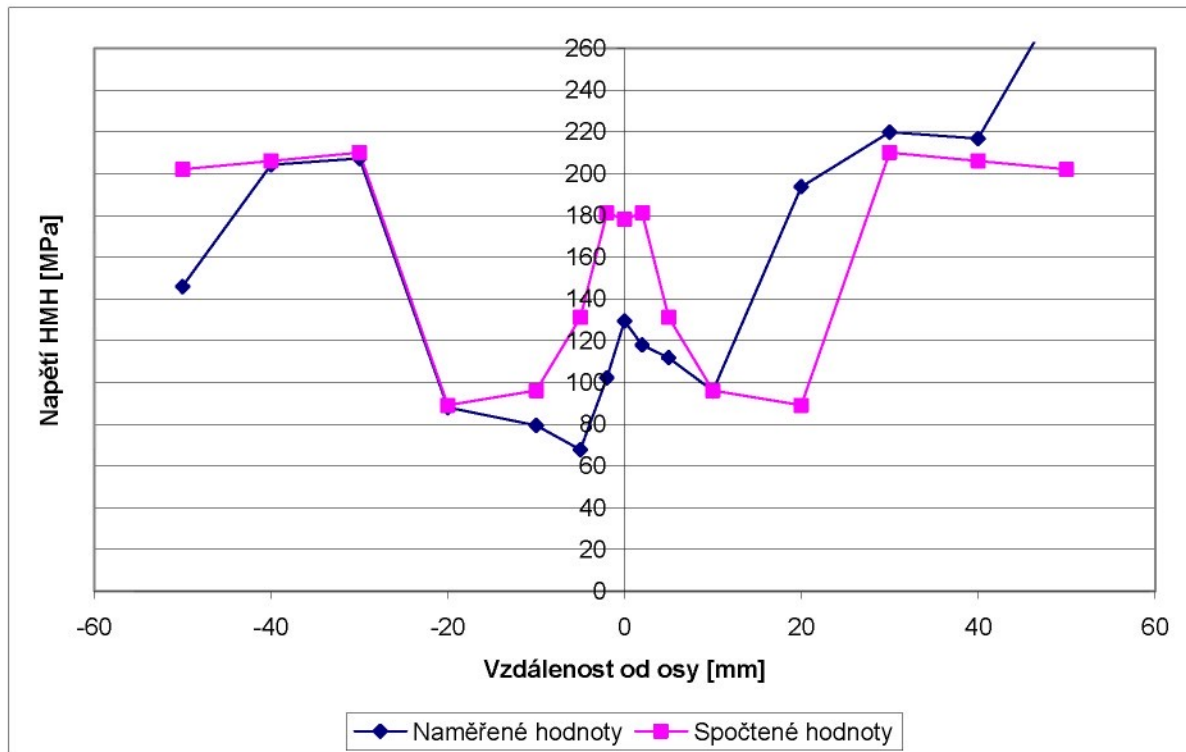
Obr. 9.86 Porovnání zbytkových napětí z měření a simulací pro vrstvu V2 (příčný řez)



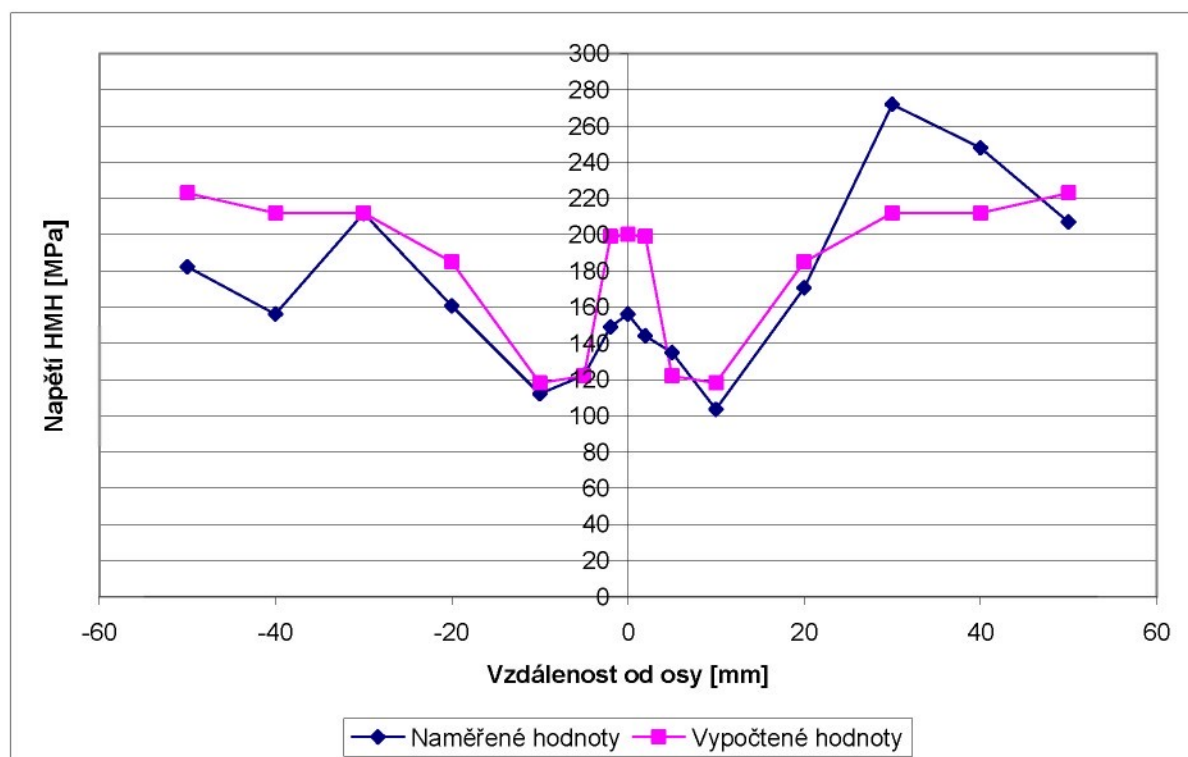
Obr. 9.87 Porovnání zbytkových napětí z měření a simulací pro vrstvu V3 (příčný řez)



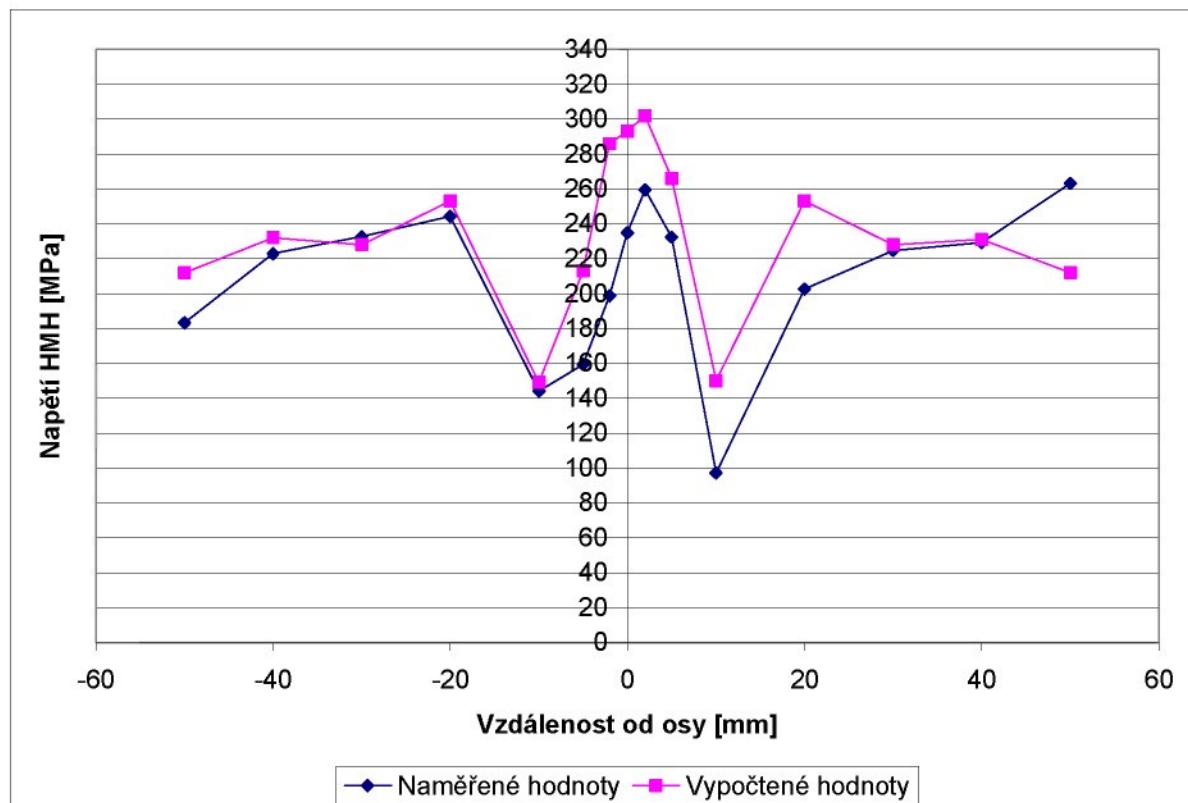
Obr. 9.88 Porovnání zbytkových napětí z měření a simulací pro vrstvu V4 (příčný řez)



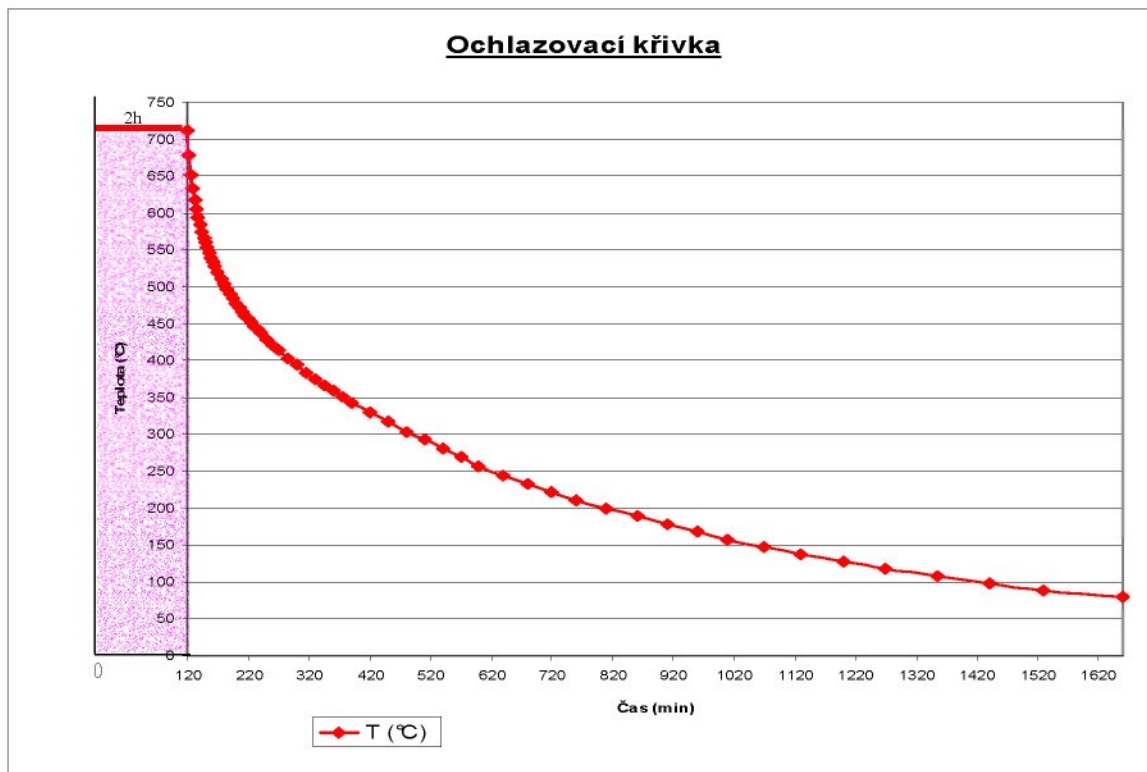
Obr. 9.89 Porovnání zbytkových napětí z měření a simulací pro vrstvu V5 (příčný řez)



Obr. 9.90 Porovnání zbytkových napětí z měření a simulací pro vrstvu V6 (příčný řez)



Obr. 9.91 Porovnání zbytkových napětí z měření a simulací pro vrstvu V7 (příčný řez)



Obr. 9.92 Ochlazovací křivka pece ze 700°C