



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MECHANICAL ENGINEERING

NUMERICKÁ SIMULACE NAVAŘOVÁNÍ LOŽISKOVÝCH ČEPŮ TURBÍNOVÝCH ROTORŮ

NUMERIC SIMULATION OF SURFACING TURBINE ROTORS PINOT PINS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JAN TKANÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. LADISLAV DANĚK, CSc.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student: Bc. Jan Tkaný

který studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303T002)**

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

Numerická simulace navařování ložiskových čepů turbínových rotorů

v anglickém jazyce:

Numeric simulation of surfacing turbine rotors pinot pins

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Renovace opotřeбенých čepů rotoru turbíny navařováním plazmou a navařováním pod tavidlem. Numerická predikce tepelného ovlivnění základního materiálu a deformací po návaru ložiskových ploch z 12% Cr oceli.

Cíle diplomové práce:

1. Stručný popis metody SAW.
2. Zpracování vstupních dat.
3. Numerická simulace strukturních, napěťových a distorzních stavů.
4. Návrh optimální metody a navařovacích parametrů, včetně volby přídavných materiálů.

Seznam

odborné

literatury:

PTÁČEK, L. a kolektiv. Nauka o materiálu II.2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002. ISBN 80-7204-248-3.

KOUKAL, J., SCHWARZ, D. a HAJDÍK, J. Materiály a jejich svařitelnost. 1. vyd. Ostrava: Český svářečský ústav s.r.o. Ostrava, VŠB-Technická univerzita Ostrava. 2009. 241 s. ISBN 978-80-248-2025-5.

Kolektiv autorů. Technologie svařování a zařízení. Ostrava: ZEROSS 2001. 395 s. ISBN 80-85771-81-0.

ASM Handbook. Welding, Brazing and Soldering. Vol. 6. USA: ASM, 2003. 1298 s. ISBN 0-87170-382-3.

TURŇA, M. Speciálne metódy zvarovania. 1. vyd. Bratislava: ALFA. 1989. 384 s. ISBN 80-05-00097-9

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 19.11.2010

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

TKANÝ Jan: Numerická simulace navařování ložiskových čepů turbínových rotorů.

Diplomová práce vypracovaná v rámci magisterského studia M-STG Strojírenská technologie řeší problematiku simulací při navařování ložiskových čepů turbínových rotorů. Na práci bylo pohlíženo jako na přípravné práce před samotným navařováním. Téma zadala firma Siemens Industrial Turbomachinery spol. s r. o. Pro navařování zkušebních desek byla použita metoda SAW a základní materiál byl totožný s materiálem ložiskových čepů, X22CrMoV 12-1. Přídavný materiál je Fluxocord 42. Simulace se prováděly v programech SYSWELD a Visual – WELD. Výstup ze simulačních software jsou teplotní a napěťová pole, materiálové struktury a vytvořené ARA diagramy u základního materiálu, přídavného materiálu a promísené oblasti.

Klíčová slova: navařování, numerická simulace, SAW, SYSWELD, ARA diagram

ABSTRACT

TKANÝ Jan: Numeric simulation of surfacing turbine rotors pinot pins.

The master's diploma thesis elaborated as the master's degree M-STG Manufacturing Technology solves surfacing problems in the simulations of surfacing turbine rotors pinot pins. The work was seen as a preparatory work before the real surfacing. Topic commissioned by Siemens Industrial Turbomachinery Ltd. For welding plates test has been used the method of SAW and the base material was identical to turbine rotor material, X22CrMoV 12-1. Additional material was Fluxocord 42. Simulations were carried out in programs SYSWELD and Visual - WELD. The output of the simulation software are temperature and stress fields, material structures and creations of the CCT diagrams at the base material, filler material, and mixed area.

Keywords: surfacing, numeric simulation, SAW, SYSWELD, CCT diagram

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

TKANÝ, J. *Numerická simulace navařování ložiskových čepů turbínových rotorů*.
Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 105 s.
Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci Numerická simulace navařování ložiskových čepů turbínových rotorů jsem vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury, zdrojů, podkladů a na základě konzultací, pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Brně dne 27. 5. 2011

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kteří mi byli, jak při tvorbě diplomové práce, tak i v průběhu celého studia na FSI VUT v Brně, jakkoliv nápomocní.

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

Obzvlášť chci projevit díky panu Ing. Markovi Slováčkovi, Ph.D., za informace, vstřícnost, ochotu a dobu věnovanou mému školení v software produktech společnosti ESI Group.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

	Str.
1 ÚVOD	9
2 MATERIÁL	10
2.1 Základní materiál	10
2.1.1 Vlastnosti základního materiálu	11
2.1.2 Struktura základního materiálu	13
2.1.3 Martenzitické chromové oceli	14
2.2 Přídavný materiál	16
2.3 Tavidlo	18
3 TECHNOLOGIE NAVAŘOVÁNÍ	20
3.1 Navařování plazmou	20
3.2 Navařování pod tavidlem	21
3.2.1 Princip navařování SAW	22
3.2.2 Volba svařovacích parametrů	23
3.2.2. a Vliv svařovacího proudu	24
3.2.2. b Vliv napětí	24
3.2.2. c Vliv rychlosti sváření	25
3.2.3 Zdroje svařovacího proudu a stabilita oblouku	25
3.2.4 Varianty zvýšení efektivity	26
3.3 Navařování	27
4 VADY VE SVAROVÉM KOVU A TOO	28
4.1 Studené trhliny	28
5 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ	31
6 NUMERICKÉ ANALÝZY	33
6.1 Transient analýza	33
6.2 Lokálně – globální přístup (LGA)	35
6.3 Simulační software SYSWELD	35

6. 3. 1	Geometrický model.....	35
6. 3. 2	Vstupní data	35
6. 3. 3	Materiálová data	35
6. 3. 4	Postup řešení	36
7	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	37
7. 1	Poškozování ložiskových čepů v praxi.....	37
7. 2	Zředění svarového kovu	37
7. 3	Deskripce prací na rotorových ocelích.....	38
8	NUMERICKÉ SIMULACE	43
8. 1	Postup při tvorbě modelu.....	43
8. 2	Tepelné zdroje a jejich optimalizace	45
8. 2. 1	Tepelné zdroje	45
8. 3	Výsledky teplotních analýz	48
8. 4	Vliv tepelného zdroje a okrajových podmínek na deformace	53
8. 5	Teplotní, mechanická a strukturní analýza u jedné housenky	56
8. 6	Teplotní, mechanická a strukturní analýza u tří housenek.....	63
8. 7	ARA diagramy	71
8. 8	Teplotně metalurgická analýza.....	75
9	INTERPRETACE VÝSLEDKŮ MECHANICKÉ ANALÝZY	78
9. 1.	Vliv tepelného zdroje na deformace.....	78
9. 2	Vliv okrajových podmínek na deformace – nejméně protavený model	81
9. 3	Vliv okrajových podmínek na deformace – nejvíce protavený model	84
9. 4	Vliv tepelného zdroje a okrajových podmínek na deformace tří návarů	87
10	ZÁVĚR.....	89
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	92
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	95
	SEZNAM PŘÍLOH	98

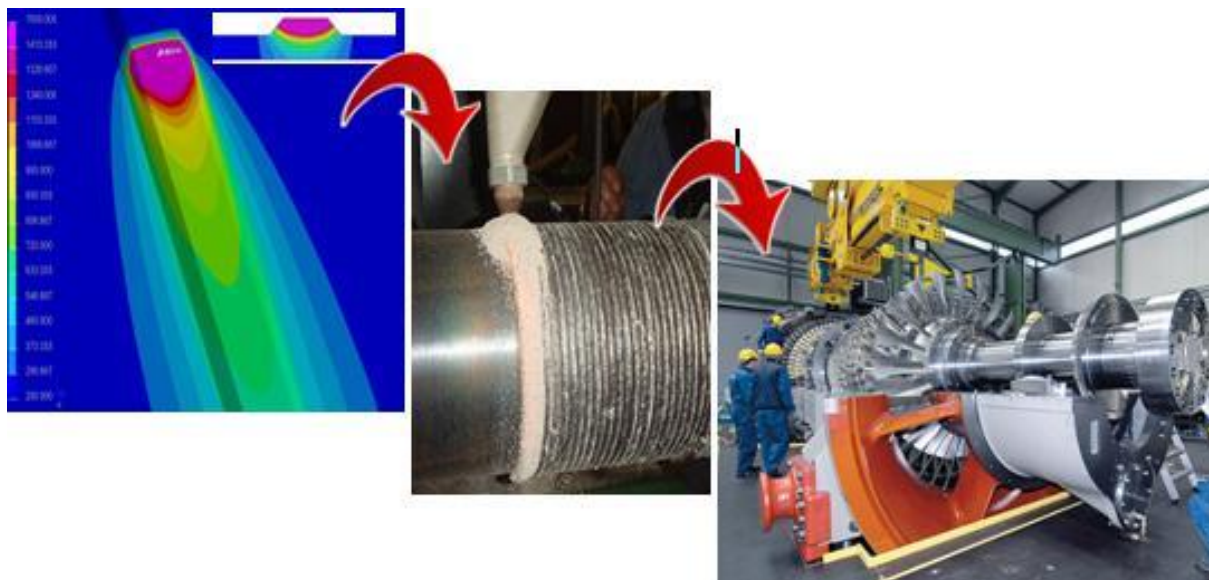
1 ÚVOD [15], [20], [21]

Numerické analýzy jsou typickým produktem věku počítačů. Jsou současným trendem v navrhování a dimenzování konstrukcí, a proto nemohou chybět ani v oblasti svařování. Jsou totiž výrazně levnější než skutečné testy. Díky nim jsme schopni v krátké době nabídnout více možností řešení daného problému, virtuálně otestovat a vybrat tu technologii, která bude nejlépe vyhovovat danému konstrukčnímu dílci. Tím omezíme náklady na výrobu reálných experimentálních kusů.

Diplomová práce se zabývá navařováním metodou automat pod tavidlem. Ta patří mezi nejproduktivnější a nejjakostnější metody navařování kovů vůbec. Proto našla uplatnění ve všech nejvýznamnějších odvětvích průmyslové výroby a to i v oblasti energetiky, ve které se projevují velmi vysoké nároky na kvalitu provedených svarů. Nejprísnější požadavky jsou kladeny na komponenty elektráren. Mimo jiné na turbíny. Jednou z velmi namáhaných částí turbín jsou právě ložiska rotoru, kterých se tento projekt týká.

Možnosti a rozsah řešení zadaného tématu diplomové práce je do jisté míry omezeno. Z toho důvodu se autor ve studii nezabývá přímo navařováním rotorových čepů turbíny, ale úsilí se soustřeďuje na přípravné práce pro navařování na zkušebních vzorcích.

Předkládaná práce byla zadána podnikem Siemens Industrial Turbomachinery spol. s r. o. se sídlem v bývalém areálu První brněnské strojírny v Brně. Numerické simulace proběhly v systému SYSWELD a Visual - WELD, ve spolupráci s firmou MECAS ESI spol. s r. o. Ta zastupuje francouzskou společnost ESI Group na poli numerického modelování v zemích Střední a Východní Evropy.



Obr. 1 Sled úkonů při realizaci navařovaných rotorových čepů [20], [21]

2 MATERIÁL [1], [6], [7], [9], [13], [14], [15], [22], [25], [26]

Materiály (základní materiál, přídatný materiál a tavidlo) byly zvoleny firmou Siemens Industrial Turbomachinery spol. s r. o. Materiál zkušebních desek i materiál čepů turbínových rotorů je vyroben z oceli X22CrMoV 12-1.

2.1 Základní materiál [13], [22], [25]

Tento materiál je nerezová vysocелеgovaná žáruvzdorná ocel určená pro použití do 580 °C. Chemické složení oceli X22CrMoV 12-1 je uvedeno v tabulce 2. 1.

Chemickým složením odpovídá materiál českému ekvivalentu oceli 17 134 dle ČSN 41 7134. Značka X22CrMoV 12-1 je dle evropské normy EN 10269-99 pro číslo materiálu 1. 4923.

Historie této oceli sahá do roku 1950, kdy byla vyvinuta pro komponenty elektrárenského průmyslu. Využití našla díky svým dobrým vlastnostem. Především odolnosti proti creepu, způsobené obsahem molybdenu, který svými velkými rozměry atomů zhoršuje pohyb dislokací. Dále komplexní účinky obsahu chromu, ve spojení s Mo a V, a výsledné martenzitické struktury, stabilizované vyloučenými karbidy $M_{23}C_6$. [13] V průběhu několika desetiletí byla a je ocel úspěšně používána v elektrárnách.¹

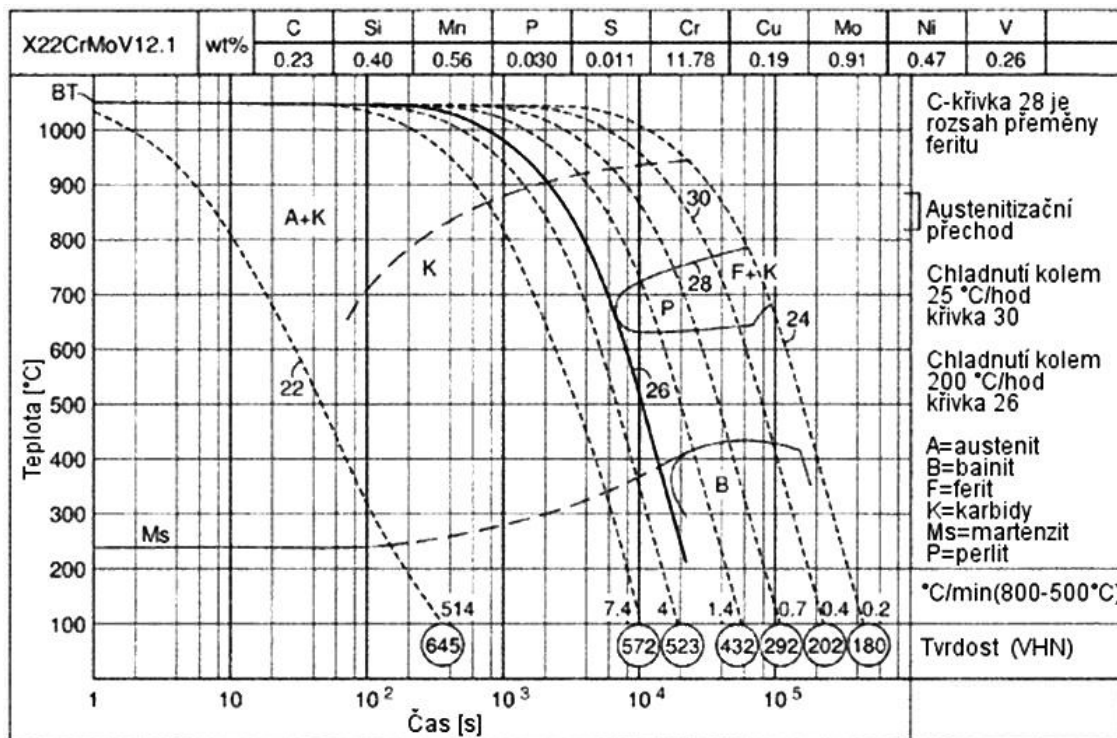
Tab. 2. 1 Chemické složení oceli X22CrMoV 12-1 dle TÜV [22]

Prvky v hm. %	C	Mo	Cr	Ni	V
Stanovený rozsah	0,18–0,24	0,80–1,20	11,0–12,5	0,30–0,80	max. 0,30
Skutečnost v ZM	0,22	0,85	11,5	0,65	0,30
Ostatní prvky v ZM	Mn	Si	P	S	Nb
	0,65	0,22	0,02	0,003	0,47

Při seznamování s materiálem je značně důležitý ARA diagram. Jde o kinetický diagram (vzniklý z kinetických křivek) s osami teplota a čas. Anizotermický rozpad austenitu je pochod, probíhající v důsledku plynulého poklesu teploty, který ukazuje počátek a konec tvorby fází z ropadajícího se austenitu. Na základě křivky rychlosti ochlazování, lze z diagramu ARA zjistit přibližné složení strukturní směsi po ochlazení, a tedy také odhadnout tvrdost materiálu. Křivka 26 v obrázku 2. 1. 1 značí kritickou rychlost ochlazování, což je nejpomalejší rychlost ochlazování, kdy výsledná struktura je jen martenzitická. Před touto křivkou v levo austenit transformuje pouze

¹ Vývoj 9-12 % chromových ocelí údajně vznikl v roce 1912 s výrobou 12% Cr a 2–5% Mo oceli pro lopatky parních turbín Krupp Mannesmann v Německu. Nicméně, v letech 1912-1913 se pan Brearley ve Velké Británii, pokouší vyvíjet oceli pro hlavně pušek. Náhodně zjistil, že na martenzitické oceli s obsahem 13% Cr a 0,2% C nebyla rez. [13]

na martenzit, popřípadě se zachová stopové množství zbytkového austenitu. Na tvar a umístění křivek struktur má velký vliv uhlík. Legující prvky s výjimkou Al a Co posouvají křivky struktur v diagramu doprava, do oblasti delších časů. Nikl je austenitotvorný prvek, který křivky struktur neposouvá.



Obr. 2. 1 Kontinuální ARA diagram oceli X22CrMoV 12-1

2. 1. 1 Vlastnosti základního materiálu [22], [25]

Mezi obecné vlastnosti stanovené ocele patří průměrná korozní odolnost a obrobitelnost a dobré mechanické vlastnosti za tepla – žáruvzdornost, žárupevnost a vysoké hodnoty meze kluzu za vyšších teplot (viz tabulka 2. 4), dále svařitelnost a kovatelnost. Do takzvaných speciálních vlastností lze zařadit maximální tvrdost přibližně kolem 645 HV, viz obr. 2. 1 výše. Termo-fyzikální vlastnosti jsou uvedené v tabulce 2. 2. Mechanické vlastnosti materiálu jsou velmi závislé na jeho tepelném zpracování. Doporučené teploty pro žhání na měkko, kalení a popouštění jsou uvedeny v tabulce 2. 3.

Tab. 2. 2 Vybrané termo-fyzikální vlastnosti [22]

Hustota [kg·dm ⁻³]	El. odpor 20 °C [Ω·mm ² ·m ⁻¹]	Tep. vodivost [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	Specifická tep. kapacita [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	Tep. roztažnost [μm·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
7,7	0,6	při 20 °C= 24	při 20 °C= 460	20 - 100 °C= 10,5
		při 650 °C= 29	při 800 °C= 540	20 - 600 °C= 12,5

Tab. 2. 3 Doporučené tepelné zpracování [25]

Tepelné zpracování	Teplota [°C]	Poznámka
žíhání na měkko	750 – 780	ochlazovat v peci
kalení	1020 – 1070	ochlazovat na vzduchu, v oleji, ve vodě
popouštění	680 – 740	min 2 h – QT1 ($R_m=800 - 950$ MPa)
popouštění	660 - 720	min 2 h – QT2 ($R_m=900 - 1050$ MPa)

Mechanické vlastnosti odvislé od pracovní teploty jsou uvedené v tabulce 2. 4. níže. Tabulka 2. 5 ukazuje mechanické vlastnosti po zušlechťení na QT1 a QT2 při pokojové teplotě.

Tab. 2. 4 Předpokládané mechanické vlastnosti za různých pracovních teplot [25]

Teplota [°C]	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550
$R_{p0,2}$ [MPa] QT1	560	545	530	505	480	450	420	380	335	280
$R_{p0,2}$ [MPa] QT2	650	625	600	575	550	518	485	440	390	330
Modul E [GPa]	209	-	200	-	190	-	179	-	167	-

Tab. 2. 5 Mechanické vlastnosti po zušlechťení [25]

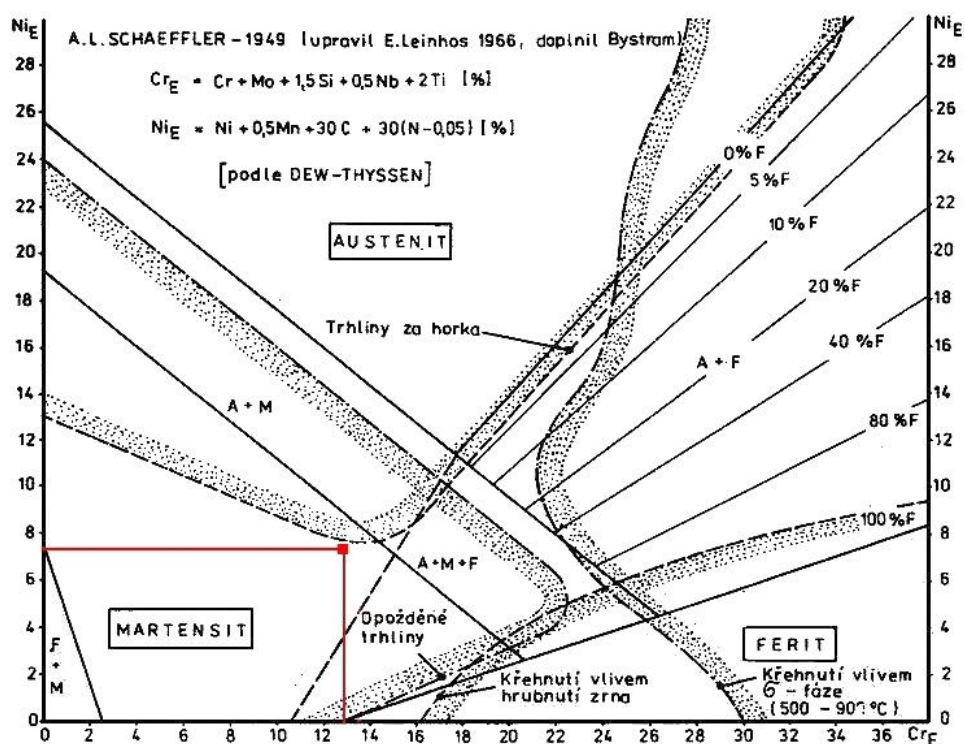
Stav	zušlechťeno na QT1	zušlechťeno na QT2
$R_{p0,2}$ [MPa] min	600	700
R_m [MPa]	800 - 950	900 – 1050
Tažnost A_5 [%] min	14	11
Kontrakce Z [%] min	40	35
Nárazová práce KV [J] min	27	20

2. 1. 2 Struktura základního materiálu [14]

Na základě obsažených legujících prvků, můžeme určit strukturu oceli

X22CrMoV 12-1. Struktura dává informace o vlastnostech materiálu. Mezi nejdůležitější patří korozivzdornost, pevnost a změny způsobené vneseným teplem.

V roce 1949 A. L. Schaeffler sestavil diagram ve kterém výsledná struktura je závislá na vzájemném poměru a množství jednotlivých prvků. Některé prvky jsou feritotvorné (Cr, Si, Mo, V, Ti) a některé austenitotvorné (Ni, Mn, Co, C, N). Z těchto prvků mají největší účinek chrom s niklem. Ostatní prvky jsou vyjádřeny jako násobek Cr a Ni. Chromový Cr_E a niklový Ni_E ekvivalent poté určí strukturu oceli, zda bude martenzitická, feritická nebo austenitická, jak je vidět na obrázku 2. 2.



Obr. 2. 2 Schaefflerův diagram s umístěním oceli X22CrMoV 12-1. [14]

Dle vzorců 2. 1 a 2. 2 vypočteme chromový ekvivalent Cr_E a niklový ekvivalent Ni_E .

$$Cr_E = Cr + Mo + 1,5 \cdot Si + 0,5 \cdot Nb + 2 \cdot Ti \quad (2. 1)$$

$$Cr_E = 11,5 + 0,85 + 1,5 \cdot 0,22 + 0,50,47 + 2 \cdot 0 = 12,92 \text{ %}$$

$$Ni_E = Ni + 0,5 \cdot Mn + 30 \cdot C + 30 \cdot (N - 0,05) \quad (2. 2)$$

$$Ni_E = 0,65 + 0,5 \cdot 0,65 + 30 \cdot 0,22 + 30 \cdot (0 - 0,05) = 7,53 \text{ %}$$

Po zanesení výsledků do Schaefflerova diagramu vyšlo najevo, že se jedná se o martenzitickou chromovou ocel. Dle pozice průsečíku vynesných ekvivalentů, je tato ocel náchylná k trhlinám za studena.

2.1.3 Martenzitické chromové oceli [15], [22]

Dominantním prvkem v těchto ocelích je chrom. Jeho obsah je v rozmezí 10 až 18 hm. % a obsah uhlíku se pohybuje v rozmezí 0,1 až 0,55 hm. %. Mezi korozivzdornými ocelmi patří mezi ty, které mají nejvyšší obsah uhlíku.

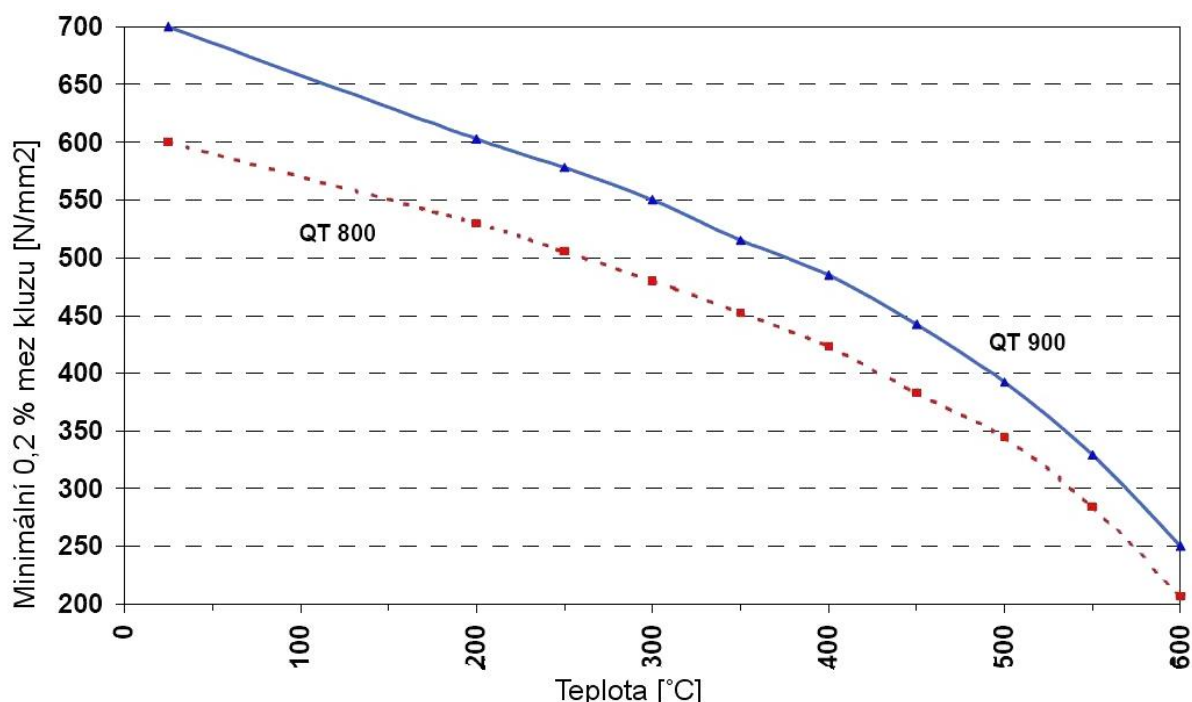
V souvislosti se svařováním daných ocelí se vyskytují problémy s náchylností na vznik trhlin za studena a jejich prokalitelnost na vzduchu. To jsou důvody, proč se vždy zařazuje při jejich svařování předehřev, viz výpočet níže. Musí se dodržet teplota interpass a po svaření se aplikuje dohřev součástí. „Pro klasické 12 až 13 hm. % Cr martenzitické oceli se dříve doporučovala teplota předehřevu nad teplotou M_s tj. cca 400 °C.“ [15] Tento typ svařování známe jako austenitické svařování. „V novějších pracích se při nižších obsazích uhlíku doporučuje teplota předehřevu cca 250 °C, tedy mezi M_f (cca 100 až 150 °C) a M_s .“ [15] Toto svařování je známé jako tzv. martenzitické svařování.

U martenzitického svařování je teplota předehřevu dána schopností austenitu rozpouštět difúzní vodík. To je dáno dočasnými možnostmi austenitu, který se nachází stále v plastickém stavu.

„V pásmu přehřátí TOO a ve svarovém kovu je limitující hodnota požadovaných mechanických vlastností obvykle hodnota vrubové houževnatosti. Proto je nutné svarové spoje martenzitických chromových ocelí tepelně zpracovat. Po svaření obvykle následuje ochlazení na teplotu kolem 80 - 120 °C s následným TZ, žíháním na snížení vnitřního pnutí, při 730 - 780 °C (pod A_{c1}). Následuje pomalé ochlazení na teplotu 400 °C a poté zchlazení na vzduchu. Neměli bychom překročit teplotu A_{c1} , aby nám nevznikl austenit a po vyžhání nevznikl nepopuštěný martenzit. Účelem je popustit martenzit, tj. snížit jeho tvrdost a pevnost a zvýšit jeho tažnost a houževnatost.“ [15] V malé míře může být houževnatost těchto svarů ovlivněna volbou parametrů svařování.

Naopak zvýšení tvrdosti lze dosáhnout kalením, avšak výsledná struktura je křehká. Velmi mírné ochlazování z austenitizační teploty, vede k dosažení feritické struktury s vyloučenými karbidy chromu, čímž se potlačí vznik martenzitu. Tento proces vyžhání martenzitických ocelí vede k výsledné tvrdosti materiálu, který lze posléze obrábět. Po tepelném zpracování oceli X22CrMoV 12-1, lze očekávat mechanické hodnoty, které jsou uvedeny v tabulce 2. 5.

V zájmu snížení možnosti vzniku trhlin, musí být součásti temperované co nejdříve po kalení. Chování materiálu při zvýšených teplotách je viditelné na obrázku 2. 3.



Obr. 2. 3 Chování oceli při zvýšených teplotách [22]

„I u svarových spojů martenzitických chromových ocelí mohou vznikat problémy spojené se zkřehnutím 475 precipitací σ fáze a mezikrystalické koroze (MKK).“ [15] MKK souvisí se snížením obsahu chromu pod teoretickou hranici 12 hm. % v okolí vylučujících se karbidů a nitridů Cr. Difúze uhlíku k hranicím zrn probíhá mnohem rychleji než difúze chromu. Proto když se mají tvořit karbidy $(\text{Cr}, \text{Fe})_{23}\text{C}_6$ a $(\text{Cr}, \text{Fe})_7\text{C}_3$ na rozhraní zrn, difunduje rychlejší uhlík i z vnitřku zrn, kdežto nezbytný chrom přichází jen z okrajů zrn austenitu. Vyloučené karbidy ochudily povrchovou vrstvu o tolik chromu, že tyto okraje zrn přestávají být schopny pasivovat a podléhají rychleji korozi.

Zkřehnutí 475 je zapříčiněno precipitačními procesy, při kterých může dojít v TOO ke zhrubnutí zrna. K tomuto jevu nedochází u svařování malých tloušťek. Stejně tak jako u σ fáze se u zkřehnutí 475 nedoporučuje svařování velmi velkých tloušťek z důvodu vzniku křehkých intermetalických sloučenin.

U uvedených typů ocelí se musí vždy počítat s předeheřevem. Ten je ovlivněn tloušťkou svařovaného materiálu a množstvím legujících prvků. Čím více legujících prvků materiál obsahuje, tím se zvyšuje teplota předeheřevu.

Výpočet teploty předeheřevu dle tzv. Seferianova vzorce:

$$C_C = \frac{360 \cdot C + 40 \cdot (\text{Mn} + \text{Cr}) + 20 \cdot \text{Ni} + 28 \cdot \text{Mo}}{350} \quad (2. 3)$$

$$C_C = \frac{360 \cdot 0,23 + 40 \cdot (0,56 + 11,78) + 20 \cdot 0,47 + 28 \cdot 0,91}{350}$$

$$C_C = 1,74 \%$$

$$C_S = 0,005 \cdot C_C \cdot s \quad (2.4)$$

$$C_S = 0,005 \cdot 1,74 \cdot 6$$

$$C_S = 0,05 \%$$

$$C_P = C_C + C_S \quad (2.5)$$

$$C_P = 1,74 + 0,05$$

$$C_P = 1,79$$

$$T_P = 350 \cdot \sqrt{C_P - 0,25} = 434 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (2.6)$$

$$T_P = 350 \cdot \sqrt{1,79 - 0,25}$$

$$T_P = 434,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Vypočítané temperování materiálu je na tloušťku zkušební desky 6 mm příliš vysoké. Z důvodů energetické náročnosti předehřevu je tato teplota značně nákladná a z technologické stránky obtížně dosažitelná.

Teplota předehřevu bude 200 °C – 250 °C. U materiálů s velkou tloušťkou stěny se doporučuje předehřev mezi 400 °C a 500 °C.

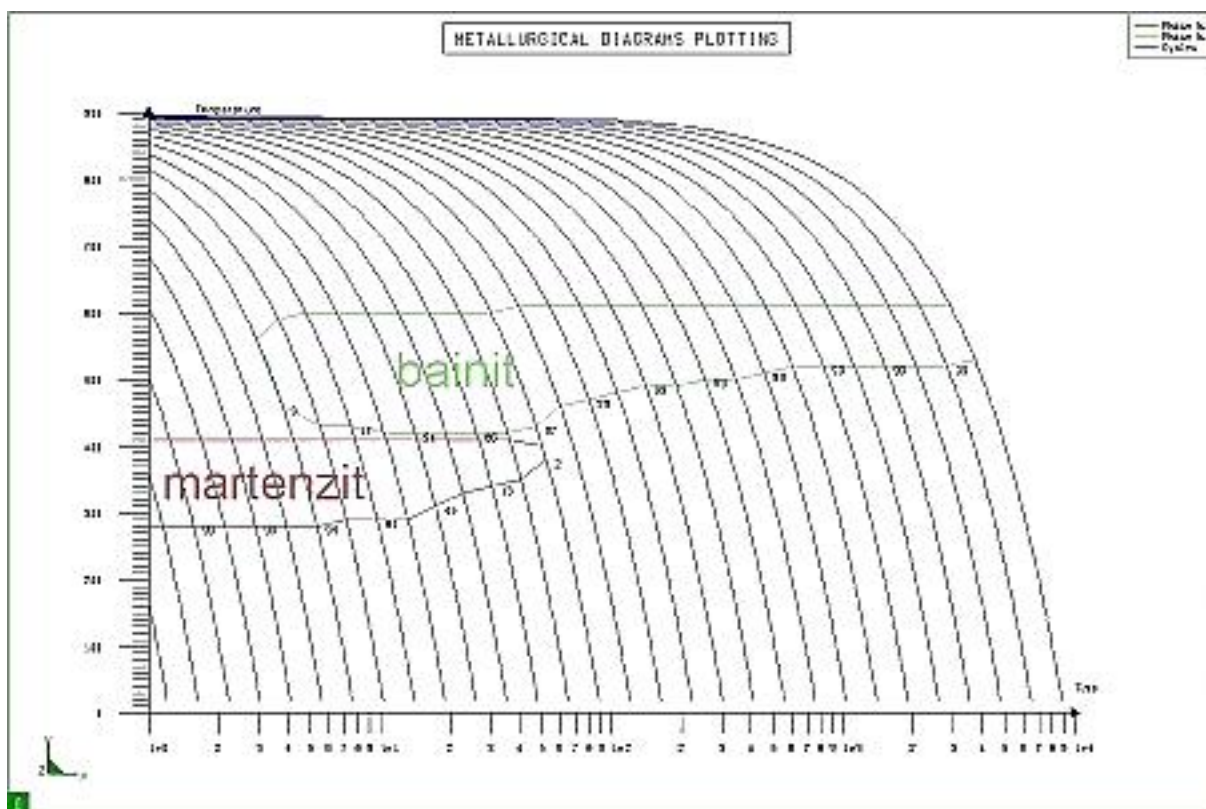
2.2 Přídavný materiál [6], [7], [9], [26],

Dráty volíme tak, aby se jejich výsledné chemické složení a mechanické vlastnosti co nejvíce podobaly základnímu materiálu. Nesmíme zapomenout, že na výsledné chemické složení má vliv i zvolené tavidlo. Pro zadaný základní materiál však nelze vybrat takový přídavný materiál, který by mu odpovídal obsahem prvků. Na první pohled do tabulky 2. 6 je zřejmé, že je velmi rozdílný obsah uhlíku a chromu. Z praxe je známo, že přídavné materiály z pravidla nemívají více jak 0,1 % uhlíku. Argument pro to je takový, že požadujeme bainitickou strukturu svarového kovu. Kdyby vznikl martenzit, je velká pravděpodobnost vzniku vad.

Zadaný přídavný materiál je bezešvý poměděný drát, naplněný práškem. Jeho výrobcem je švýcarský Oerlikon. Chemické složení je uvedeno v tabulce 2. 6. Často se používá na svařování vysokopevnostních ocelí.

Tab. 2. 6 Standardní chemické složení přídavného materiálu Fluxocord 42 použitého u navařování přípravných desek [26]

Prvek	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo
Hm. %	0,05	1,40	0,20	0,6	2,50	0,40



Obr. 2. 4 ARA diagram přídavného materiálu Fluxocord 42 vytvořený v software SYSWELD

U použitého přídavného materiálu se jedná o plněný bazický drát o průměru 3,2 mm. Je vhodný pro svařování jemnozrnných ocelí s kombinací tavidla Oerlikon OP 121TT W.

Svařovací dráty a pásy jsou dodávány v různých velikostech. Tomu musí odpovídat použitý svařovací proud, viz tabulka 2. 7.

Tab. 2. 7 Doporučené hodnoty proudu pro různé průměry svařovacích drátů [6]

Průměr drátu [mm]	2,3	3,2	4,0	4,8	6,4
Svařovací proud [A]	200-500	300-800	400-900	500-1200	600-1600

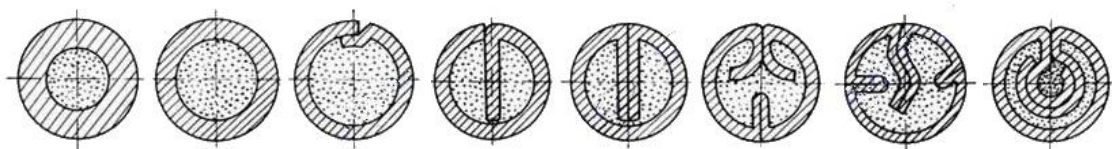
Tab. 2. 8 Mechanické vlastnosti přídavného materiálu Fluxocord 42 [26]

Použité tavidlo	Tepelné zpracování	Mez kluzu [N·mm ⁻²]	Mez pevnosti [N·mm ⁻²]	Tažnost A ₅ [%]
OP 121TT W	TZPS 580 °C x 2h	≥660	740 - 820	≥16
OP 121TT W	po svaření	≥680	750 - 830	≥16

Tab. 2. 9 Zkouška vrubové houževnatosti, V-vrub dle Charpyho [26]

Použité tavidlo	Tepelné zpracování	Vrubová houževnatost KCV [$\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$]	
		- 20 °C	- 40 °C
OP 121TT W	po svaření	80	50
OP 121TT W	TZPS	100	50

Pomocí náplně elektrody můžeme ovlivnit chemické složení a mechanické vlastnosti svarového kovu, což není možné s plným drátem. Mechanické vlastnosti přídatného materiálu jsou v tabulkách 2. 7 a 2. 8. Bazické plněné elektrody při použití s tavenými tavidly umožňují dosáhnout vynikající hodnoty vrubové houževnatosti svarového kovu, které je možno v této kombinaci s plnými dráty jen těžko získat.



Obr. 2. 5 Modifikace konstrukcí trubičkových elektrod [7]

2. 3 Tavidlo [1], [9], [26]

Tavidla jsou prášky anorganického původu. Část těchto prášků se vlivem tepla z el. oblouku nataví a tvoří strusku. Výběr vhodného tavidla má velký vliv na technologické vlastnosti a spolu s výběrem svařovacího drátu i na vlastnosti svarového kovu. Kompozice obsažené v tavidle jsou uvedeny v tabulce 2. 10.

Tab. 2. 10 Chemické složení tavidla OP 121TT W použitého u navařování přípravných desek [26]

Kompozice	$\text{SiO}_2+\text{TiO}_2$	$\text{CaO}+\text{MgO}$	$\text{Al}_2\text{O}_3+\text{MnO}$	CaF
Hm. %	15	35	20	30

Tavidlo OP 121TT W je aglomerizované a bazicitou 3,1 dle Boniszewského spadá mezi vysokobazická tavidla. Bazicita byla určena ze vzorce 2. 7. Toto tavidlo tvoří krátkou strusku, čímž odpadá nebezpečí odpadávání strusky na malých průměrech navařovaných součástí. Lze použít DC proud (+ pól) i AC proud (- pól) do 1000 A.

Úloha tavidel: [1]

elektrická

- zlepšuje zapalování elektrického oblouku
- zvyšuje stabilitu hoření oblouku

technologická

- utváří (formuje) svarovou lázeň
- chrání svarovou lázeň před přístupem vzduchu
- zabraňuje rychlému ochlazování svarového kovu

metalurgická

- dezoxiduje svarový kov
- rafinuje (čistí) svarový kov
- dolegovává svarový kov

Rozdělení tavidel: [1]

podle výroby

- tavená (tavením suché směsi v peci)
- keramická (spojením práškové směsi pomocí pojiv. Použití na legované materiály, mají zhoršené formovací vlastnosti. Nepoužívají se na spojovací svary, ale především pro návary)
- sintrovaná (spojením práškové směsi žíháním za působení tlaku)
- aglomerovaná (stejně jak sintrovaná bez působení tlaku)

Výpočet metalurgického působení podle Borniszewského:

$$B_B = \frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \text{BaO} + \text{CaF}_2 + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + 0,5 \cdot (\text{FeO} + \text{MnO})}{\text{SiO}_2 + 0,5 \cdot (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 + \text{ZrO}_2)} \quad (2. 7)$$

Dle vztahu 2. 4 se tavidla dělí: [9]

podle stupně bazicity

- $B < 0,9$ tavidlo s nízkou bazicitou (kyselé)
- $B \sim 0,9-1,2$ neutrální tavidlo z hlediska bazicity
- $B > 1,2-2,0$ bazické tavidlo
- $B > 2$ vysokobazické tavidlo

Zařazení některých oxidů dle zásaditosti:

SiO_2 , P_2O_5 , TiO_2

kyselé oxidy CaO ,

MgO , FeO , MnO , CrO , NiO , Na_2O , K_2O

bazické oxidy

Al_2O_3 , B_2O_3 , Cr_2O_3

amfoterní oxidy

3 TECHNOLOGIE NAVAŘOVÁNÍ [2], [3], [4], [5], [8], [9], [10], [11], [12], [20]

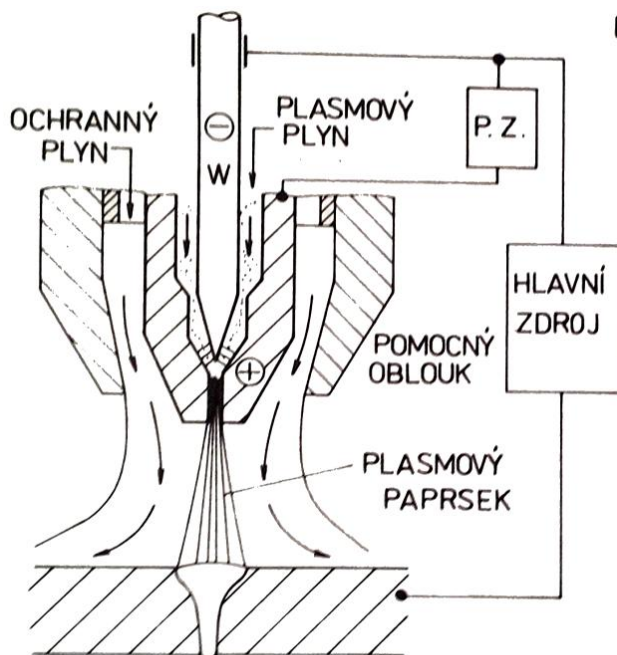
Pro řešení této studie bylo na výběr ze dvou metod. První byla technika navařování plazmou a druhá navařování pod tavidlem. Zvolena byla technologie navařování pod tavidlem a to kvůli velmi stabilnímu procesu navařování přidávaného kovu. Metoda bývá využívána často při navařování antikorozních návarů. Číselné značení metody je 12X. Konkrétně 121, svařování Automatem pod tavidlem jednou drátovou elektrodou.

3.1 Navařování plazmou [8]

Využití technologie navařování plazmou se zavrhl pro řešení zadaného tématu, z důvodů spolehlivosti konkrétní navařovací jednotky a ekonomice navařování. Práškový přídavný materiál je ve srovnání s drátovou elektrodou výrazně dražší. Časté poruchy svařovacího zařízení, na kterém se měly provádět zkušební návary ve firmě Siemens Industrial Turbomachinery spol. s r. o., zapříčinily zamítnutí této metody pro navařování vzorků.

Další faktor, který obecně hraje svou roli, je zdravotní riziko spojené s vyzařováním ultrafialového záření. Nejzávažnější zdravotní dopad účinku UV záření na kůži reprezentují zhoubné nádory.

Pro navařování plazmou se používá přenesený plazmový oblouk, který je využívám především u mikroplazmového navařování. Zvýšením výkonu svařovacího zdroje a konstrukčními úpravami hořáku vznikne zařízení vhodné pro navařování.



Obr. 3. 1 Přenesený plazmový oblouk v ochranném plynu [8]

3. 2 Navařování pod tavidlem [2]

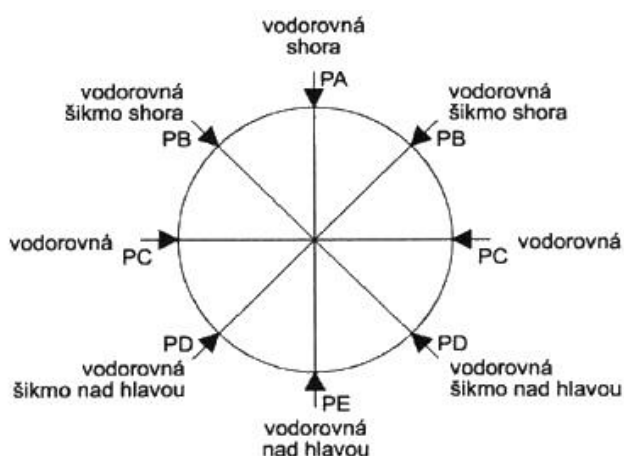
S metodou označovanou v zahraničí jako SAW (Submerged Arc Welding) se v běžných svařovnách často nepotkáme. Tento způsob navařování byl poprvé použit v USA již v roce 1935. Průmyslově využívaná technologie patří mezi nejjakostnější a nejproduktivnější metody vůbec. O tom také svědčí schopnost navařit až 2-100! kg svarového kovu za hodinu. Tento druh navařování se také vyznačuje malou produkcí emisních škodlivin a nebezpečného UV záření.

Klady metody:

- vysoká jakost a vysoká produktivita spojená s velkou odtavovací rychlostí
- malé tepelné ovlivnění základního materiálu a malé tepelné ztráty
- zřídka vady ve svarech (zápaly, trhliny, póry, zavaření strusky, apod.)
- opakovatelnost
- minimum škodlivých emisí
- velký průvar
- vysoký výkon navaření
- nedochází k rozstříku svarového kovu

Zápory metody:

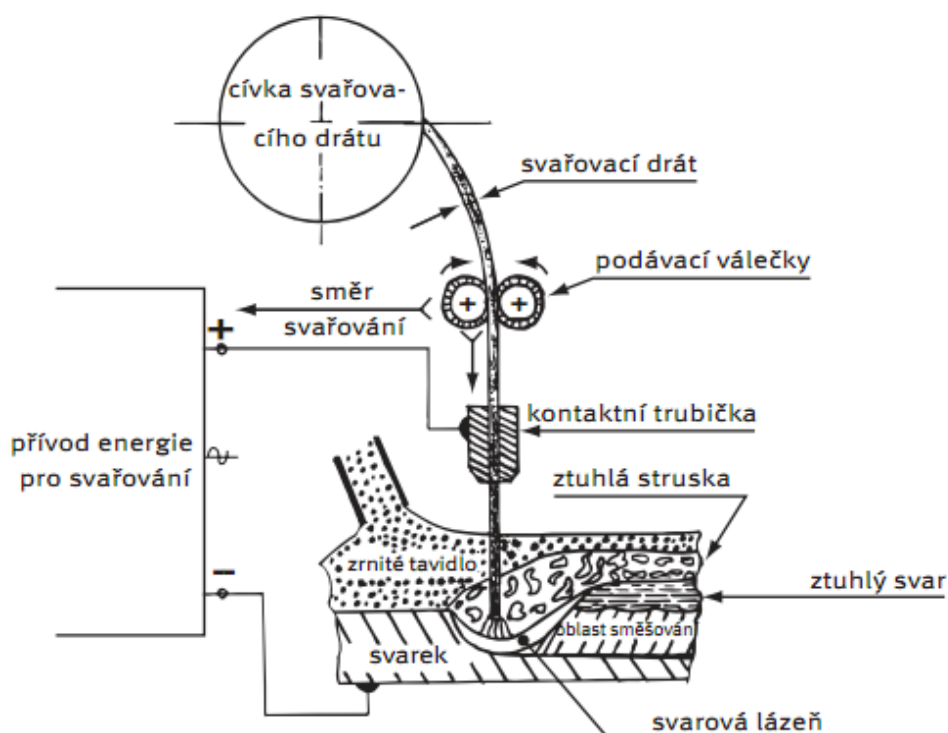
- obtížná kontrola při svařování (svar je zasypán tavidlem)
- vysoké požadavky na přípravu a čistotu svarových ploch
- svařování v polohách PA a PB (nutnost polohovat svařenec, viz obrázek 3. 2)
- možnost vytečení svarového kovu u velkorozměrných svarů
- vyšší pořizovací cena a vysoké nároky na příkon zdroje



Obr. 3. 2 Pracovní polohy při svařování dle ČSN EN ISO 6947 [2]

3. 2. 1 Princip navařování SAW [10]

V podstatě se jedná o svařování elektrickým obloukem tavící se elektrodou. Oblouk je zapalován mezi svařovaným materiálem a koncem svařovacího drátu či pásky navinuté na cívce. Elektroda je přiváděna do místa hoření podávacím zařízením. Až doposud se metoda nijak neliší od MIG/MAG svařování. Diference je v ochraně svarové lázně před přístupem vzduchu, viz obrázek 3. 3. Zde místo ochranných plynů používáme práškové tavidlo, pod kterým je oblouk neustále ukrytý. Oblouk však nehoří přímo v tavidle, ale v kapse tvořené plyny, které se uvolňují z roztaveného tavidla. Nad tavnou lázní se působením vysoké teploty natavila část práškového tavidla a po ztuhnutí vytváří nad tuhnoucím svarovým kovem strusku. Zbytek neroztaveného tavidla se chová jako tepelná izolace. Struskový kryt působí příznivě na formování svaru, odstraňování nežádoucích příměsí a nečistot - rafinuje svar, chrání jej před oxidací a eventuálně dolegovává.



Obr. 3. 3 Princip a schéma svařování elektrickým obloukem pod tavidlem [10]

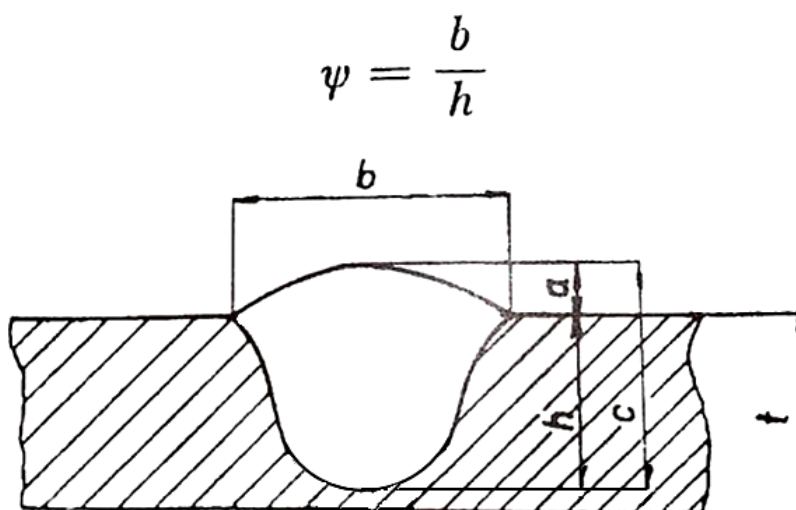
Zbylé, neroztavené tavidlo se odsává pro další použití. To musí projít kontrolou, zda splňuje požadované vlastnosti na čistotu a vlhkost. Struska by se měla po zchladnutí sama oddělit, aby nevznikly případné problémy se zavařením strusky dalšími návary. Teplota při samovolném odštěpení nesmí klesnout pod teplotu interpass.

3. 2. 2 Volba svařovacích parametrů [10]

V případě navařování ložiskových čepů rotoru turbíny, mají technologické parametry výrazný vliv na formování svarů, které vedle sebe a na sebe budou kladeny.

Charakteristické rozměry návaru na obr 3. 4: [10]

- hloubka průvaru do základního materiálu h
- převýšení a
- šířka návaru b
- součinitel formy svaru/návaru $\Psi=b/h$ (3. 1)



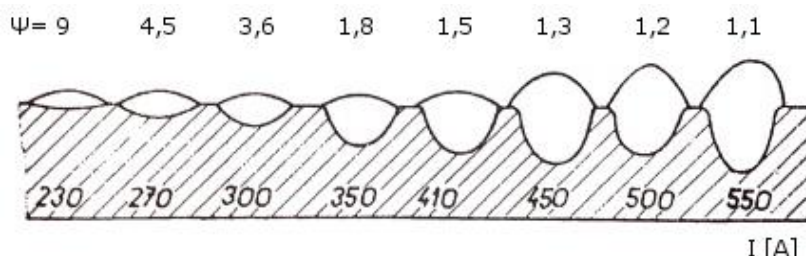
Obr. 3. 4 Charakteristické rozměry návaru [10]

Na rozměry svaru a jeho formování mají hlavní vliv svářecí napětí a proud, spolu s rychlostí svařování. Tím je dáno uvolněné teplo v elektrickém oblouku. Mezi vedlejší parametry se řadí průměr svařovacího drátu, sklon elektrody (první a poslední otáčka svaru na každém navařeném průměru by měly být koutové svary), vyložení svařovacího drátu a druh použitého tavidla a jeho zrnitost. Při svařování pod úhlem, směrem dopředu svářecím drátem, se snaží elektrický oblouk zaujmout stejný směr jako osa drátu. Oblouk hoří svojí velkou částí nad povrchem základního materiálu a tím se zlepšuje přehřev svarových ploch. Tekutý kov pod obloukem nabývá na objemu, čímž se brzdí intenzivní tavení základního materiálu. Důsledek tohoto jevu spočívá ve zmenšení hloubky průvaru a naopak zvětšení jeho šířky.

3. 2. 2. a Vliv svařovacího proudu [10]

Intenzita svařovacího proudu ovlivňuje přímo úměrně množství nataveného kovu. Vzniká hlubší průvar do základního materiálu a zmenšuje se součinitel formy svaru Ψ . Převýšení svarového kovu se zvyšuje. [10]

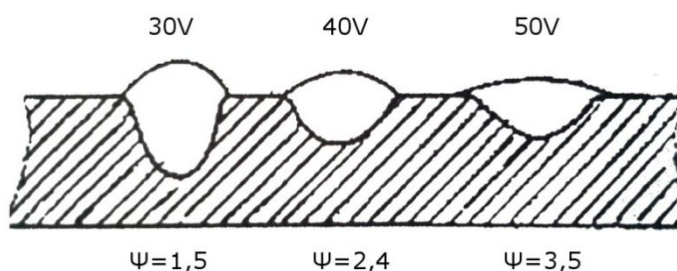
Obr. 3. 5 Vliv velikosti svařovacího proudu na změnu formy svaru Svařovací napětí



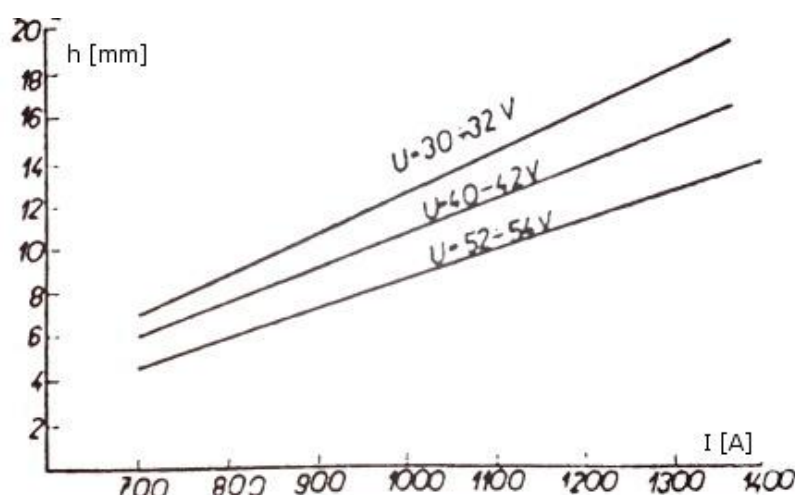
$U=30\text{ V}$, rychlost svařování $v_s=24\text{ m}\cdot\text{hod}^{-1}$ [10]

3. 2. 2. b Vliv napětí [10], [11]

Teplo vyvinuté v elektrickém oblouku působí na větší plochu základního materiálu a proto se hloubka protavení zmenšuje a šířka svarové housenky se zvětšuje. Napětí na oblouku se prakticky určuje od velikosti svařovacího proudu tak, aby bylo dosaženo vyhovujícího součinitele formy svaru Ψ . [10]



Obr. 3. 6 Formy svaru v závislosti na zvyšování proudu při různých napětích [11]

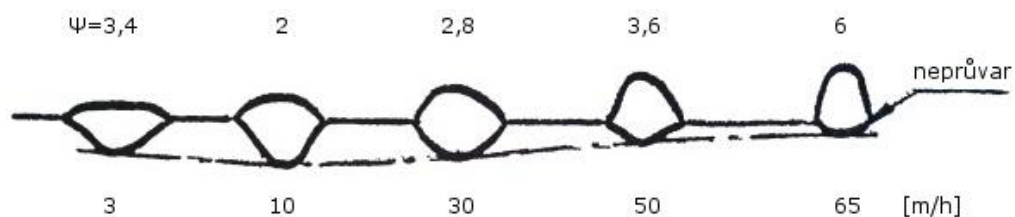


Obr. 3. 7 Vliv velikosti napětí na oblouku na hloubku provaření svarové housenky. [10]

Svařovací napětí se prakticky určuje v závislosti od velikosti svařovacího proudu, dle požadovaného součinitele formy svaru.

3. 2. 2. c Vliv rychlosti sváření [11]

Při konstantním svařovacím napětí a svařovacím proudu se se změnou rychlosti sváření mění i teplo, které je vyvinuto v elektrickém oblouku. Změna rychlosti svařování působí i na změnu směru elektrického oblouku, a následné rozložení dynamických sil v oblouku. Při velmi malých rychlostech (do $10 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$) hoří elektrický oblouk skoro kolmo a protavení základního materiálu není tak velké. Zvýšením rychlosti svařování se nakloní obloukový sloupec a složky dynamické síly začnou způsobovat to, že se zvýší protavení základního materiálu.

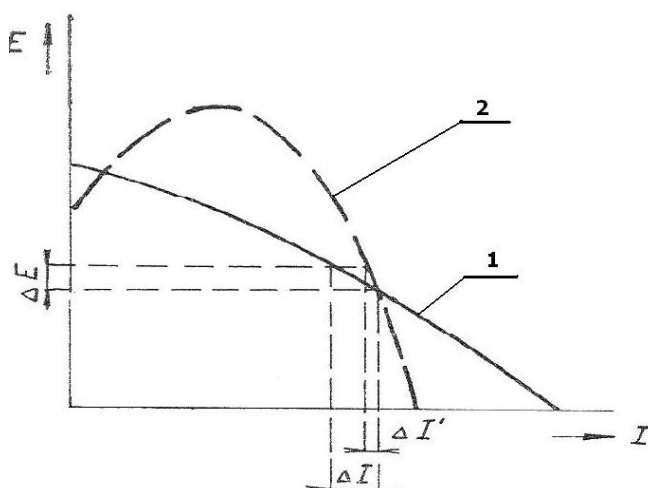


Obr. 3. 8 Vliv rychlosti sváření na tvar svaru [11]

3. 2. 3 Zdroje svařovacího proudu a stabilita oblouku [3], [4]

U svařování pod tavidlem je možné použít jak střídavý, tak stejnosměrný proud. Nicméně v současné době se používají výlučně stejnosměrné zdroje. Ty totiž umožňují efektivnější regulaci. U stejnosměrného proudu lze použít dvou polarit, normální (elektroda je záporná) nebo obrácené polarity (kladná elektroda). Pro svařování je vhodné použít zdroje s plochou charakteristikou (stejnosměrný zdroj s konstantním napětím).

Rozdíl od běžných metod svařování elektrickým obloukem, je v použití relativně vysokých svařovacích proudů. Většinou se začíná na 100 až 200 A, při použití na 3 mm tenký svařovaný plech. Obvyklé jsou spíše hodnoty okolo 1000 A. Ve výjimečných aplikacích vícedrátového svařování se využívají výkonné zdroje schopné dodat až 3600 A. To je důvod, proč se metoda nerozšířila do běžných dílen, kde je nejde zapojit do běžné zásuvky na 230 V/50 Hz.



Obr. 3.9 Volt-ampérová charakteristika svařovacího zdroje (statická) – plochá charakteristika, 2 – strmá charakteristika [3]

Stabilizace oblouku (zajištění jeho konstantní délky) může být zajištěna dvěma možnými způsoby.

„Prvním z nich je stabilizace pomocí ploché statické voltampérové (VA) charakteristiky zdroje svařovacího proudu. V tomto případě je drát do lázně podáván konstantní rychlostí. Funguje to stejně, jako u klasického MIG/MAG svařování. Dojde-li tedy (třeba vlivem nerovnosti svařovaného povrchu) ke zkrácení délky oblouku (snížení napětí), zdroj samovolně reaguje zvýšením proudu, drát tedy rychleji uhoří a oblouk se opět prodlouží. Naopak při nadměrném prodloužení oblouku (zvýšení napětí) se proud samovolně sníží, drát hoří pomaleji a oblouk se zkrátí. Této metody se ale používá jen při nižších svařovacích proudcích a s přídatnými dráty menších průměrů. Pro opravdu velké proudy, které se při APT běžně používají, už regulace plochou charakteristikou nedostačuje, protože je prostě pomalá. Zde přichází ke slovu druhá varianta regulace.“ [4]

„Druhou možností, jak stabilizovat oblouk, je použít zdroj se strmou statickou VA charakteristikou a zároveň aplikovat rychlou regulaci rychlosti podávání drátu v závislosti na měřeném napětí (délce oblouku). Tato metoda je technicky náročnější. Velikost proudu dodávaného svařovacím zdrojem je téměř konstantní a samotný zdroj tedy postrádá samoregulační schopnost. Vše proto závisí na precizní regulaci rychlosti podávání drátu v závislosti na okamžité naměřené hodnotě napětí na oblouku, které je přímo úměrné jeho délce. Klesá-li napětí, musí být drát podáván pomaleji a naopak. Pro stabilní hoření jsou důležité rychlé a precizní zásahy regulátoru.“ [4]

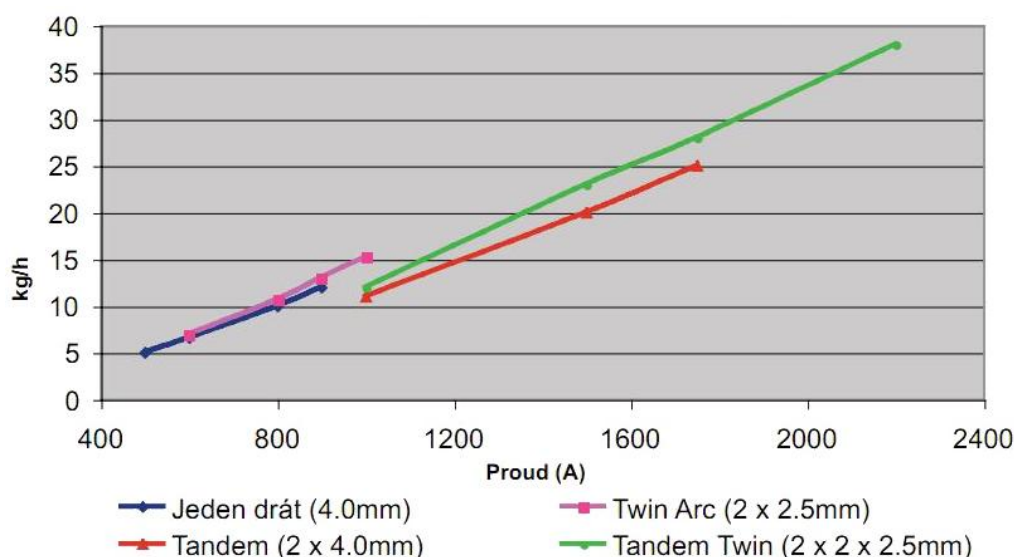
3.2.4 Varianty zvýšení efektivity [3], [5], [9]

„Vyšší produktivita svařování pod tavidlem je důsledkem možnosti použít daleko větší proudové zatížení svařovacího drátu, než je např. při svařování obalovanými elektrodami. Proud se přivádí blízko oblouku a svařovací drát má dostatečně velkou podávací rychlost, takže se drát málo ohřívá.“ [3] Vyšší schopnost odtavování souvisí také se zvýšením proudu přecházejícího přes zmenšenou plochu průřezu

trubičkového drátu. Proudová hustota totiž ovlivňuje rychlost odtavování drátu. Rozdíl mezi trubičkovým a plným drátem je výraznější, než u svařování v ochranné atmosféře plynu, díky vysokým úrovním proudu používaným pro SAW. Takto vzniklé svary mají výborné svarové vlastnosti.

Zvýšení produktivity svařování pod tavidlem lze dosáhnout použitím vícedrátových variant typu Tandem, Twin Arc, Tandem Twin, svařování s přidavkem kovového prášku, eventuálně svařování páskou. Na obrázku 3. 10 je viditelný rozdíl výkonu odtavování při různých typech SAW procesu.

Dále pro zvýšení výkonu lze použití trubičkových drátů se standardním tavidlem. Od drátů používaných při ochraně tavné lázně plynem se liší jen malými obměnami v chemickém složení. Bere se ohled na dolegování tavidlem. Ovšem trubičkové elektrody mají oproti konvenčním plným drátům s totožnými průměry o 20-30% vyšší schopnost odtavování za stejného svařovacího proudu. Proto můžeme zvýšit svařovací rychlost a zkrátit čas svařování a tím celkově snížit náklady na operaci.



Obr. 3. 10 Výkon odtavení při různých typech SAW procesu [9]

3.3 Navařování [12], [20]

Jedná se o proces, který využívá klasických svařovacích metod k vzniku povrchových vrstev s požadovanými vlastnostmi. Navařování realizované již při výrobě, je provádět jako prevence proti možnému poškození turbínových čepů. Těmto poruchám se dá do jisté míry zabránit konstrukčními úpravami nebo dokonalým mazáním. Ovšem ani na dobré mazání není naprosté spolehnutí. Proto se musí velmi dbát na volbu vhodných materiálů kluzných dvojic. Povrchy materiálů budou na styčných plochách v kontaktu i při značně vysokých provozních teplotách, v korozním prostředí, odolávající tření, otěru apod. „Vhodnost materiálu závisí především na druhu opotřebení, jemuž je daná součást vydána.“ [12] Možnosti, které

nám nabízí navařování povrchů čepů proti zadírání a opotřebení, jsou závislé na způsobu, jakým rotor turbíny bude namáhán.

„Navařování se zpravidla uplatňuje tam, kde pro obtížné pracovní podmínky součásti nemůžeme dosáhnout potřebné jakosti povrchu žádným z běžně používaných způsobů tepelného nebo tepelně chemického zpracování, jako je na př.: povrchové kalení, cementování, nitrocementování, nitridování nebo tvrdé chromování.“ [12]

Na vysoce namáhané součásti se navařují vrstvy kvalitnějšího materiálu, které vykazují obvykle větší odolnost, než má základní kov. Navařování nabývá významu u velkých součástí. Pokud jsou rotory turbín vyráběny z velkých kusů kvalitního, tím pádem drahého materiálu, jedná se o velmi finančně a časově nákladný proces. Pokud použijeme běžnější, ale plně dostačující základní materiál, s využitím potřebných vlastností návaru, konstrukce se zlevní. Nehledě na možné lepší statické nebo dynamické vlastnosti základního materiálu tělesa.

Pokud se jedná o navařování při renovaci, efektivita procesu se pohybuje do cca 70 % ceny nového dílu. Závisí to však na řadě faktorů, počínaje cenou, pracností výroby, rozsahu poškození, nutnosti dokončovacích operací konče cenou přídatných materiálů.



Obr. 3. 11 Navařování hřídelí metodou SAW [20]

4 VADY VE SVAROVÉM KOVU A TOO [6], [19]

„Odolnost svarů vůči praskavosti za horka a za studena je základní charakteristikou svařitelnosti materiálů. Svařitelnost kovových materiálů je nejvíce omezována sklonem k tvoření trhlin ve svarovém kovu a v bezprostřední blízkosti svaru.“[19]

„Existují dvě velké skupiny trhlin způsobené různými příčinami, které nemusejí být na sobě závislé:

trhliny ve svarovém kovu, které obvykle souvisí s jakostí přídavného kovu nebo elektrody, ale jsou rovněž závislé na podmínkách svařování, na vzniklých vadách, vměstcích, bublinách apod.

trhliny v základním materiálu, které vznikají v pásmu přeměny nebo závaru související se svařitelností základního materiálu a činiteli způsobující zkřehnutí (precipitace karbidů, sigma fáze, absorpcí vodíku apod.).“ [19]

Struktura návaru je bainitická, v promísené oblasti je bainiticko - martenzitická a v základním materiálu je martenzitická. Hodnota zbytkového napětí se drží pod mezí kluzu pro jeden návar, ale pro tři návary je už hodnota zbytkového napětí blízká mezi kluzu, což může v místě s lokálním koncentrátorem napětí způsobit trhlinu, obzvláště když je lokalizována v přehřáté oblasti nebo částečně natavené oblasti TOO, kde se nachází martenzitická struktura (což dle lokalizace vady na experiment takto je, viz obrázek 4. 1) .

4.1 Studené trhliny [6]

Protože se z Schaefflerova diagramu zjistilo, že ocel X22CrMoV12-1 je náchylná k praskavosti za studena, bude proveden další výpočet na náchylnost ke studeným trhlinám. To se posoudí dle parametru praskavosti P_w . Ten zahrnuje vliv chemického složení, difúzního vodíku a tuhosti svaru.

$$P_w = P_{CM} + \frac{H_{D(GL)}}{60} + \frac{K}{40 \cdot 10^4} \quad (4. 1.)$$

$$K = K_0 \cdot h \quad (4. 2)$$

P_{CM} - uhlíkový ekvivalent

K - intenzita tuhosti

K_0 - měrná tuhost (69 pro tupý spoj)

$H_{D(GL)}$ - obsah difúzního vodíku zjištěný glycerinovou zkouškou

h - tloušťka svařovaného materiálu v mm.[6]

$$P_{CM} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad (4. 3)$$

$$P_{CM} = 0,23 + \frac{0,4}{30} + \frac{0,56}{20} + \frac{0,19}{20} + \frac{11,78}{20} + \frac{0,47}{60} + \frac{0,91}{15} + \frac{0,26}{10} + 0$$

$$P_{CM} = 0,98$$

$$K = K_0 \cdot h$$

$$K = 69 \cdot 6$$

$$K = 414 [10\text{N/mm} \cdot \text{mm}]$$

$$P_W = P_{CM} + \frac{H}{60} + \frac{K}{40 \cdot 10^4}$$

$$P_W = 0,98 + \frac{5}{60} + \frac{414}{40 \cdot 10^4}$$

$$P_W = 1,06 > 0,3$$

Ocel X22CrMoV12-1 je náchylná k trhlinám za studena. Parametr praskavosti P_W je 3,5 krát vyšší než povoluje norma. Normovaný limit je 0,3, po jehož překročení je u materiálu sklon k trhlinám za studena.

Další možností, jak zjistit, odolnost materiálu ke studeným trhlinám, je použít zkoušky praskavosti. Např. zkouška TEKKE (Y-drážka) nebo Lehigh (U-drážka), Implant, CTS.

Opatření k zamezení vzniku studených trhlin [6]:

aplikovat dobře vysušené přídavné materiály

zamezit navlhnutí přídavného materiálu během skladování a manipulace

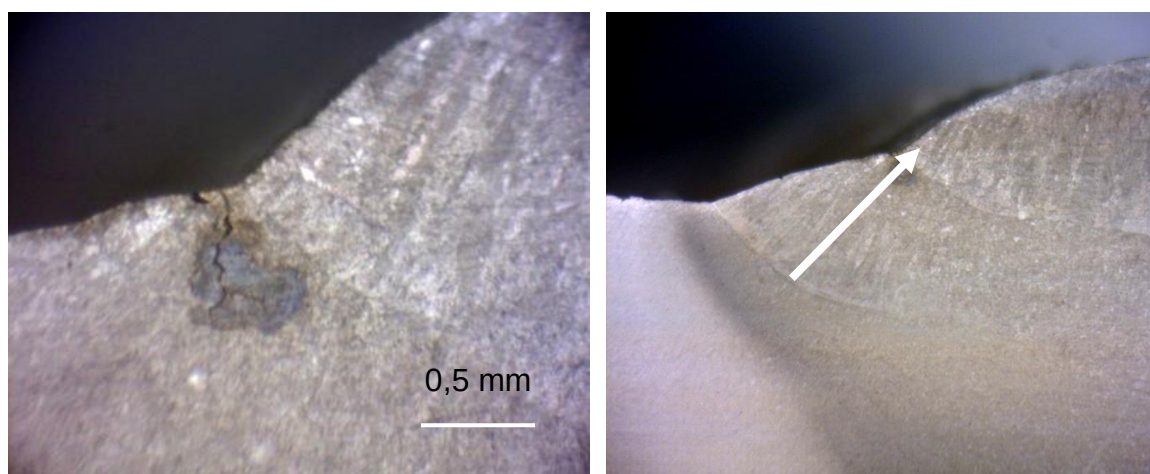
uplatnit předehřev a dohřev základního materiálu

využívat vyšší měrný příkon svařování

minimalizovat zbytková napětí po svařování použitím vhodné techniky svařování

vyvarovat se chybám ve svarech typu neprůvar, studený spoj, zápal, které jsou koncentrátoři napětí a iniciace trhlin v průběhu svařování výplňových vrstev

Již v průběhu navařování zkušebních desek se vyskytla studená trhlina, která je patrná z obrázku 4. 1. Jedná se o případ tří návarů na zkušební desce, kdy trhlina vznikla na rozhraní krycího návaru a první navařené housenky.



Obr. 4. 1 Studená trhlina na zkušební desce s třemi návary

Předpokládáme, že trhlina, která je na tomto místě, vznikla nevhodným kladením návarů. Návar a napojení housenek by mělo držet tvar velmi podobný numerickému

modelu, jako je na obrázku 8.24. Tak, jak jsou návary kladeny zde, vzniká v přechodu mezi housenkami, v přídavném materiálu, velmi vysoký lokální koncentrátor napětí. Ten může vykazovat až 2 x větší napětí než jak je ve skutečnosti. Ve skutečně kvalitním svaru by neměly koncentrátoři napětí co dělat.

5 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ [17]

„Mezi moderními metodami napěťově - deformační analýzy dnes jednoznačně dominuje metoda konečných prvků (dále jen MKP). V oblasti mechaniky těles MKP umožňuje řešit tyto základní typy úloh:

Napěťově deformační analýza při statickém, cyklickém i dynamickém zatěžování, včetně nejruznějších nelineárních úloh.

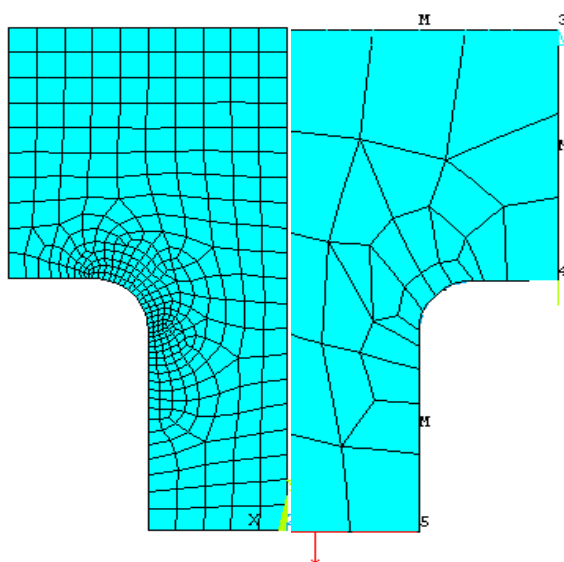
Vlastní i vynucené kmitání soustav s tlumením i bez tlumení

Kontaktní úloha pružnosti (rozložení stykového tlaku)

Problémy stability (ztráta tvarové stability konstrukcí)

Analýza stacionárního i nestacionárního vedení tepla a určení teplotní napjatosti (včetně zbytkové)“ [17]

Výpočty v praxi probíhají stylem, že za pomoci počítačového programu pro přípravu vstupních dat (preprocesingu) se vytvoří geometrický model tělesa, který se rozdělí na prvky konečných rozměrů. „Základním prvkem v rovině je čtyřúhelník, v prostoru pak šestistěn (anglicky brick = kostka, cihla), někdy je nutné použít zjednodušené tvary prvku (trojúhelník, čtyřstěn). Rohy těchto prvků, jsou uzlovými body, v nichž se určují neznámé hodnoty posuvů, strany (hrany) prvků vytvářejí síť, jejíž hustota je rozhodující pro přesnost výsledků. Kvadratické prvky mají kromě rohových uzlů ještě další uzly uprostřed stran (resp. hran), čímž dostáváme v rovině prvek osmi-uzlový a v prostoru prvek (brick) dvaceti-uzlový. Tyto prvky lépe vystihují lokální koncentraci napětí i při použití hrubé sítě (viz obrázek 5. 1).“ [17]



Obr. 5. 1 Jemná síť dává lepší výsledky než hrubá. Hrubé sítě mají chyby větší u použití lineárních prvků než u kvadratických prvků. [17]

Bodů, ve kterých určujeme posuvy, nemůže být v praxi samozřejmě nekonečně mnoho. Hustotu sítě těchto bodů volí výpočtář na základě své zkušenosti. V případě příliš husté sítě trvá řešení příliš dlouho, naopak příliš řídká síť může vést k podhodnocení napětí. Současné počítače řeší běžně v rozumných výpočtových časech úlohy o desítkách až statisících neznámých parametrů.

Všem prvkům je třeba zadat konstitutivní parametry materiálu (pro izotropní lineárně elastický materiál modul pružnosti a Poissonovo číslo²). Dále se definují okrajové podmínky (vazby, zatížení), které pro statickou úlohu musí zajistit jednoznačnou polohu tělesa v prostoru.

Následuje spuštění programu, který na základě vstupních hodnot sestaví a vyřeší soustavu rovnic s neznámými posuvy a z nich spočítá přetvoření a napětí. Bez zadání všech vstupních údajů nelze proces spustit, takže metodou konečných prvků není možné řešit nepřímé úlohy.

Poslední částí je postprocessing, neboli program pro zpracování výsledků. Umožňuje v nejrůznějších podobách znázornit rozložení kterýchkoli neznámých parametrů v tělese nebo zvolené podoblasti, stejně jako počítat redukovaná napětí nebo jiné hodnoty potřebné pro posuzování mezních stavů.

² Poissonovo číslo μ je poměr příčné a podélné deformace. Obvyklé hodnoty μ pro kovy je $0,25 \leq \mu \leq 0,35$. Oceli mají μ mezi $0,27 - 0,30$, nerezové oceli $0,30 - 0,31$ a například titan $0,34$.

6 NUMERICKÉ ANALÝZY [18]

Ve svařování můžeme k numerickým analýzám přistupovat dvojím způsobem:

Transient analýza: klasický způsob řešení.

Proces je rozebírán postupně v závislosti na čase, tzn., že je proveden výpočet (teplotní pole, napěťové a deformační pole) pro každý časový okamžik. Časové okamžiky jsou zvoleny tak, že každá housenka se musí simulovat samostatně. Uvedená metoda je velmi přesná, ale vyžaduje velmi dlouhé výpočtové časy a nelze posuzovat velké konstrukce. Výsledkem analýz jsou teplotní pole, množství fází, napětí, deformace a distorze.

Lokálně - globální přístup: nová metoda.

Je pro potřebu predikce velikosti distorzí během svařování velkých konstrukčních celků. Nejprve se provede klasická transient analýza typických svarových spojů (lokální model), které budou použity během svařování celku. Vytvoří se komplexní model konstrukčního celku (globální model) včetně všech svarových spojů. Výsledné celkové deformace svarové a tepelně ovlivněné oblasti vypočtené na lokálních modelech jsou přeneseny do příslušných svarových spojů na globálním modelu. Výsledkem jsou distorze (posuvy) analyzovaného konstrukčního celku.

6.1 Transient analýza [18]

Transientní simulace je rozdělena do tří, na sebe navazujících, částí [18]:

Příprava ARA (IRA) diagramů a materiálové databáze – získáme strukturu materiálu, chemické složení a rychlost ochlazení

Teplotně-metalurgické řešení – výsledkem jsou teplotní pole, rozložení fází, výsledná tvrdost struktury a velikost zrna.

Mechanická strukturní analýza – výstupem jsou napětí, deformace a distorze součásti během a na konci svařování.

Výsledky navazují na předchozí část řešení. Analýza deformací a napětí je řešena v nelineární elasto-plastické oblasti materiálu s uvažováním velkých deformací. Lze však použít i viskoplastické chování materiálu. Materiál se chová plasticky do teploty 450 °C, poté přejde do viskoplastického stavu. Viskoplastickým chováním je myšlena kombinace viskózního chování a izotropního zpevnění materiálu.

6.2 Lokálně – globální přístup (LGA) [18]

Metoda byla vyvinuta pro optimalizaci a predikci distorzí reálných konstrukcí s mnoha desítkami až stovkami metrů svarů. LGA je kombinací transient metody a elastické analýzy globálního modelu.

Postup je řešen ve čtyřech krocích [18]:

Lokální modely vypočtené transient metodou.

Konstrukce obsahuje obvykle více technologií svařování, odlišné parametry svařování a různé tuhosti konstrukcí.

Vytvoření globálního modelu zastupující celek se všemi svary.

Výhodou je, že celý model není vytvořen z prostorových prvků, které prodlužují čas simulace.

Přenesení celkové deformace z lokálních modelů na globální model reprezentující jednotlivé svarové spoje.

Globální elastická analýza s postupem svařování a přidáváním jednotlivých částí konstrukce. Z výsledných distorzí se realizují optimalizace procesu.

6.3 Simulační software SYSWELD [18]

Veškeré numerické simulace diplomového projektu jsou řešeny v programu SYSWELD a VisualWeld francouzské společnosti ESI Group na školní licenci od firmy Mecas ESI. Systém SYSWELD a jeho následovník VisualWeld je určen pro simulaci svařovacích procesů a pro modelování tepelné zpracování. V těchto oblastech patří mezi přední softwary.

6.3.1 Geometrický model

Geometrie součásti určená pro simulaci je vytvořena v programu Visual – Mesch 6.5.0. Zde se objekt tzv. “namešuje”, což znamená vytvoření sítě konečných prvků na modelu. Jednotlivé části se zařadí do skupin a kolektorů. Ve skupinách jsou svary, teplotně ovlivněná oblast - TOO, základní materiál a obálka přestupu tepla. Obálka simuluje podmínky přestupu tepla mezi materiálem a okolním vzduchem.

V kolektorech jsou informace o cestě zdroje tepla a okrajové podmínky.

6.3.2 Vstupní data

Program SYSWELD má svoji vlastní databázi materiálů. Všechny materiálové vlastnosti jsou k materiálům přiřazovány ze souboru METALLURGY.DAT. Soubor dále obsahuje definované tepelně-metalurgické vlastnosti materiálů z databáze software. Získání nových materiálových charakteristik o požadované jakosti je velice obtížné, protože materiálové vlastnosti jsou závislé na teplotě, tepelném zpracování a historii zatěžování.

6.3.3 Materiálová data [18]

Získat materiálové vlastnosti pro řešení deformací a napětí může být někdy velmi obtížné. Pro některé materiálové charakteristiky v numerické simulaci byly již dříve vytvořeny pokusné programy. Ovšem tyto práce jsou hodně náročné na čas a tím prodlužují simulaci. V SYSWELDu se nachází již obsažená databáze materiálů.

Pro tepelně - metalurgické analýzy potřebuje materiálové charakteristiky [18]:

- ARA diagram
- chemické složení materiálu
- měrná tepelná vodivost λ [W/mK]
- měrné teplo c [J/kg K]
- hustota ρ [kg/m³]
- přestup tepla do okolí β [W/m²K]

Pro mechanickou analýzu potřebujeme materiálové charakteristiky [18]:

- poissonova konstanta ν [1]
- modul pružnosti E [MPa]
- koeficient tepelné roztažnosti α [1/K]
- meze kluzu R_e [MPa]
- materiálové zpevnění H [MPa]
- vstupní hodnoty pro vysokoplastické chování materiálu

6.3.4 Postup řešení [18]

Následující postup, je rozdělen do tří kroků, které na sebe navazují. Jednotlivé kroky však nepoužívají stejné materiálové charakteristiky na vstupu.

Jednotlivé etapy [18]:

Nalezení koeficientů pro stanovení ARA diagramů. Vstupním parametrem je ARA digram.

Provedení teplotně-metalurgické analýzy procesu svařování. Výstupem jsou struktury materiálu, teplotní pole a tvrdosti.

Realizace mechanicko-strukturní analýzy. Výsledkem jsou deformační pole, napětí a distorze.

Za velké plus software lze považovat to, že umožňuje studium vícevrstvého svařování. V reálu totiž dochází k popouštěcímu efektu, kdy při postupném navařování housenek na sebe, dochází k tepelnému ovlivnění materiálu v předchozí vrstvě svaru.

7 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST [16], [17]

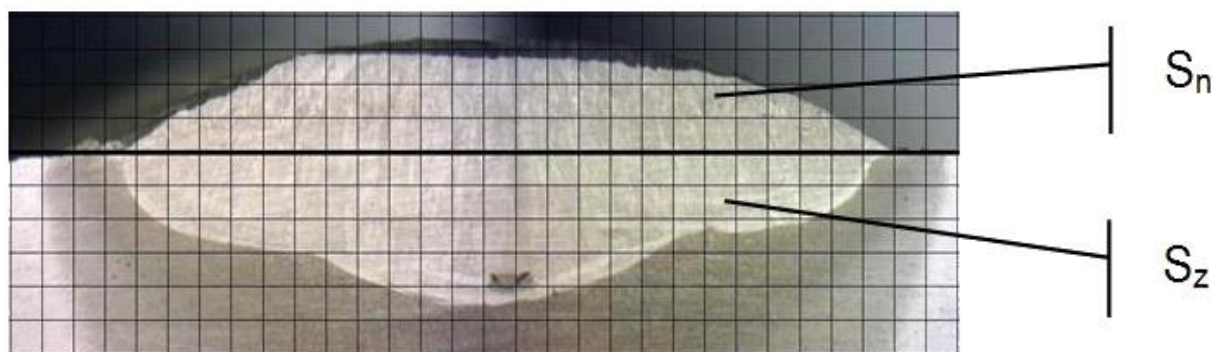
V pokusné části se autor zaměřil na rozbor prací provedený po navaření vzorků a při vytváření a hodnocení výpočtových modelů ze software společnosti ESI Group.

7.1 Poškozování ložiskových čepů v praxi

Ložiska patří u turbín mezi nejvíce namáhané části ústrojí. Možné poruchy ložisek se projevují zvýšením teploty a neklidným chodem turbíny. Pokud nastanou problémy s ložisky, ve velké většině se to týká oblasti nedostatečného mazání. To může být způsobeno nevhodným nebo již přesluhujícím mazivem (pokles mazacích vlastností), zanesením přívodního potrubí, například použitím elastické těsnicí hmoty a tím nevyhovující množství dodávky oleje – přerušení olejového filmu, případně mazivo může obsahovat drobné nečistoty typu kovových třísek. Důsledkem jsou vydřené, poškrábané nebo vyleštěné kluzné plochy čepů. Při správné volbě materiálu, vhodně zvolené konstrukci a správné údržbě mají ložiska velkou životnost. V případě potřeby se provede navařování.

7.2 Zředění svarového kovu [17]

Vrstvy, které se navařují - výstelky, se řeší většinou jako dvojvrstvé. První průchodová vrstva je navařena takovými parametry, aby následný návar tepelně přepracoval základní materiál pod předchozím průvarem. Posouzení strukturních změn, které je způsobeno zředěním svarového kovu, se stanoví na základě průřezu svarového kovu. Přitom je rozhodující množství nataveného materiálu.



Obr. 7. 1 Promísení návaru se základním materiálem dle normy EN 14 700 pro klasifikaci návarových materiálů.

Promísení se počítá jako podíl plochy závaru S_z k ploše celého svaru (plocha návaru S_n a závaru S_z). Po vynásobení 100 vyjde promísení v procentech. Tímto způsobem proběhlo vyhodnocení návaru na obrázku 7. 1.

$$Z' = \frac{S_z}{S_z + S_n} \cdot 100\% \quad (7. 1)$$

$$Z' = \frac{72}{72 + 53} \cdot 100\%$$

$$Z' = \frac{72}{125} \cdot 100 = 58 \%$$

Promísení, které je nutno z hlediska možných podnávarových trhlin počítat, je zde relativně vysoké. Hodnota 58 % znamená, že navařený kov má z 58 procent vlastnosti základního materiálu. Musí se tudíž provést vícevrstvé navaření. Příklady promísení a na nich závislé počty vrstev návarů jsou v tabulce 7. 1.

Tab. 7. 1. Promísení návaru se základním materiálem [16]

Metoda	Promísení [%]	Počet vrstev	Síla [mm]
Navařování plamenem	3 – 5	1 – 3	3
Ruční obalovaná elektroda	10 – 30	2 – 4	3 – 6
TIG – navařování	7 – 15	1 – 3	3
MIG – navařování	13 – 30	2 – 4	6
MAG – navařování	25 – 45	3 – 5	6
Pod tavidlem – jeden drát	30 – 50	3 – 4	10
Pod tavidlem – více drátů	15 – 30	2 – 3	6
Pod tavidlem – páska	8 – 20	1 - 3	4 - 6

7.3 Deskripce prací na rotorových ocelích

Tato kapitola se věnuje hodnocení návarů plněným drátem FLUXOCORD 42 o průměru 3,2 mm na desce z oceli X22CrMoV 12-1. Pro získání znalosti o chování přídatného materiálu na vysokolegované oceli byly provedeny návary na desce tloušťky 6 mm. Chemické složení základního materiálu je v tabulce 7. 2. a naměřená tvrdost v tabulce

Tab. 7. 2 Chemické složení desky:

Prvky v hm. %	C	Mo	Cr	Ni	V	Mn	Si	P	S	Nb
	0,22	0,85	11,5	0,65	0,30	0,65	0,22	0,02	0,003	0,47

Tab. 7. 3 Tvrdost ZM desky:

Tvrdost HV10	218	225	223
--------------	-----	-----	-----

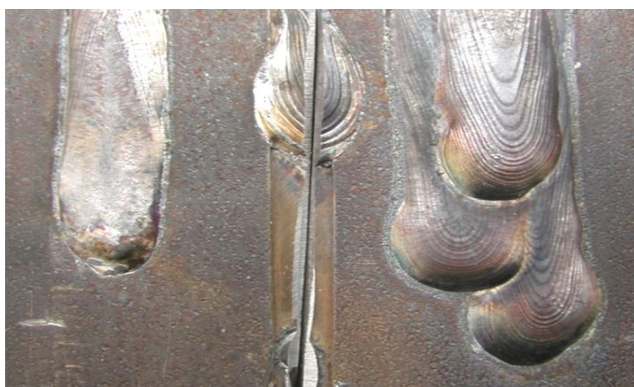
Dle tvrdosti uvedené v kontinuálním ARA diagramu oceli X22CrMoV 12-1 na obrázku 2. 1, je ocel v základním stavu zpracovaná na perliticko-bainitickou strukturu.

Tab. 7. 4 Použité svařovací parametry

Parametry svařování	U [V]	I [A]	v_s [mm.s ⁻¹]	Q_s [kJ·mm ⁻¹]	předehřev [°C]
	30	350	8,33	1,26	200

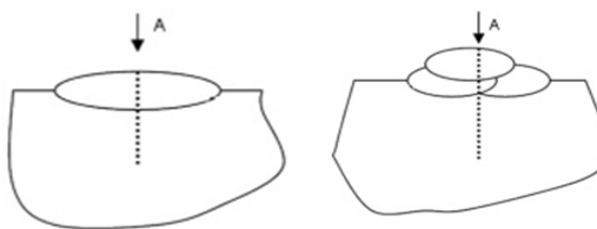
$$Q_s = \frac{U \cdot I \cdot \eta}{v_s \cdot 1000} = \frac{30 \cdot 350 \cdot 0,95}{8,33 \cdot 1000} = 1,26 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1} \quad (7. 2)$$

Provedeny návary jednou a třemi housenkami s překrytím dle obrázku 7. 2.

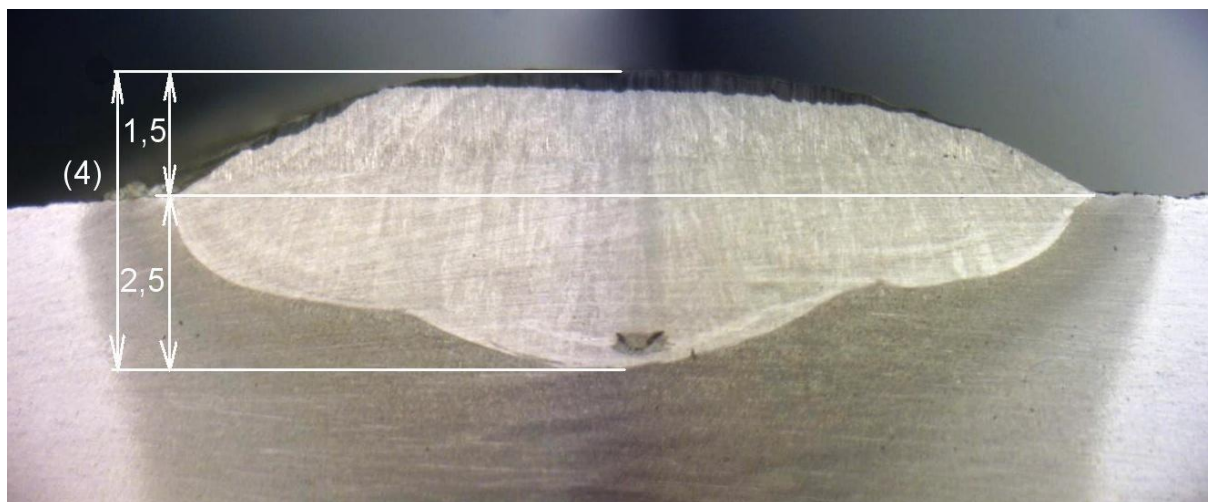


Obr. 7. 2 Návarové housenky na desce mat. X22CrMoV 12-1. Vlevo viditelný jeden návar, vpravo patrné tři návary

Po svařování byla deska přikryta izolační látkou a po ochlazení rozříznuta a vybroušena pro měření tvrdosti HV10. Měření bylo provedeno dle obr. 7. 3. Výsledky měření tvrdosti jsou v tabulce 7. 5 a 7. 6. Obrázek 7. 4 a 7. 5 je přiložen pro ilustraci a porovnání vzdáleností ve svaru a vzdálenosti vpichů při měření tvrdosti.



Obr. 7. 3 Linie měření tvrdosti pro jednu a tři housenky

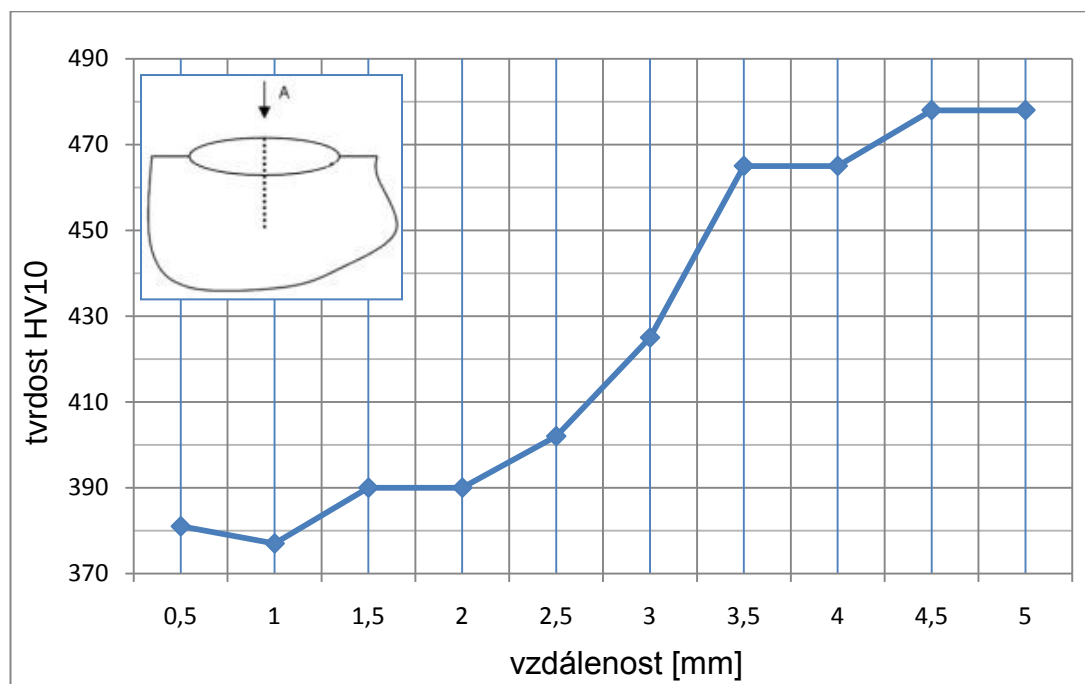


Obr. 7. 4 Rozměry jednoho návaru ke komparaci vzdálenosti vpichů při měření tvrdosti

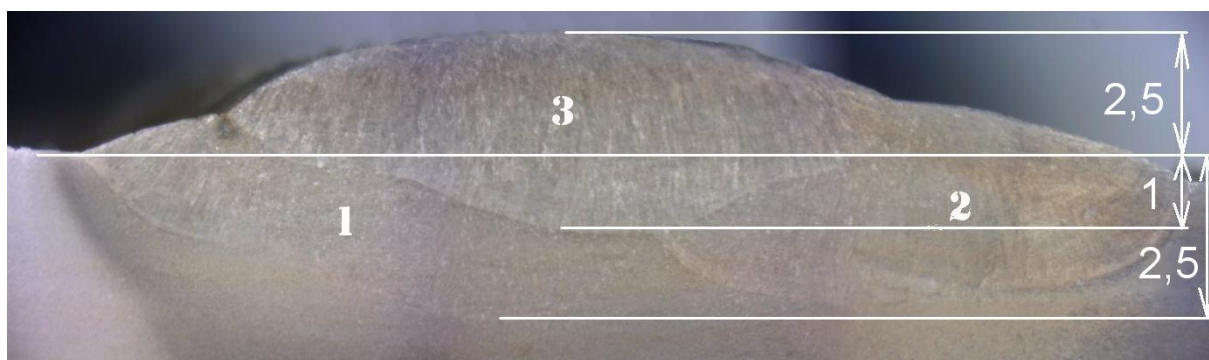
Poznámka: tmavé místo kopírující linii světlého návaru, je také návar, který je však podbroušený a proto není naleptán a jeho viditelnost je omezená

Tab. 7. 5 Hodnoty tvrdosti u jedné housenky

Č. měření	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.
Vzdálenost [mm]	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
Tvrdost HV10	381	377	390	390	402	425	465	465	478	478



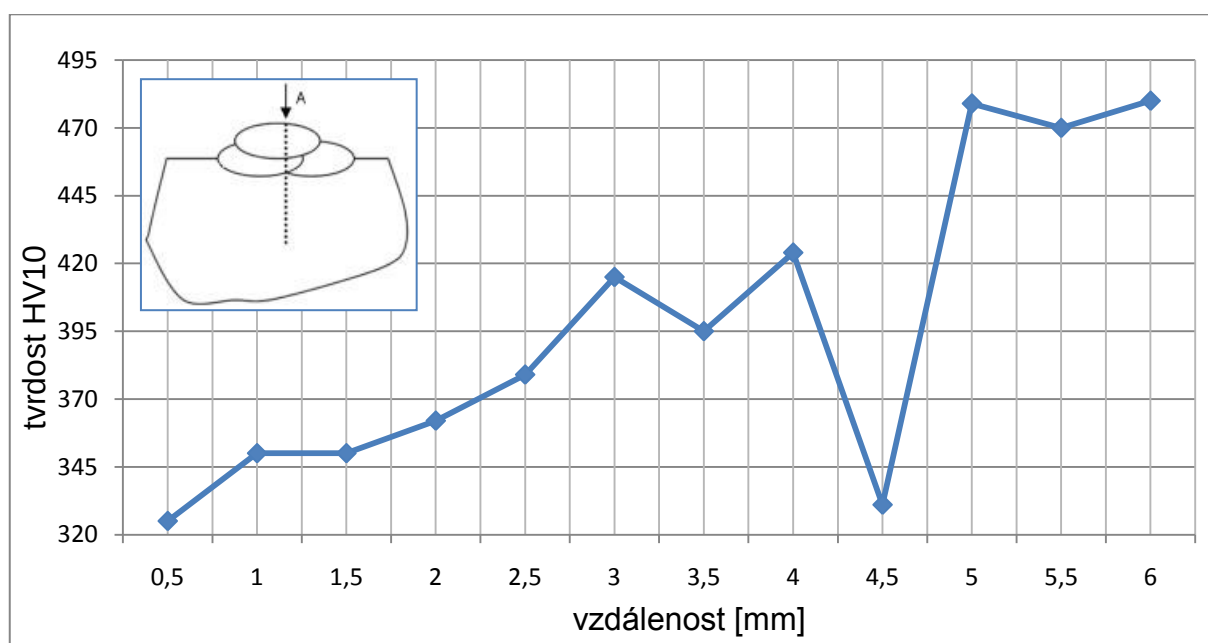
Graf 7. 1 Průběh tvrdosti u návaru jedné housenky



Obr. 7. 5 Rozměry tří návarů ke komparaci vzdálenosti vpichů při měření tvrdosti

Tab. 7. 6 Hodnoty tvrdosti u navařených 3 housenek

Č. měření	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.
Vzdálenost [mm]	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6
Tvrdost HV10	325	350	350	362	379	415	395	424	331	479	470	480



Graf 7. 2 Průběh tvrdosti u návaru 3 housenek

Hodnocení tvrdosti:

Po navařování jedné housenky na oceli X22CrMoV 12-1 byl svarový kov rovnoměrně ochlazen na pokojovou teplotu. Dominantním prvkem při ovlivňování tvrdosti je uhlík. Tvrdost spolu se zvyšujícím obsahem uhlíku stoupá, viz rovnice 8. 5 a 8. 6. Z uvedeného tvrzení je zřejmé, že nejtvrďší bude základní materiál, jelikož přídatný kov obsahuje 0,05 % C a základní kov o 78 % víc. Návar vykazuje nejnížší tvrdost těsně pod povrchem návaru. V promíseném kovu, kde se míchá základní a

přídavný materiál, tvrdost plynule roste až k hodnotě 465 HV. Tepelně ovlivněný základní kov má tvrdost cca 480 HV.

U navaření tří housenek se dle obrázku 7. 5 projevila žíhací efekt na sebe pokládáných housenek. U krycí housenky rostla tvrdost směrem k základnímu materiálu se stoupajícím obsahem uhlíku. Po přechodu na spodní housenku, která byla vyžíhaná krycím svarem, tvrdost klesla téměř o 100 HV. Přejítí do základního materiálu opět vyvolalo skokový nárůst tvrdosti na cca 480 HV.

Dle naměřené tvrdosti a přiloženého ARA diagramu 2. 1 lze vyvodit závěr, že materiál svojí naměřenou tvrdostí 330 - 480 HV spadá v ARA diagramu do oblasti perliticko – bainitické až feriticko – perliticko – bainitické struktury. Podle diagramu této tvrdosti odpovídá rychlost ochlazování cca $0,9 - 3 \text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$. Takovéto rychlosti ochlazování je možné dosáhnout pouze velice pomalým ochlazováním v peci a ne při našem způsobu ochlazování, překrytím izolačního materiálu.

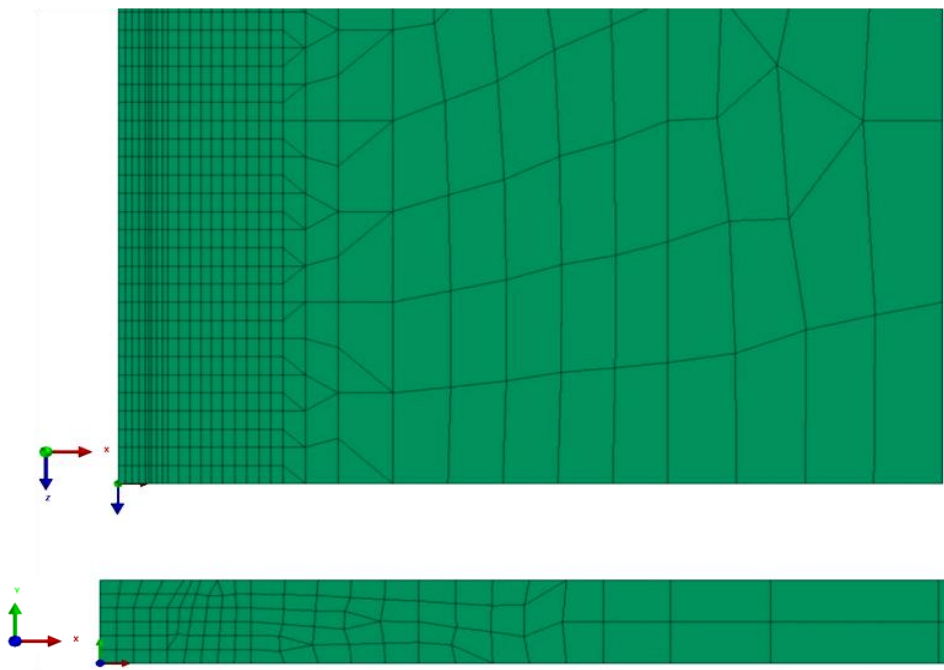
8 NUMERICKÉ SIMULACE

Díky rychlému vývoji programů založených na metodě konečných prvků lze velmi efektivně provádět simulace v oblasti svařování. Modelování velice věrně kopíruje technologický proces. Pro posouzení přesnosti simulací nám do jisté míry pomáhají experimenty. Ty redukují počet reálných zkoušek. Přesnost numerických simulací ovlivňuje spousta vstupů. Na korektnosti zadávání vstupních parametrů závisí kompletně výstupy a přesnost výsledků. Těmi jsou, mimo jiné, okrajové podmínky a optimalizovaný tepelný zdroj.

8.1 Postup při tvorbě modelu

Modely byly tvořeny v programu Visual – Mesh 6. 5. 0 od společnosti ESI Group. Postup kroků vedoucích k vytvoření modelu bude demonstrován na desce s jedním návarem.

V první fázi se modelovala zkušební deska. Pomocí souřadnic bodů se vytvořily skupiny pro mešování (z anglického meshing – síťování). Začíná se zpravidla na ploše XY v bodě $[0;0;0]$ a vytváří se jen půlka modelu, druhá část se pomocí software nástrojů zrcadlí. Jednotlivé části první půlky modelu se nasítují takovým způsobem, aby počet a umístění uzlů přesně sedělo se sousedním úsekem. Pokud máme vytvořenou síť na jednotlivých blocích, můžeme ji protáhnout do prostoru, do osy Z. Zde zadáváme délku modelu a počet uzlů, který se má na daném rozměru vytvořit. Směrem od osy budoucího modelu postupně ředíme vytvářenou síť, jak je vidět ve spodní části obrázku 8. 1.

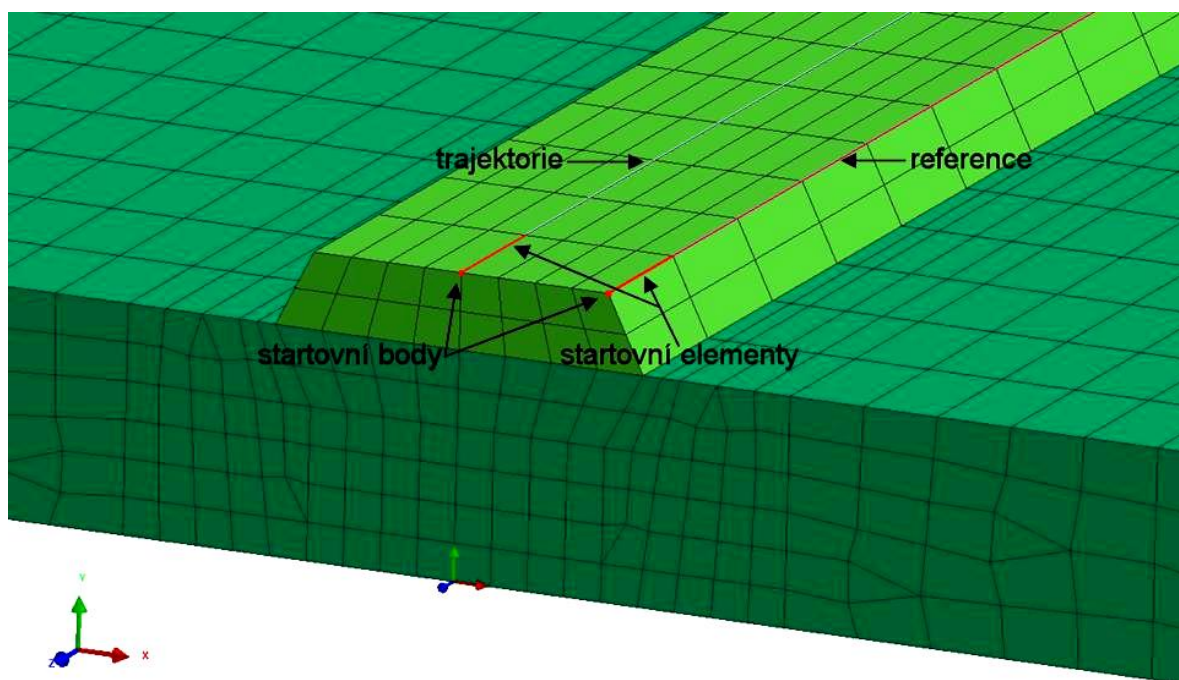


Obr. 8. 1 Ředění sítě v ose XY a XZ.

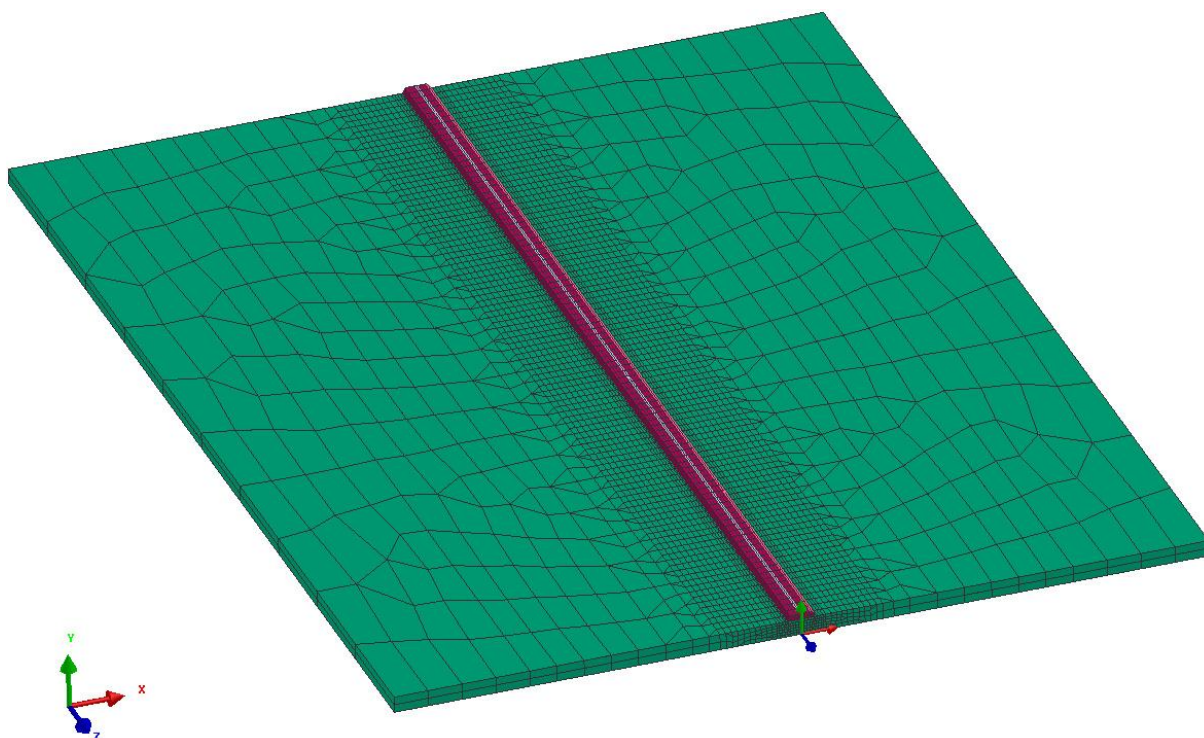
V dostatečné vzdálenosti od místa, které nás zajímá, v tomto případě svar umístěný ve středu zkušební desky, máme dostatečně zředěnou síť. V těchto místech hustá síť ztrácí vypovídací význam a spíše je na škodu, protože na výpočet už nemá takový vliv, jen ho prodlužuje. Čím jemnější síť, tím delší doba výpočtu. Nyní se začne ředit síť ve směru osy X na ploše XZ, úplně stejným způsobem jak předešlá část. Viz horní díl obr 8. 1. Tímto způsobem si hlídáme potřebnou hustotu a kvalitu sítě, oproti způsobu automesch, který síť vytvoří sám.

V druhé fázi obdobným stylem vytvoříme svar s promísenou oblastí a zrcadlíme vytvořené kusy. Nyní máme vytvořené tři části – parts. První je samotný svar, druhá je oblast promísení, třetí je materiál desky. Každý part má přiřazen jiný materiál s jiným chemickým složením a souvisejícím ARA diagramem. Hranice svaru, promísení a desky jsou od sebe odděleny pevnou hranicí. SYSWELD totiž neumí modelovat promísení mezi jednotlivými částmi, pokud není přídavný a základní materiál velmi podobný. Promísenou oblast jsme vytvořili, protože byl potřeba simulovat výpočet tvrdosti. A pokud bychom nevytvořili promísení, docházelo by ke skokovému navýšení tvrdosti spojené se okamžitým rozdílem obsahu uhlíku v ZM a PM.

Následuje vytvoření „křivek“ trajektorie a reference. Obrázek 8. 2. Tyto dva geometrické útvary udávají přesnou trasu tepelného zdroje. Popis trasy zdroje ještě doplní startovní a konečné body a startovní elementy. Modelu zadáme okrajové podmínky, jelikož doposud jakoby „visel ve vzduchu“ a přiřadíme mu „obálku“ simulující přestup tepla mezi vzduchem a modelem. Okolní teplota emuluje zvolených 20 °C. Hotový model je na obrázku 8. 3.



Obr. 8. 2 Údaje pro translaci tepelného zdroje



Obr. 8. 3 Kompletní model připravený pro výpočty s viditelnou modrou úsečkou trajektorie ve středu červené housenky

8.2 Tepelné zdroje a jejich optimalizace [18], [27], [28]

Cílem optimalizace tepelného zdroje je uvedení jeho parametrů na takové hodnoty, aby se co nejvíce shodoval se skutečností. Namodelování teplotního pole, tzn. tepelného zdroje, má dominantní vliv na výslednou materiálovou strukturu, tvrdost, zbytkové napětí a distorze.

Proto, abychom mohli sladit numerickou simulaci a skutečný tvar svaru (makrovýbrus), musíme správně regulovat parametry tepelného zdroje. Proměnné, které mají vliv na rozložení teplotních polí, jsou funkcí teploty v určitém bodě a v určitý čas. Teplota v tavné lázni je tedy při hledání tvaru a velikosti natavené oblasti rozhodujícím parametrem.

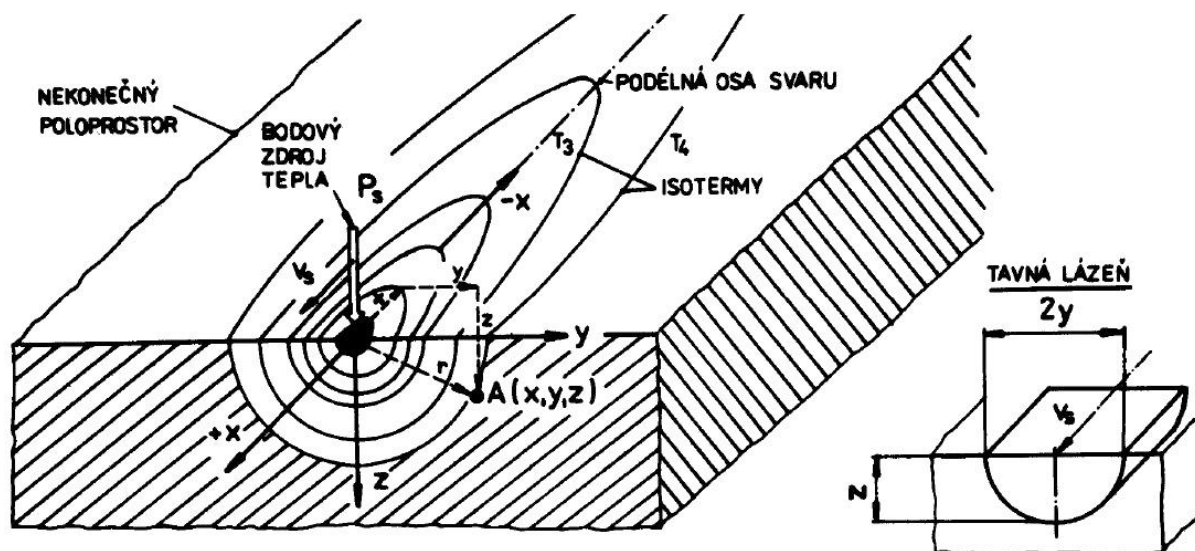
Na tomto místě je potřebné ještě podotknout, že zvolená tloušťka zkušební desky nebyla příliš vhodně zvolena. Při simulacích výpočtů svařování je z dlouhodobých zkušeností známo, že minimální tloušťka stěny by se měla pohybovat kolem 10 - 15 mm. Tloušťka stěny sice nemá vliv na výpočty teplot, ale problémy mohou nastat při mechanických výpočtech. Může zde dojít ke ztrátě stability.

8.2.1 Tepelné zdroje

Tepelné zdroje uvažujeme jako bodové a čárové. Z bodového zdroje - 3D, se teplo šíří z povrchu tělesa ve třech osách do celého modelu. U čárového modelu - 2D, prostupuje teplo celou tloušťkou plechu a šíří dvěma osami. Dvourozměrný model je pro tenké plechy. Svařuje se zdrojem o vysoké hustotě energie, u kterého se

zanedbává přestup tepla v ose z. Příkladem je plasma nebo svařování elektronovým svazkem.

Na obrázku 8. 4 je uvedeno trojrozměrné teplotní pole. Model představuje tlustý plech a navařenou housenku s malým a mělkým průvarem. Tento typ teplotního pole posloužil v našem případě jako mustr pro porovnání rozměrů natavené oblasti v simulaci s porovnáním experimentálních desek. Předpoklady potvrdili skutečnost, že vypočítané rozměry jsou většinou menší než naměřené. Je to způsobeno nedokonalou simulací přestupu tepla do okolí a vlivem koeficientů měrné tepelné vodivosti a měrného tepla.



Obr. 8. 4 Model trojrozměrného teplotního pole- 3D [18]

Při simulacích procesu svařování lze využít z matematického hlediska různých typů tepelných zdrojů. Jednotlivé druhy se od sebe liší geometrií roztavené oblasti a teplotním tokem. Pro svařování autorem pod tavídkem byl zvolen dvou-elipsoidní model teplotního zdroje. Viz obrázek 8. 5. Tento model však nelze použít jako obecný zdroj pro všechny druhy svařování. Dvouelipsoidní model již z principu nevyhovuje vysokoenergetickému svařování typu plasma a laser, čili čárový 2D model. Již dříve se zjistilo, že dobrých výsledků se dosáhlo s použitím dvouelipsoidního modelu pro ruční obloukové svařování.

Pro popsání zdroje slouží tyto matematické rovnice:

$$q_{(x,y,z,t)} = \frac{6 \cdot \sqrt{3} \cdot f_r \cdot Q}{a \cdot b \cdot c \cdot \pi \cdot \sqrt{\pi}} \cdot e^{\frac{-3 \cdot x^2}{a^2}} \cdot e^{\frac{-3 \cdot y^2}{b^2}} \cdot e^{\frac{-3 \cdot (z-v \cdot (t-t_0))^2}{c^2}} \quad (8. 1)$$

$$q_{(x,y,z,t)} = \frac{6 \cdot \sqrt{3} \cdot f_r \cdot Q}{a \cdot b \cdot d \cdot \pi \cdot \sqrt{\pi}} \cdot e^{\frac{-3 \cdot x^2}{a^2}} \cdot e^{\frac{-3 \cdot y^2}{b^2}} \cdot e^{\frac{-3 \cdot (z-v \cdot (\tau-t))^2}{d^2}} \quad (8. 2)$$

$$f_f + f_r = 2 \quad (8. 3)$$

q – tepelný tok do materiálu [$W \cdot m^{-2}$]

Q – vstupní energie oblouku [W]

a, b, c, d – rozměr tavné lázně [m]

f_f, f_r – konstanty ovlivňující rozložení intenzity toku energie do materiálu [1]

$\square$ – celková doba svařování [s]

$$Q = U \cdot I \cdot \eta \quad (8. 4)$$

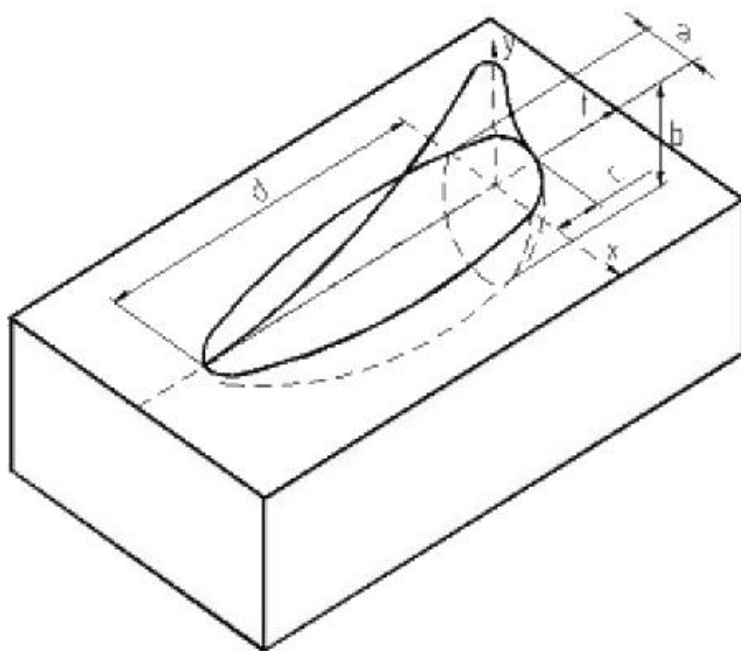
V rovnicích 8. 1 a 8. 2 lze výsledný tepelný tok ovlivnit hodnotami a, b, c, d a Q . Parametry a, b, c a d je potřeba znát při použití nemodifikovaného dvouelipsoidního modelu a popisují velikost natavené oblasti. „Tyto parametry jsou zjišťovány na základě rovnic pro dvou a třírozměrné teplotní pole nebo na základě provedených experimentů.“ [18] Tyto hodnoty jsme odměřili z makrovýbrusů. Parametry a, b, c, d odpovídají zadávaným volitelným hodnotám L, W, P , kde $L=d+c, W=2a, P=b$.

Při rozboru vzorce 8. 4 - vstupní energie oblouku, zjistíme, že je velmi závislý na účinnosti svařovacího procesu. Účinnost ovlivňuje totiž množství tepla, které vneseme do materiálu a tím zprostředkovaně i výsledné zbytkové napětí a distorze. Údaje o účinnosti metody automat pod tavidlem se ale v různých literárních zdrojích rozcházejí, viz tabulka 8. 1. Hodnota efektivity procesu může ovlivnit v konečném důsledku vstupní energii až o významných 20 %. Koeficienty z tabulky 8. 1 jsou z literatury a proto se v praxi mohou reálně pohybovat klidně okolo hodnoty 0,60. Při simulacích se hodnoty účinnosti pohybovali v limitech daných intervalů níže.

Tab. 8. 1 Odlišnosti v koeficientu účinnosti svařovacích metod

Svařovací metoda	Účinnost dle [27]	Účinnost dle [28]
Automat pod tavidlem	0,80 – 0,99	0,90 – 0,98
TIG (AC)	0,20 – 0,50	0,20 -0,50
TIG (DC)	0,50 – 0,80	-
Laser	0,005 – 0,70	-
Ruční obloukové svařování	0,65 – 0,85	0,66 – 0,85

Zajímavými hodnotami účinnosti disponuje laser. Účinnost 0,005 – 0,70 je obrovský rozptyl. Uvedené hodnoty nelze reálně přímo měřit. Nejlepší je nepřímá metoda numerických simulací, kdy měříme teplotní cykly a roztavenou oblast, ladíme zdroj a v podstatě víme, kolik energie jsme do zdroje přivedli. Dále lze pro nepřímé měření využít kalorimetrické metody.



Obr. 8. 5 Model dvou-elipsoidního tepelného zdroje [18]

8. 3 Výsledky teplotních analýz [18]

„Model tepelného zdroje by měl velice věrně simulovat tvar a velikost natavené oblasti, což je nejdůležitější parametr, který má vliv na konečné distorze součástí a velikost zbytkových napětí v okolí svaru.“ [18]

Musíme tedy vytvořit model tak, aby vypočtené velikosti a tvary natavených oblastí ze simulace odpovídaly naměřeným hodnotám z experimentu. Proto bylo provedeno více jak 20 simulací pro validaci tepelného zdroje pro návar jednou housenkou, kde většina je uvedena v tabulce 8. 2. Výpočty se prováděly s různými proměnnými a sledoval se jejich vliv na protavenou oblast. Nejlepší shody bylo dosaženo u simulace č. 2.

Analogické výpočty byly provedeny i u tří housenek, ale pro naznačení chování postačí výsledky z jednoho návaru.

Tab. 8. 2 Hodnoty vstupů a výstupů numerických simulací

Číslo simulace	Volitelné parametry				Naměřené hodnoty		T _{max} [°C]
	L [mm]	W [mm]	P [mm]	Q [J/mm]	šířka [mm]	hloubka [mm]	
1.	4	12	3	900	11,24	3,43	3854
2.	4	14	3	900	11,59	2,99	3506
3.	4	16	3	900	11,67	2,86	3309
4.	4	12	6	900	10,72	5,77	2553
5.	4	14	6	900	10,90	4,45	2249
6.	4	16	6	900	11,07	3,61	2206
7.	8	12	3	900	11,56	3,72	3684
8.	8	14	3	900	11,72	3,41	3470
9.	8	16	3	900	11,74	3,22	3287
10.	8	12	6	900	11,05	>>6	2478
11.	8	14	6	900	11,11	5,42	2308
12.	8	16	6	900	10,95	4,51	2163
13.	12	12	3	900	11,62	3,52	3174
14.	12	14	3	900	11,67	3,28	3017
15.	12	16	3	900	11,79	3,10	2879
16.	12	12	6	900	10,85	>>6	2291
17.	12	14	6	900	10,96	4,91	2146
18.	12	16	6	900	10,83	4,23	2020
19.	4	14	3	1260	13,68	4,16	4860

V tabulce 8. 3 jsou vyseparovány výsledky, které svými hodnotami byly pro tuto práci významné. První je model č. 2, který se rozměrem tavné lázně nejvíce podobal makrovýbrusu. Model č. 19 má zvoleny totožné parametry dvou - elipsoidního zdroje pro natavenou oblast, ale bylo použito vyššího specifického vneseného tepla. Následující dva modely se nacházejí protavenou oblastí na protilehlých koncích spektra protavené oblasti. Model číslo 3 má nejmenší protavenou oblast ze všech provedených výpočtů. Model 10 by byl protaven skrz celou zkušební desku.

Tab. 8. 3 Modely použité pro výpočet tvrdosti

Číslo simulace	Poznámka	Volitelné parametry				Naměřené hodnoty		$T_{\max}$ [°C]
		L [mm]	W [mm]	P [mm]	Q [J/mm]	šířka [mm]	hloubka [mm]	
2.	model	4	14	3	900	11,59	2,99	3506
19.	model s vyšším Q	4	14	3	1360	13,68	4,16	4860
3.	nejméně protavený	4	16	3	900	11,67	2,86	3309
10.	nejvíce protavený	8	12	6	900	11,05	>>6	2478

Hodnota $T_{\max}$ je v některých případech velice vysoká. Pokud vezme v úvahu skutečnou teplotu varu (vypařování) kovů, viz tabulka 8. 4, tak by některé prvky v oceli již dány shořely. Hodnoty $T_{\max}$, které poskytla simulace, jsou pouze informativní. Jedná se totiž o teoretickou, fiktivní hodnotu, která by nastala za ideálních nerealných podmínek. Konkrétně u chromu, by to mělo fatální důsledky na korozní odolnost.

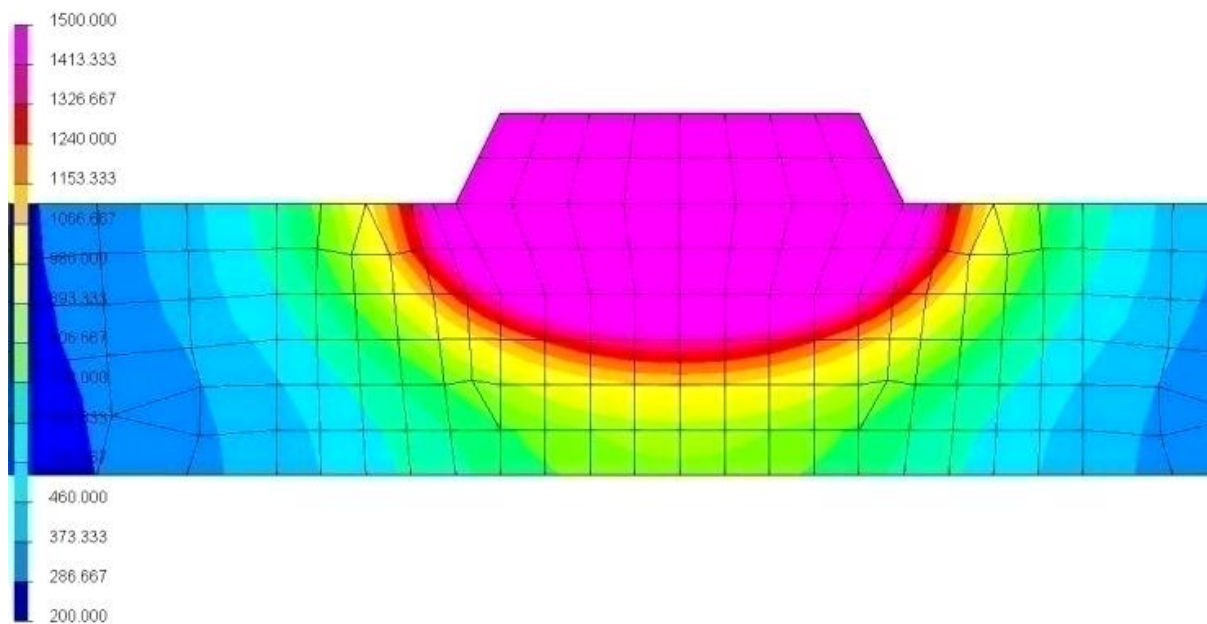
Tab. 8. 4 Teploty varu vybraných kovů

Prvek	C	Ni	Mn	Cr	Mo	V
Teplota varu [°C]	4027	2732	2061	2199	4639	3350

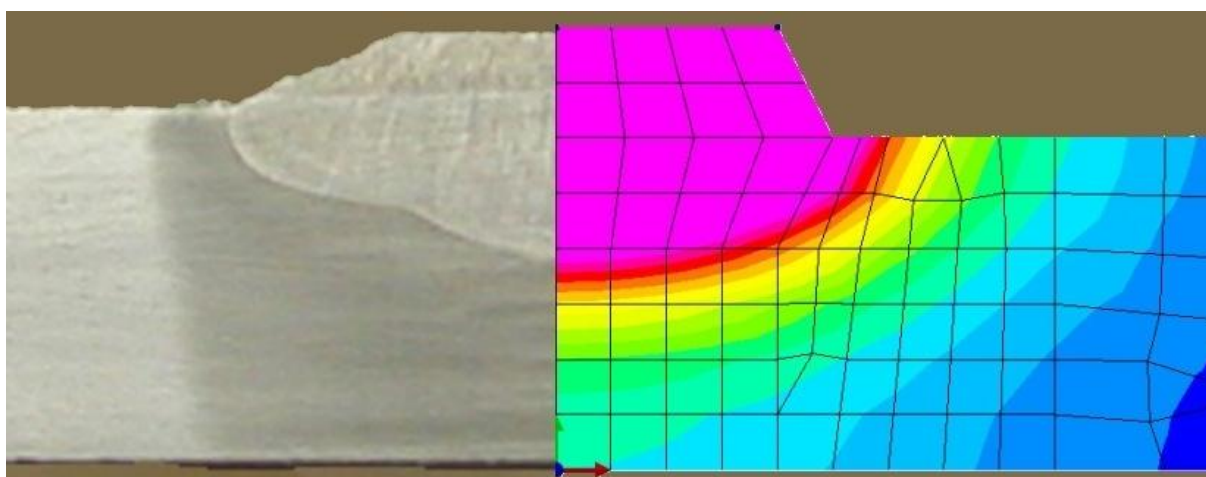
Závěr je takový, že teplota $T_{\max}$ v simulaci je závislá na ploše, která byla protavena a vnesené energii. Je to dáno tím, že celkové množství energie, které taví kov, je na plochy průvarů (u kterých si volíme rozměry tavné lázně) stejné. Proto u průvaru s menší plochou vzrůstá teplota více, než u průvaru s větší plochou, do kterého dodáváme stejné množství energie.

Nutno ještě podotknout, že nad teplotou 1500 °C se velmi těžko odhadují hodnoty přestupu tepla, tepelné vodivosti, entalpie atd., protože se tyto hodnoty nedají za běžných podmínek přesně změřit.

Na následujících obrázcích 8. 6 až 8. 10 jsou vidět obrazové výstupy z teplotní analýzy.



Obr. 8. 6 Model nejvíce podobající se makrovýbrusu

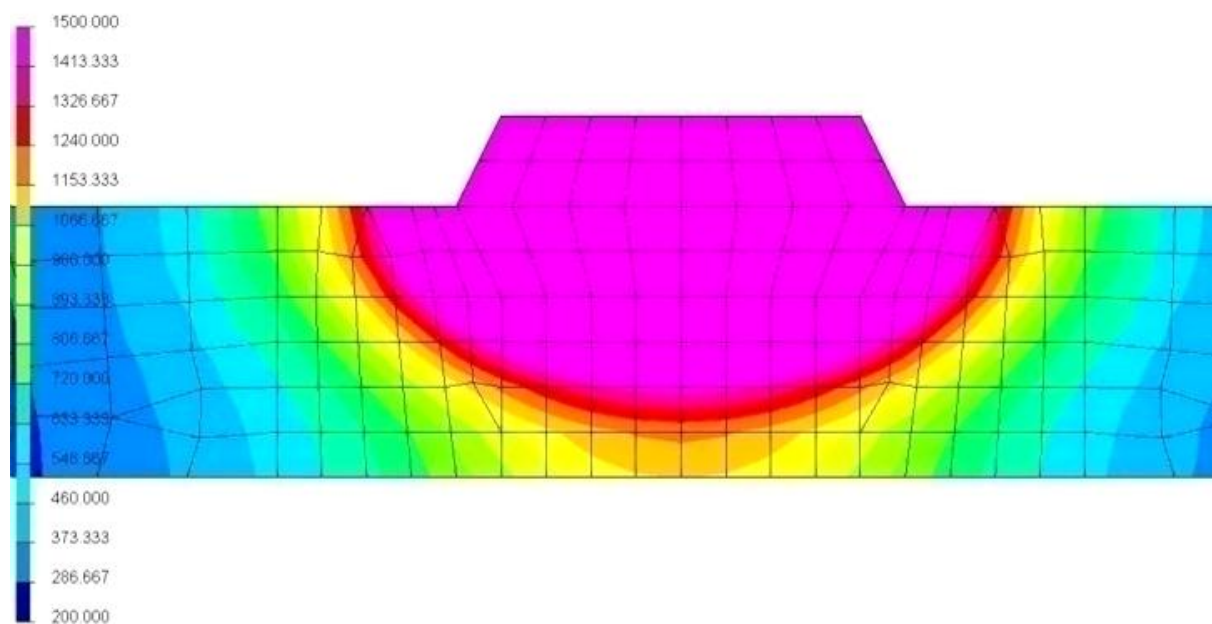


Obr. 8. 7 Komparace skutečného makrovýbrusu a numerického modelu

Nesrovnalosti v porovnání fotky makrovýbrusu a obrázku z numerické simulace, viz obr. 8. 7, jsou dány odlišným měřítkem a porovnání slouží pouze pro ilustraci.

E1260L4W14P3
TEMPERATURE_NOD (L1)
min=188.355 at NODE 94454
max=4660.198 at NODE 81611

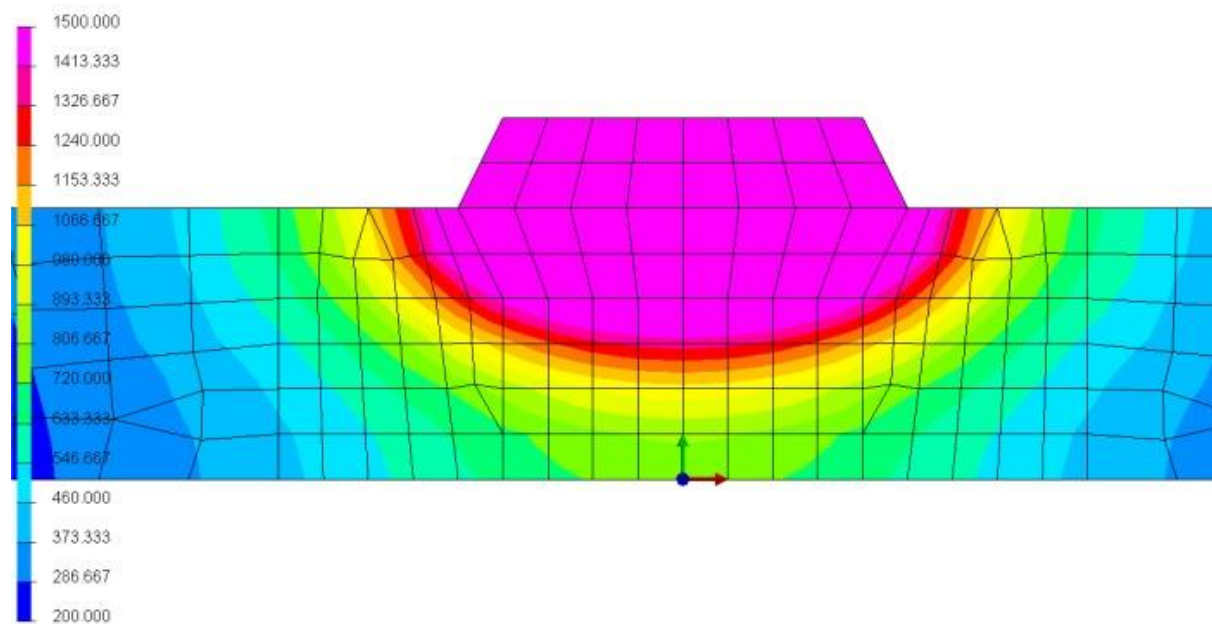
107 / 25.679485



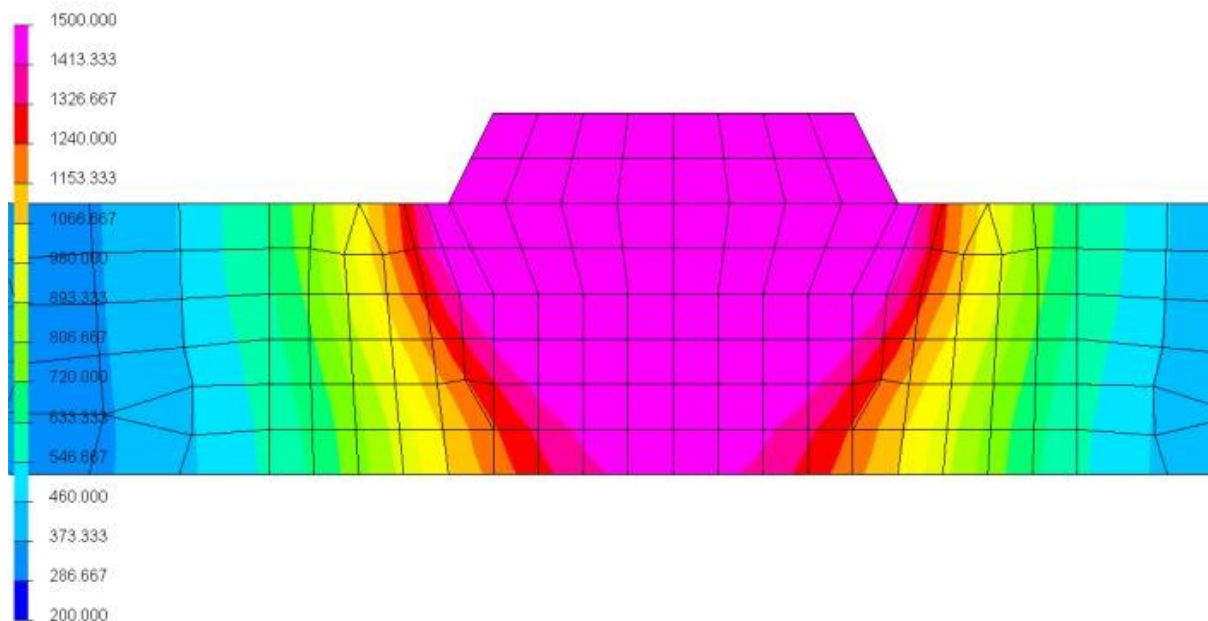
Obr. 8. 8 Model nejvíce podobající se makrovýbrusu se zvýšeným Q_s

E900L4W16P3
TEMPERATURE_NOD (L1)
min=188.355 at NODE 94454
max=3309.527 at NODE 81611

107 / 25.679485



Obr. 8. 9 Model s nejméně protavenou svarovou lázní.



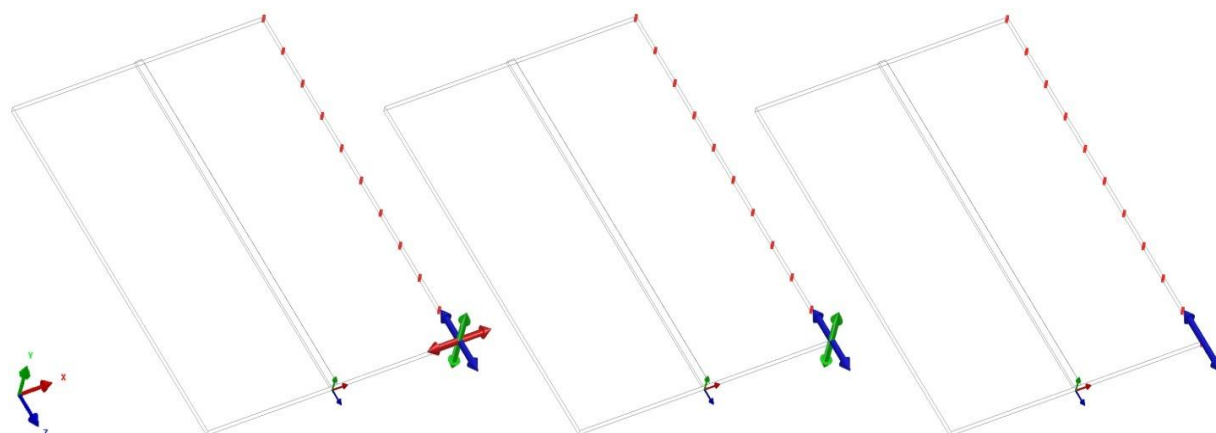
Obr. 8. 10 Model s nejvíce natavenou svarovou lázní – došlo k protavení celé desky

8.4 Vliv tepelného zdroje a okrajových podmínek na deformace [23]

Při rozboru výsledků se ukáže, z jaké příčiny se v práci častokrát píše o správném rozložení teplot ve zdroji. Tepelný zdroj má vliv na:

- strukturu
- deformace
- zbytkové napětí

Kromě tepelného zdroje na výše uvedené konsekvence mají vliv i okrajové podmínky. V případě, že by se deska neukotvila okrajovými podmínkami, byly by deformace po navaření daleko větší, než při zablokování jejího pohybu. Jestliže zamezíme posuvům, nahromadí se pochopitelně v materiálu zbytková napětí. Na obrázku 8. 11 jsou ukázány typy okrajových podmínek použitých pro mechanickou analýzu. V závislosti na druhu okrajové podmínky byly do tabulky 8. 5 zaneseny posuvy v osách X, Y, Z a celkový posuv U u zkoumaných modelů. Celkový posuv se vypočítá jako součet kvadrátů posuvů v jednotlivých osách a poté se výsledek odmocní - $U \cdot (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$.



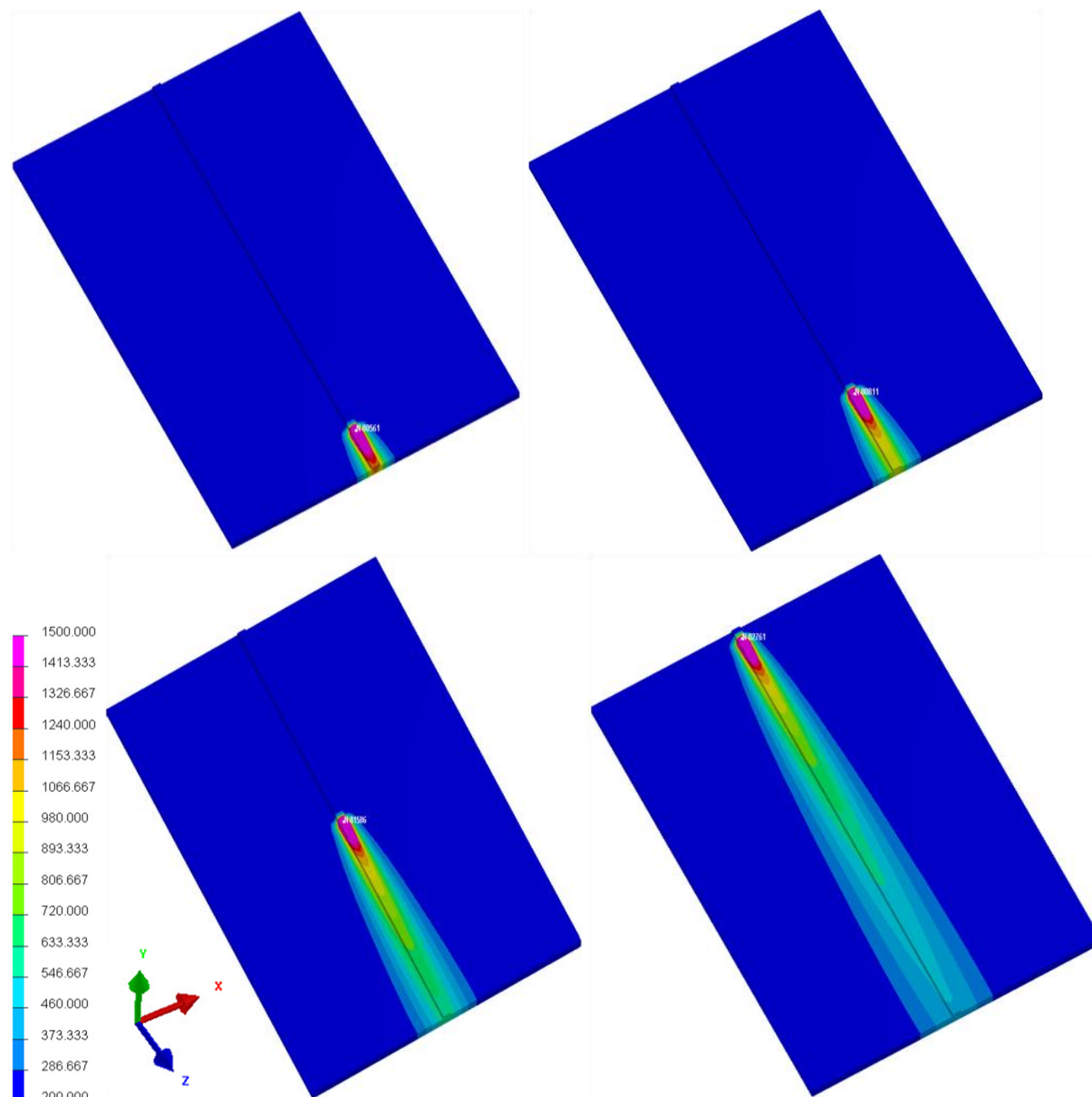
Obr. 8. 11 Okrajová podmínka na zkušební desce vlevo znázorňuje zamezení v pohybu v osách X, Y a Z – „typ A“, omezení pohybu v ose Y a Z naznačuje obrázek uprostřed – „typ B“ a zablokovanou osu Z představuje okrajová podmínka vlevo – „typ C“.

Tab. 8. 5 Rozdílnost vlivu tepelného zdroje a okrajových podmínek při navařování

Číslo modelu	Pozn	Okrajové podmínky	Min/max	U _x [mm]	U _y [mm]	U _z [mm]	U (x ² +y ² +z ²) ^{1/2} [mm]
3	nejméně protaveno	typ A, typ B	min	-0,527	-0,449	-0,143	-
			max	0,074	0,266	0,303	0,579
3“Z“		typ A, typ C	min	-0,545	-0,305	-0,142	-
			max	0,069	1,079	0,303	1,189
10	nejvíce protaveno	typ A, typ B	min	-0,599	-0,373	-0,158	-
			max	0,079	0,358	0,335	0,629
10“Z“		typ A, typ C	min	-0,605	-0,284	-0,158	-
			max	0,076	0,437	0,336	0,693
2“C“	-	0 - 3000 s typ A, typ A 3000 – 3200 s typ A, typ B	min	-0,458	-1,124	-0,112	-
			max	0,458	0,070	0,341	1,143
3 housenky 1. návar	-	typ A, typ B	min	-0,559	-0,010	-0,582	-
			max	0,671	0,567	0,830	0,931
3 housenky 2. návar	-	typ A, typ B	min	-1,488	-0,006	-0,536	-
			max	0,400	0,880	0,969	1,516
3 housenky 3. návar	-	typ A, typ B	min	-2,242	-0,694	-0,321	-
			max	0,099	1,252	0,717	2,269

8.5 Teplotní, mechanická a strukturní analýza u jedné housenky [18]

Na modelu skutečného kusu byl proveden výpočet teplotních polí. Použité tepelné zatížení je $Q = 900 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-1}$. Tato část simulací se provedla pro určení skutečného teplotního pole při průběhu svařování. Tato teplotní pole jsou dále využívána v mechanické analýze. Na obrázku 8.12 je zprostředkován výstup prostorového modelu popisující reálný odvod tepla v reálném čase. Model byl před samotným navařením předehřátý na 200°C . Fialová barva naznačuje roztavený kov.

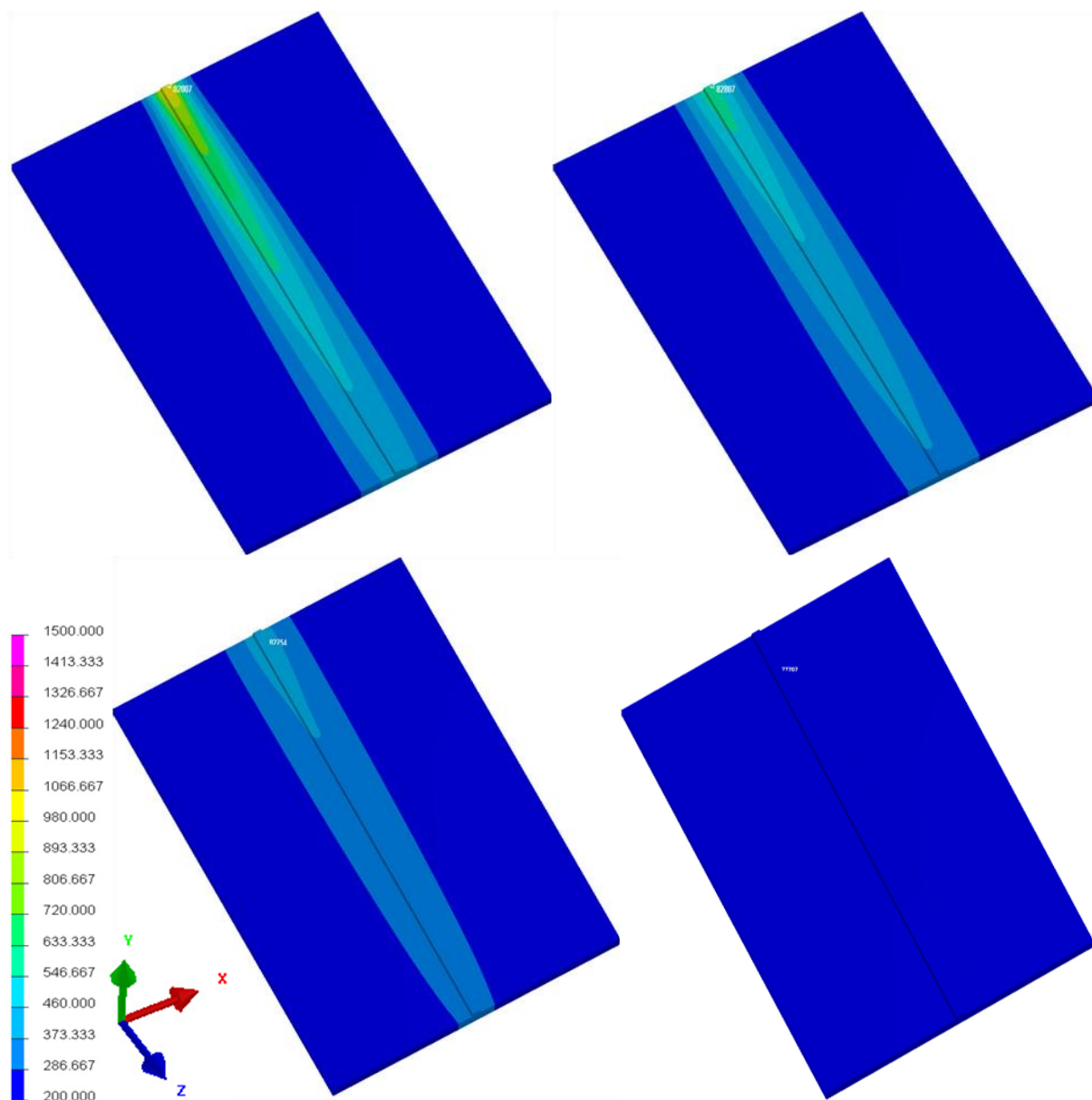


Obr. 8. 12 Vypočtená teplotní pole na modelu s jedním návarem v čase 5 s, 10 s, 25 s a 48 s od začátku svařování.

Tyto modely nejsou univerzální, tudíž je můžeme použít pouze pro simulaci konkrétního vzorku. Při simulaci modelu tepelného zdroje změnou parametrů

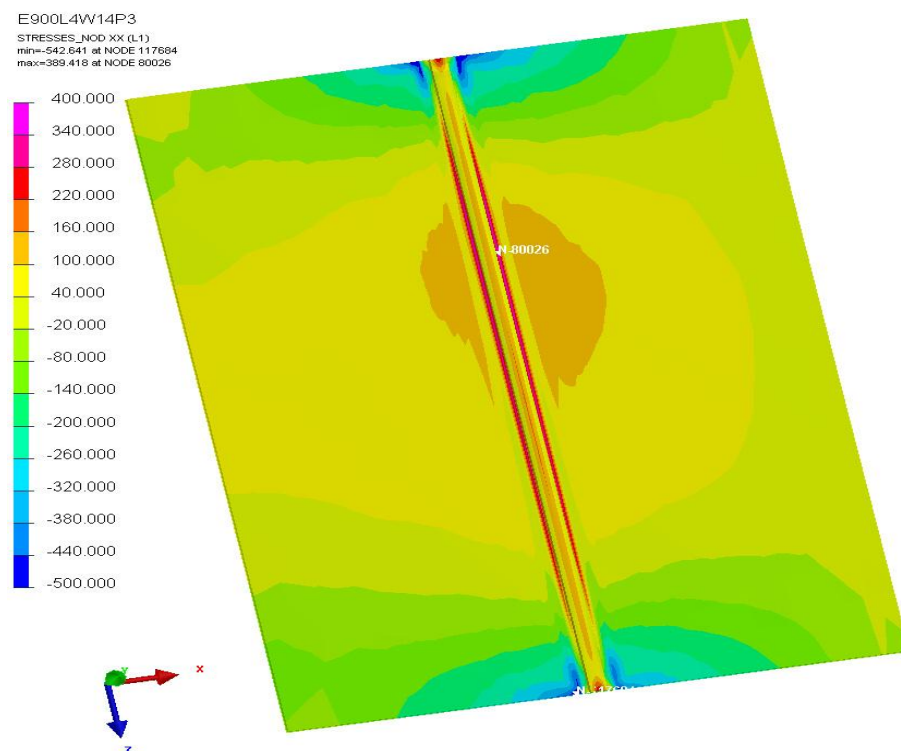
získáme i pozměněný tvar a velikost natavené oblasti (fialová barva). Na síť konečných prvků to nebude mít žádný dopad. V modelech je počítáno s výpočtovým krokem $8 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ a vzdáleností uzlů v oblasti svaru a TOO 4 mm. Teplotní pole s velikostí a tvarem roztavené oblasti sedí s makro-výbrusem.

Model chladnul po dobu 3000 s. Jak je vidět z obrázku 8. 13, v čase 218 s od ukončení navařování, na desce nepřesahovala teplota hodnotu přehřevu, tedy $200 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Rozložení teplotního pole na modelu lze v tomto okamžiku považovat za vyrovnané. Při simulaci přestupu tepla ze svaru do okolí, byla použita teplota vzduchu $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$

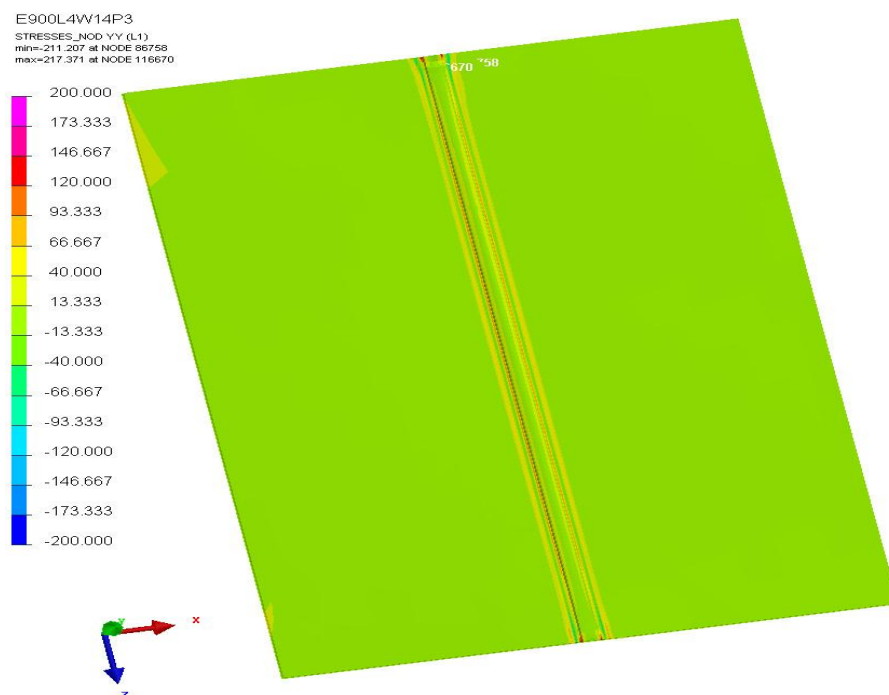


Obr. 8. 13 Chladnutí zkušební vzorku s jedním návarem v čase 8 s, 28 s, 64 s, 218 s po ukončení navařování

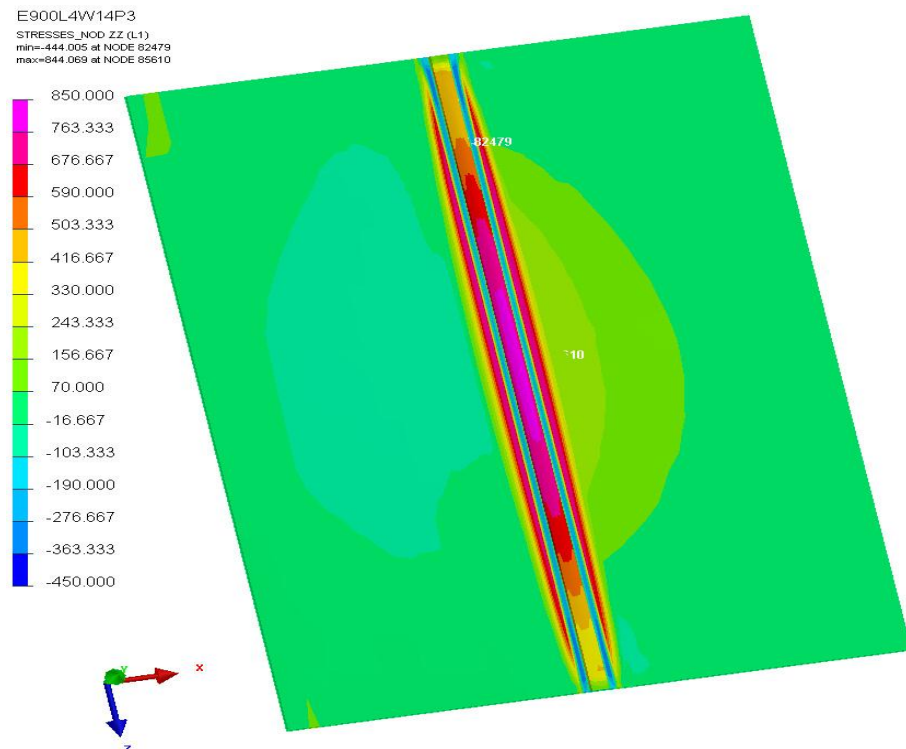
Na modelu skutečné zkušební desky se provedla mechanická analýza zbytkových napětí. V tomto případě na obrázcích 8. 14 až 8. 16 můžeme dle legendy zhodnotit, že u modelů lze rozlišit tahové a tlakové napětí. Zbytkové napětí v ose Y je převážně tlakové (-) a zbytkové napětí v ose Y a Z dosahuje vysokých tahových napětí (+). Rozdíl mezi místy s tahovým a tlakovým napětím činí v ose X cca 800 MPa, v ose Z až 1300 MPa. Tyto rozdíly pak mohou zapříčinit vady ve svarech.



Obr. 8. 14 Výsledné zbytkové redukované napětí na modelu jedné housenky v ose X



Obr. 8. 15 Výsledné zbytkové redukované napětí na modelu jedné housenky v ose Y



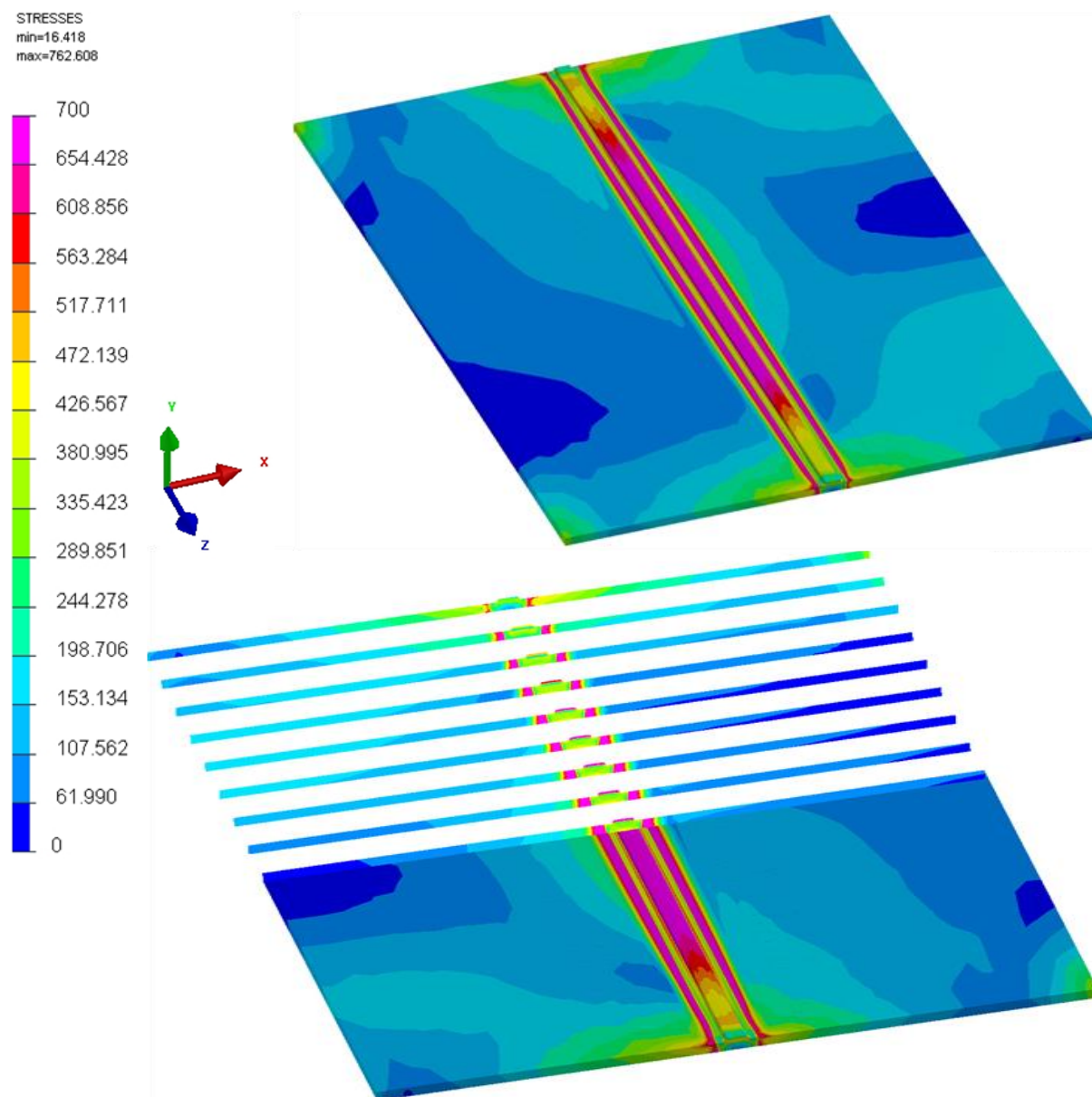
Obr. 8. 16 Výsledné zbytkové redukované napětí na modelu jedné housenky v ose Z

Uváděné redukované napětí von Mises (podmínka HMM) na obrázku 8. 17, “přepočítává” trojosý stav napjatosti na jednoosý. Po tomto přepočtu můžeme porovnávat jednoosé napětí z tahové zkoušky s napětím redukovaným. Nevýhoda používání napětí von Mises je taková, že nepoznáme, jestli výsledné napětí je v tlaku nebo v tahu. Výpočet je vyjádřen pomocí vzorce 8. 5.

$$\sigma_{VM} = f(\sigma_{ij}) = \sqrt{3J_2} \quad (8. 5)$$

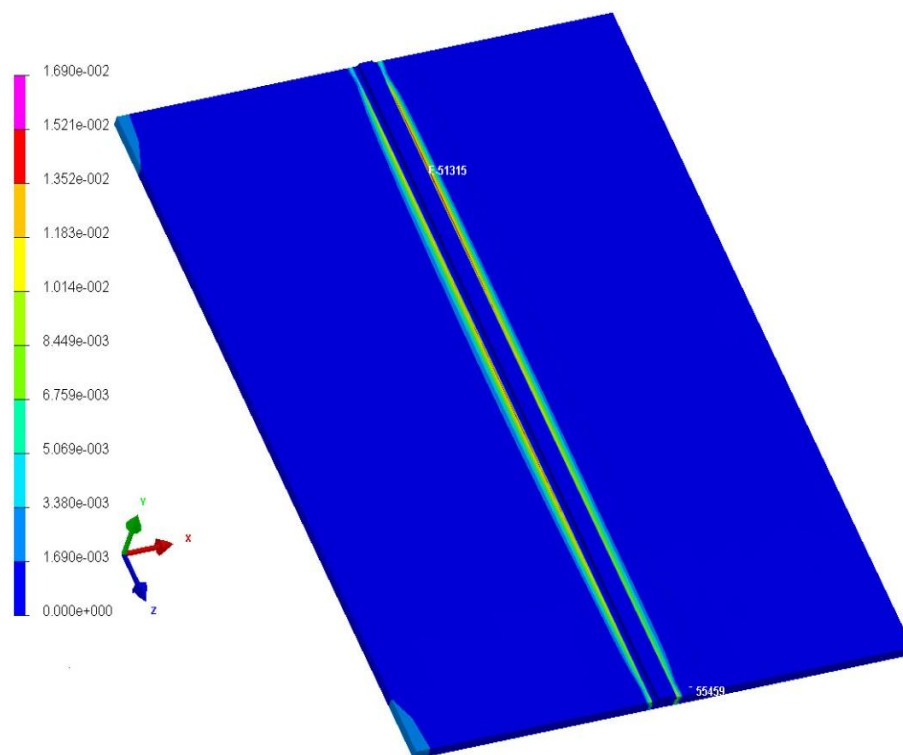
$$J_2 = \frac{1}{6}[(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{11} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2] + \sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2 + \sigma_{23}^2 \quad (8. 6)$$

Pokud ovšem zobrazujeme v osách X, Y, Z není pak složité určit, v kterých místech se nachází tahové nebo tlakové napětí. Je možné, že v místech s tahovým napětím může vzniknout trhlina. Naproti tomu tlakové napětí, to vyvolává dva efekty, které v první řadě zabraňují vzniku trhlin a v druhé řadě potenciální trhliny zastavují.



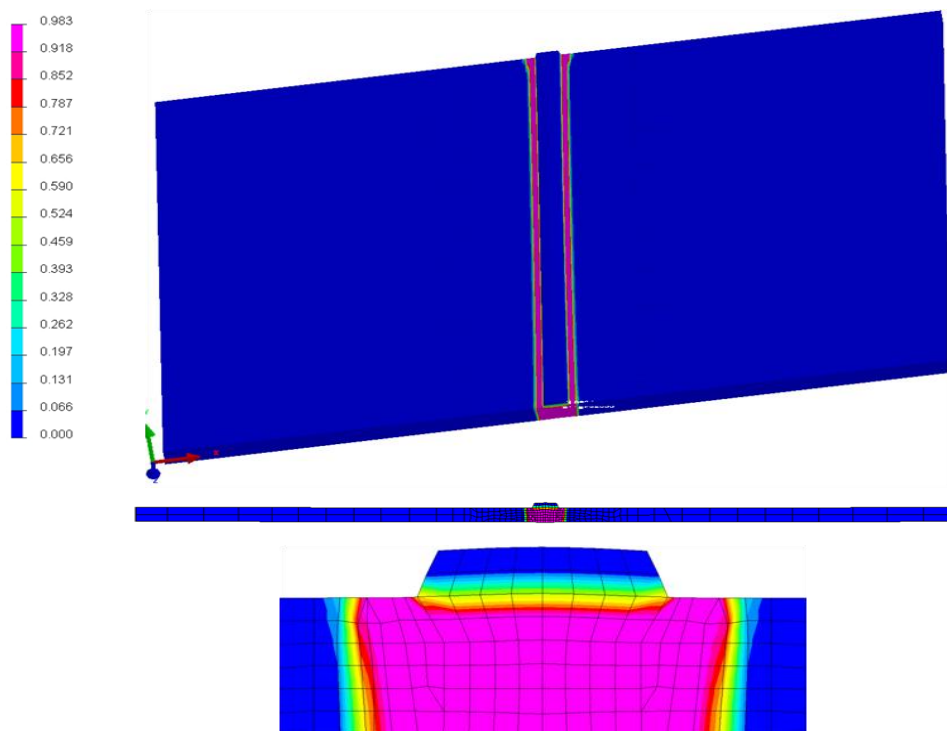
Obr. 8. 17 Rozložení zbytkového redukovaného napětí von Mises

V oblastech, kde existují tahová napětí, která překračují mez kluzu, jsou kritická místa pro vznik trhlin. Maximální hodnota von Mises napětí pro náš model (obrázek 8. 17) je 762 MPa. Pokud by se měla tato hodnota srovnávat s $R_m=800-950$ MPa, tak by se muselo pouze s takovým materiálem, který by byl ochlazován stejným způsobem. Je třeba uvést bod, kde je maximální napětí von Mises. Tento bod se vyskytuje na povrchu ve středu návaru, má bainitickou strukturu a napětí na něm dosahuje 762 MPa. Při porovnání uvedeného bodu s mezí pevnosti pro danou strukturu, je třeba zdůraznit, že mez kluzu primárně zakaleného martenzitu je okolo 1000 MPa a mez pevnosti je okolo 1200 MPa, tažnost martenzitu je jen okolo 5 až 8 %. Martenzit však není popuštěný.



Obr. 8. 18 Kumulativní plastické deformace

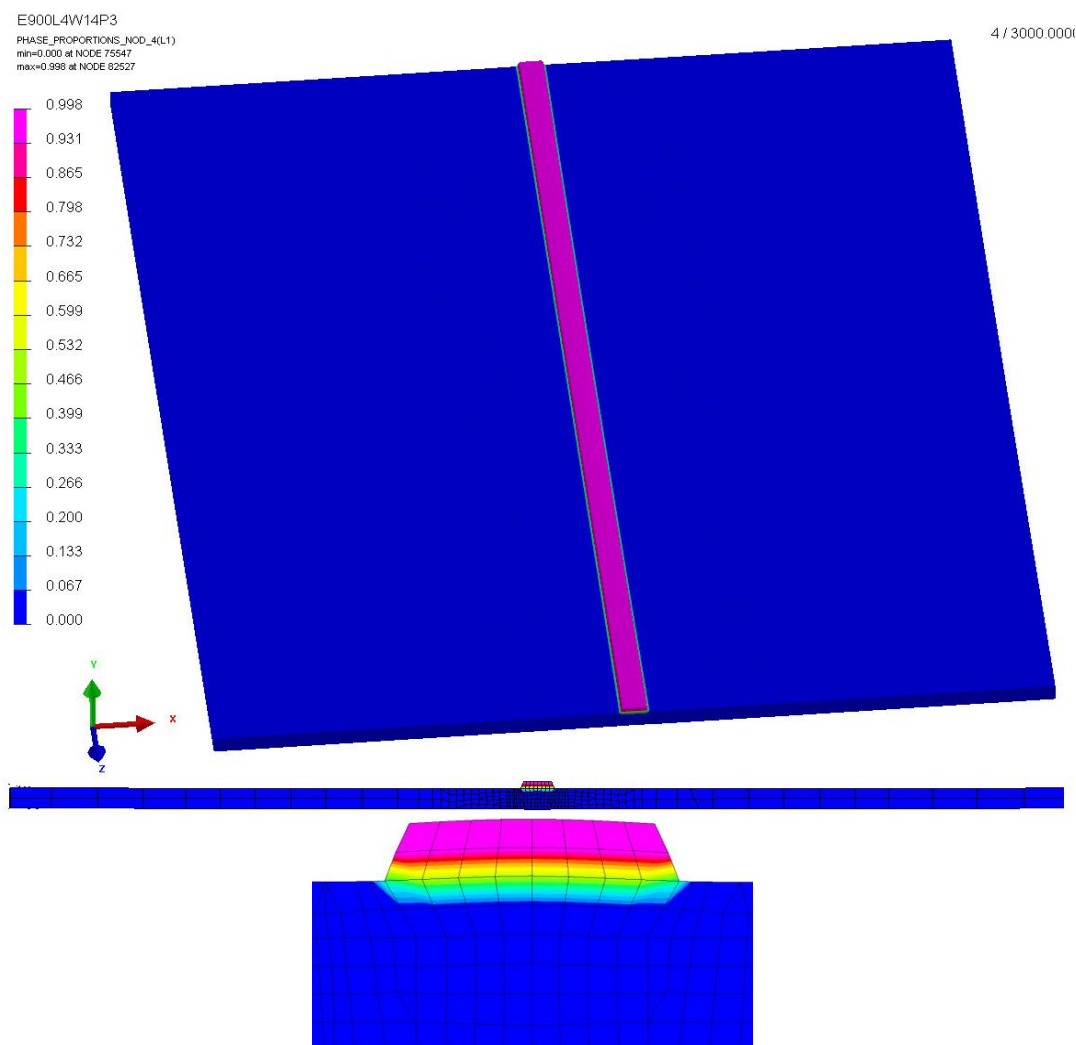
Obrázek 8. 18 zobrazuje celkovou plastickou deformaci v materiálu. Vlevo na stupnici je maximální hodnota označena fialovou barvou, které odpovídá 1,69 % plastické deformace. To znamená, že pokud máme tažnost 14%, tak kumulativní plastická hodnota z ní v nejnepříznivějším případě odebere v daném místě 1,69 % a tažnost klesne na cca 12 %. Kumulativní plastická deformace se uvádí po navaření.



Obr. 8. 19 Rozložení martenzitu po vychladnutí vzorku na pokojovou teplotu

Po navaření a následném ochladnutí vzniklo v přídatném materiálu téměř 100 % bainitu. Přechodová oblast mezi návarem a základním materiálem, vyznačující se barevnými přechody, obsahuje bainiticko – martenzitickou strukturu. Základní materiál je tvořen martenzitickou strukturou, ovšem jen v místech přetavení materiálu. V ZM značí modré zbarvení nezaustenizovanou oblast, fialové odstíny vypovídají o překročení teploty A_{c3} v materiálu – plně zaustenitizováno. Přechod mezi fialovým a modrým zbarvením v ZM kopíruje linii TOO, oblast mezi A_{c1} a A_{c3} .

Na obrázku 8. 20 je vidět, že téměř v celém objemu návaru vznikl bainit, a to v celé délce návaru. Tato struktura je žádoucí, protože není tvrdá jako martenzit a naopak není měkká. Bainit má výbornou pevnost (u uvedeného materiálu je mez kluzu okolo 700 MPa a více, tzn. blízko martenzitu, ale tažnost má výrazně vyšší, tj. 15 %. Bainit je tedy žádoucí struktura, která je dostatečně pevná za současně dostačující houževnatosti. Čím víc se návar blíží k základnímu materiálu, tím procento bainitické struktury klesá a přechází do martenzitu. Je to dáno chemickým složením přídatného materiálu.



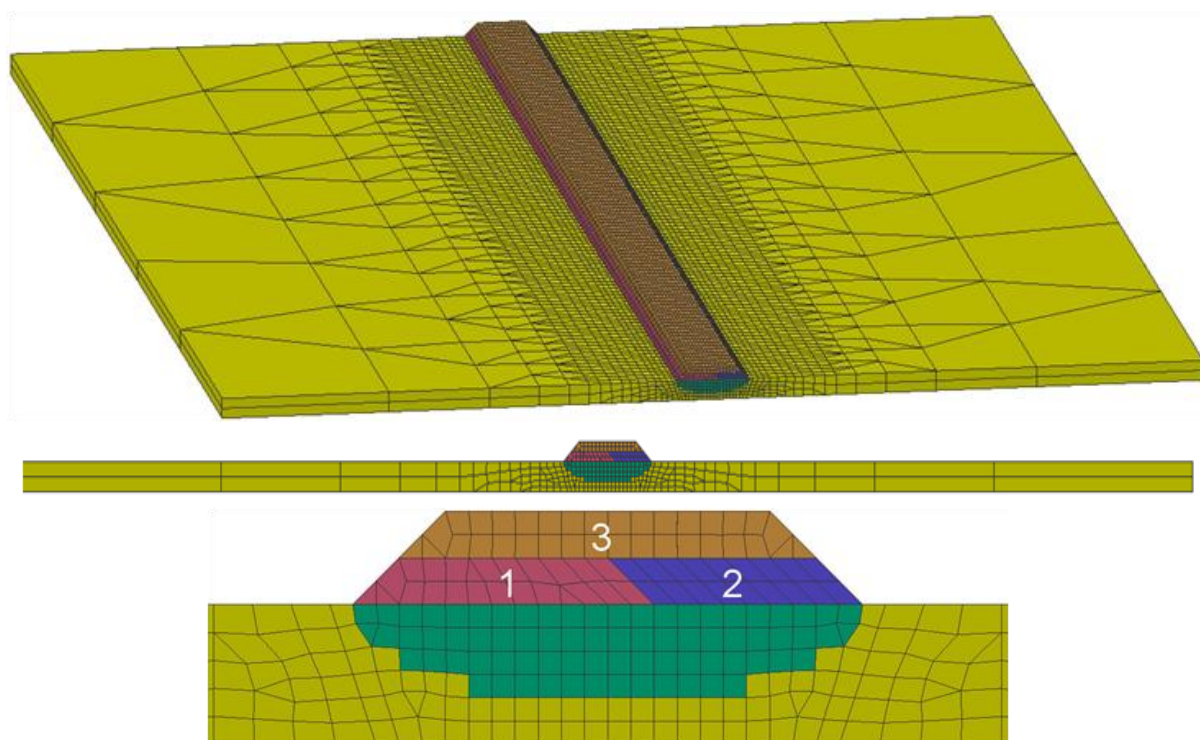
Obr. 8. 20 Rozložení bainitu u jednoho návaru

8.6 Teplotní, mechanická a strukturní analýza u tří housenek

Před samotnou analýzou je dobré vědět, jakým způsobem tepelný zdroj ovlivňoval materiál, tedy jak se také utvářely při modelování jednotlivé housenky. Jedná se tedy o popis zadávání vícevrstvého svařování pomocí aktivace a deaktivace housenek.

Když se svařuje první housenka, tak druhá a třetí je deaktivovaná. To je uděláno takovým způsobem, že v druhé a třetí housence je velmi nízká hodnota tepelné vodivosti a měrného tepla. To znamená, že druhá a třetí housenka neodvádí teplo. Dále v mechanické analýze jsou v deaktivovaných housenkách, tzn. v druhé a třetí housence, je velmi nízká hodnota koeficientu tepelné roztažnosti, a dále hodnota modulu pružnosti je 1. Tato jednička znamená u deaktivovaných housenek téměř nulovou tuhost.

Stejný princip je u svařování druhé housenky, tzn. první a druhá housenka je aktivovaná a třetí housenka je deaktivovaná. Prvky jsou aktivovány v okamžiku, kdy projde prvky tepelný zdroj. Model se třemi housenkami je na obrázku 8. 21.

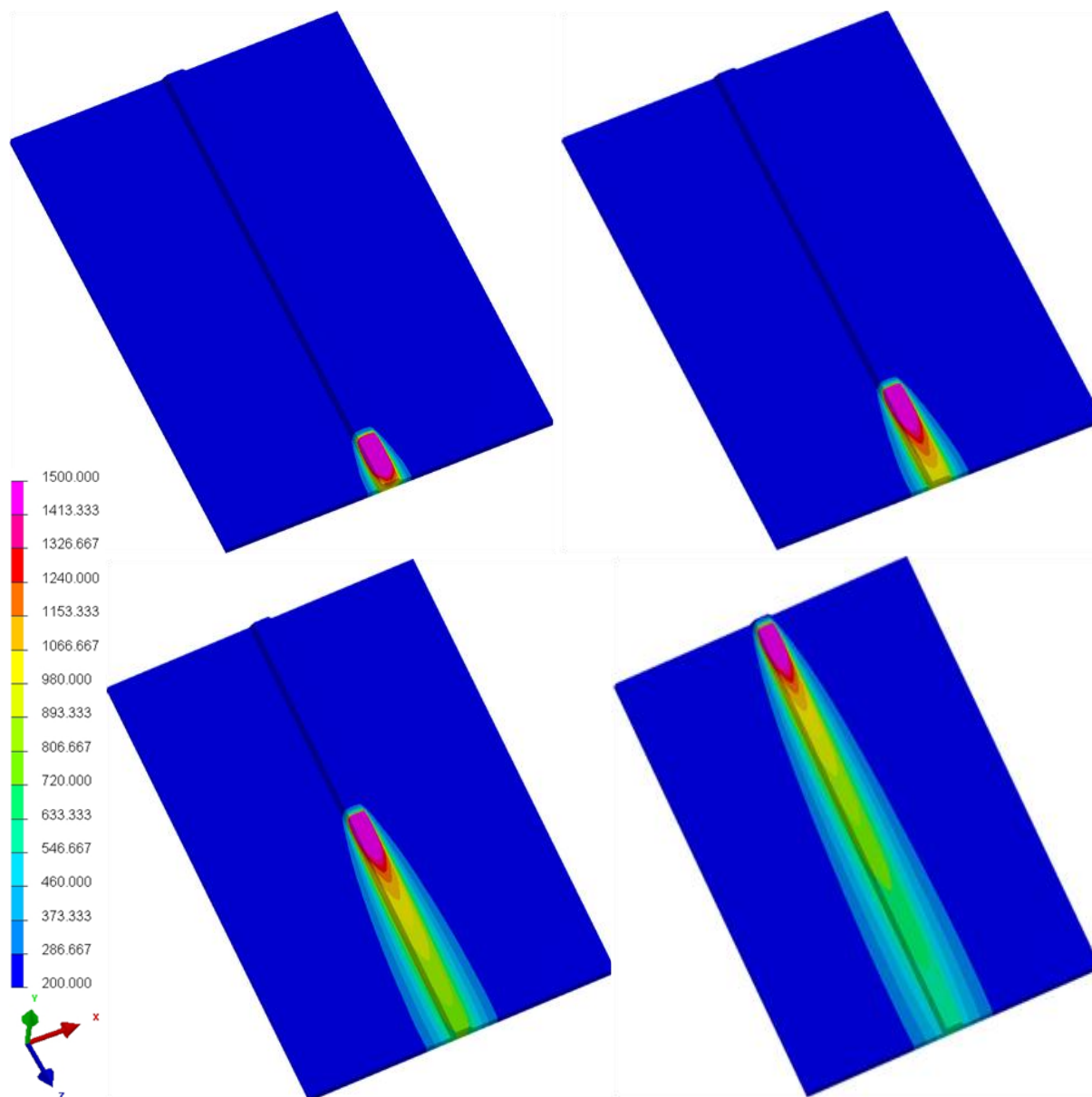


Obr. 8. 21 Model se třemi housenkami a oblastí promísení

Žlutá barva značí základní materiál a zelená oblast promísení. Návary byly kladeny v tomto pořadí: první je červená housenka, druhá je modrá housenka a oranžová je třetí housenka.

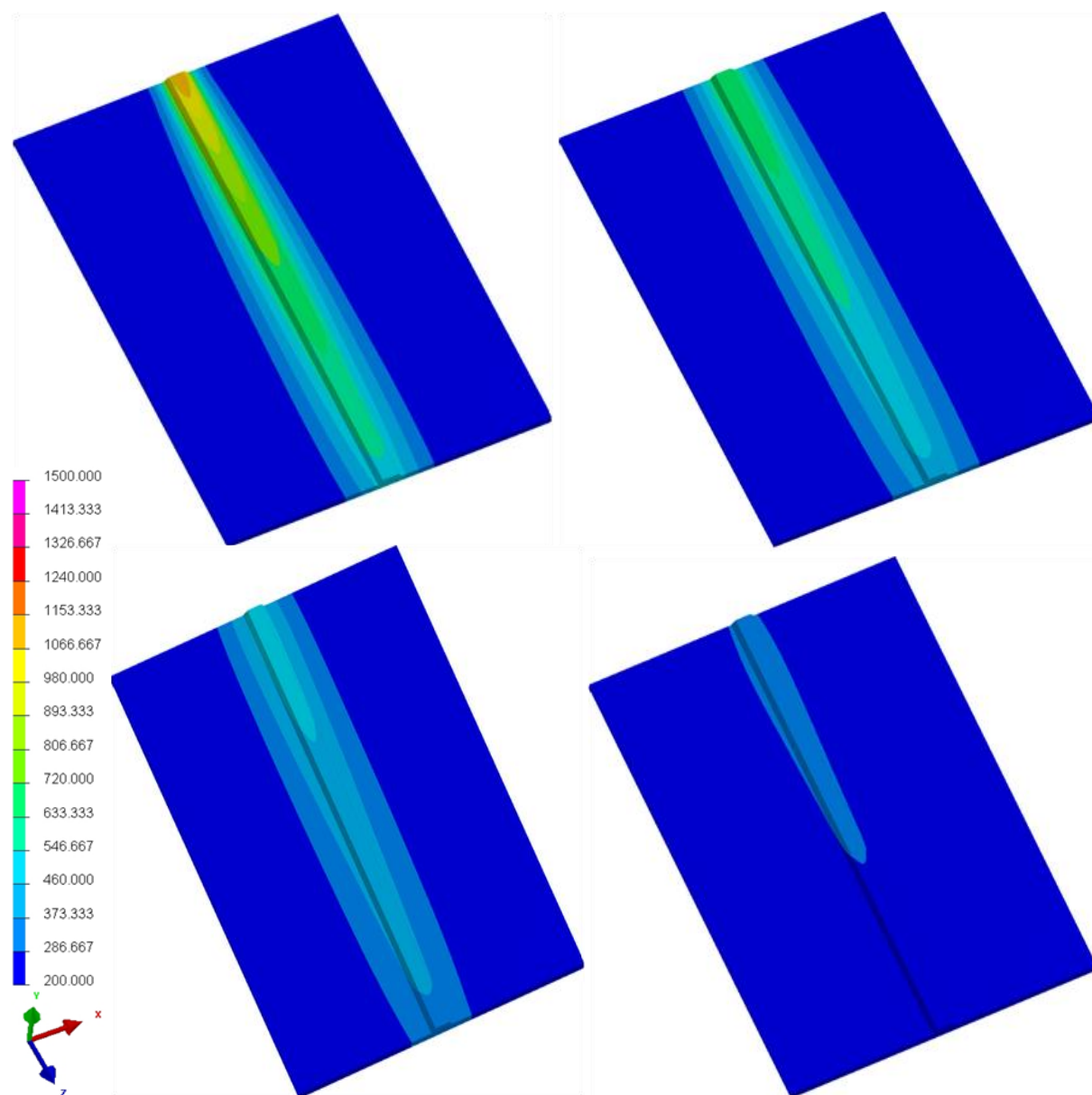
Na modelu s třemi návary byl postup prací identický jako u jednoho návaru. Taktéž byl proveden na skutečném modelu výpočet teplotních polí. Rozdíl byl v použitém tepelném zatížení. U jednoho návaru je $Q = 900 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-1}$, ale u tří housenek je

$Q = 1,26 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$. Je to z toho důvodu, abychom byli schopni protavit celý průřez housenky dle skutečného makrovýbrusu. Tato část simulací se provedla pro určení skutečného teplotního pole při průběhu svařování. Obrázek 8. 22 zobrazuje navařování 3. krycí housenky. Je rozdělen do čtyř částí, dle postupujícího tepelného zdroje v časových úsecích 5, 10 a 25 s od začátku svařování a 2 s před ukončením návaru. Tmavě modrá barva značí $200 \text{ }^{\circ}\text{C}$, což je teplota přehřevu. Fialové zabarvení je tavná lázeň.



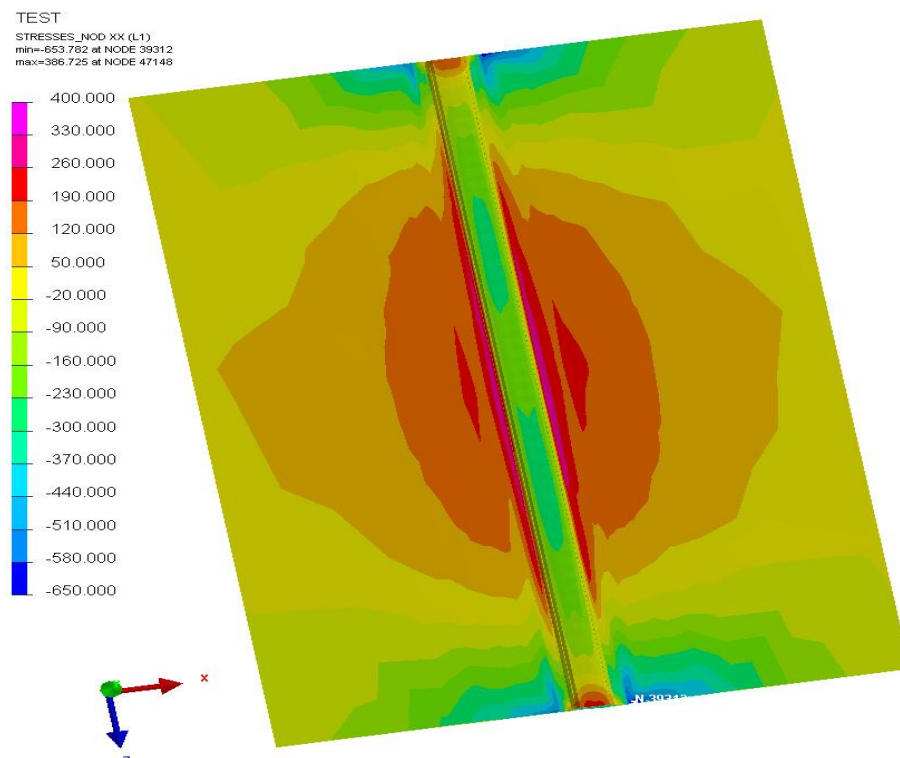
Obr. 8. 22 Vypočtená teplotní pole na modelu s třemi housenkami v čase 5 s, 10 s, 25 s a 48 s od začátku svařování.

Model třech housenek chladnul po dobu 5000 s oproti 3000 s u jedné housenky. To bylo opatření pro to, aby dokázal zchladnout na teplotu okolí a mohli jsme na něm provádět další analýzy. Z obrázku 8. 23 je patrné, že v čase 170 s od ukončení navařování, byla oblast svaru z poloviny ještě temperována na cca 350 °C. V čase 260 s na desce nepřekročila teplota hodnotu přehřevu, tedy 200 °C. Rozložení teplotního pole na modelu lze v tomto okamžiku považovat za vyrovnané.

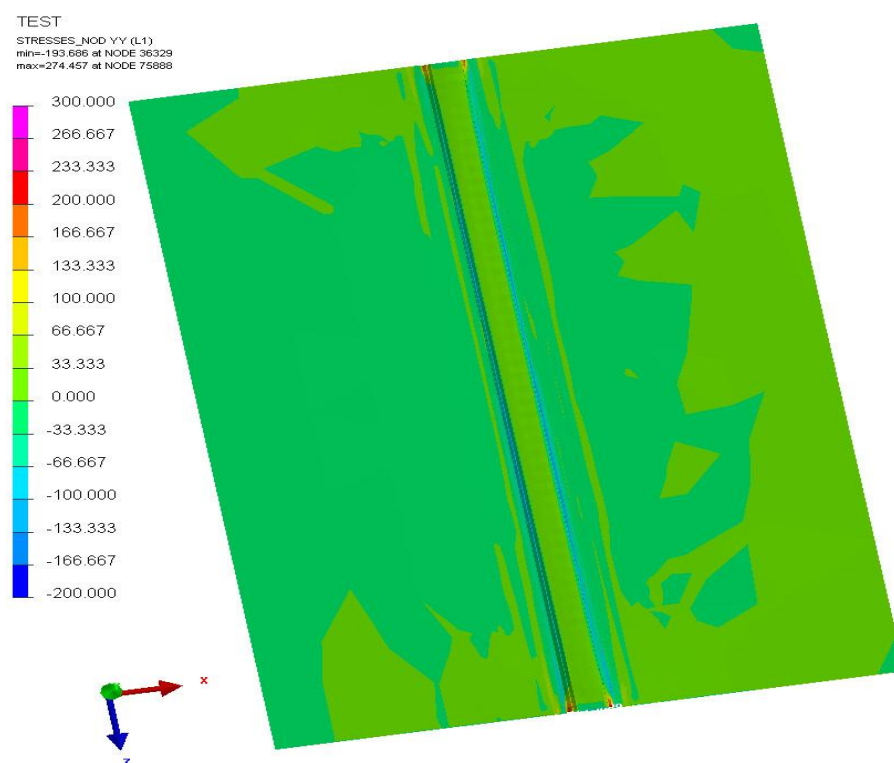


Obr. 8. 23 Chladnutí zkušební vzorku s třemi návary v čase 8 s, 32 s, 74 s, 170 s po ukončení navařování

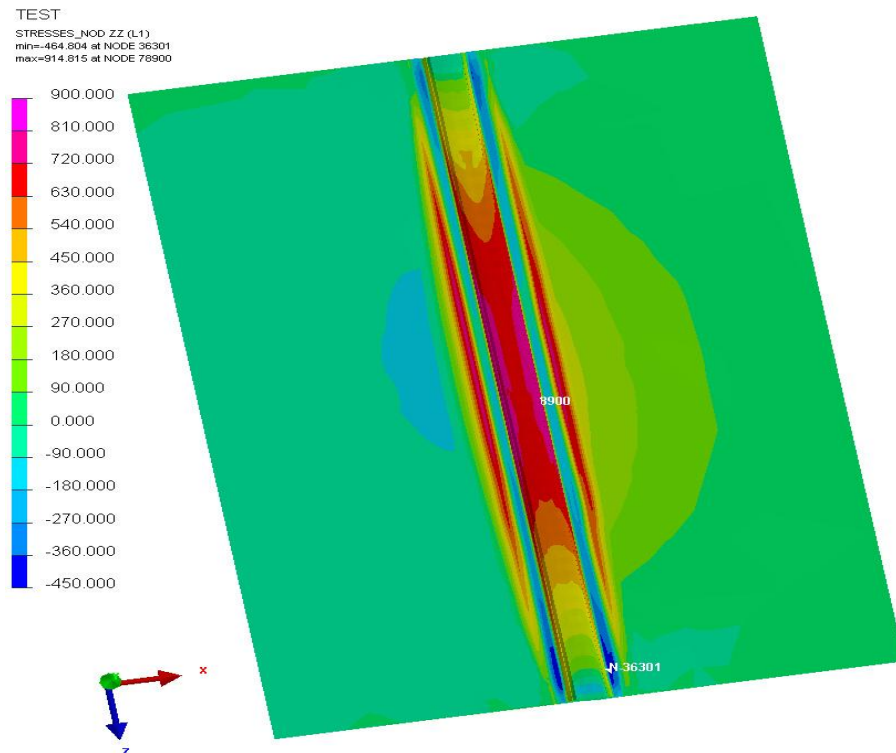
Následovala mechanická analýza, totožným stylem jako u jedné housenky. Na obrázcích 8. 24 až 8. 26 jsou výsledné zbytkové redukované napětí v osách X, Y, Z. Fialové zabarvení na obrázku osy Z, vypovídá o maximálním redukovaném tahovém napětí ve velké části svaru a TOO. Zbytkové napětí v ose X vykazuje na začátku a konci návaru tlakové redukované napětí.



Obr. 8. 24 Výsledné zbytkové redukované napětí na modelu tří housenek v ose X



Obr. 8. 25 Výsledné zbytkové redukované napětí na modelu tří housenek v ose Y

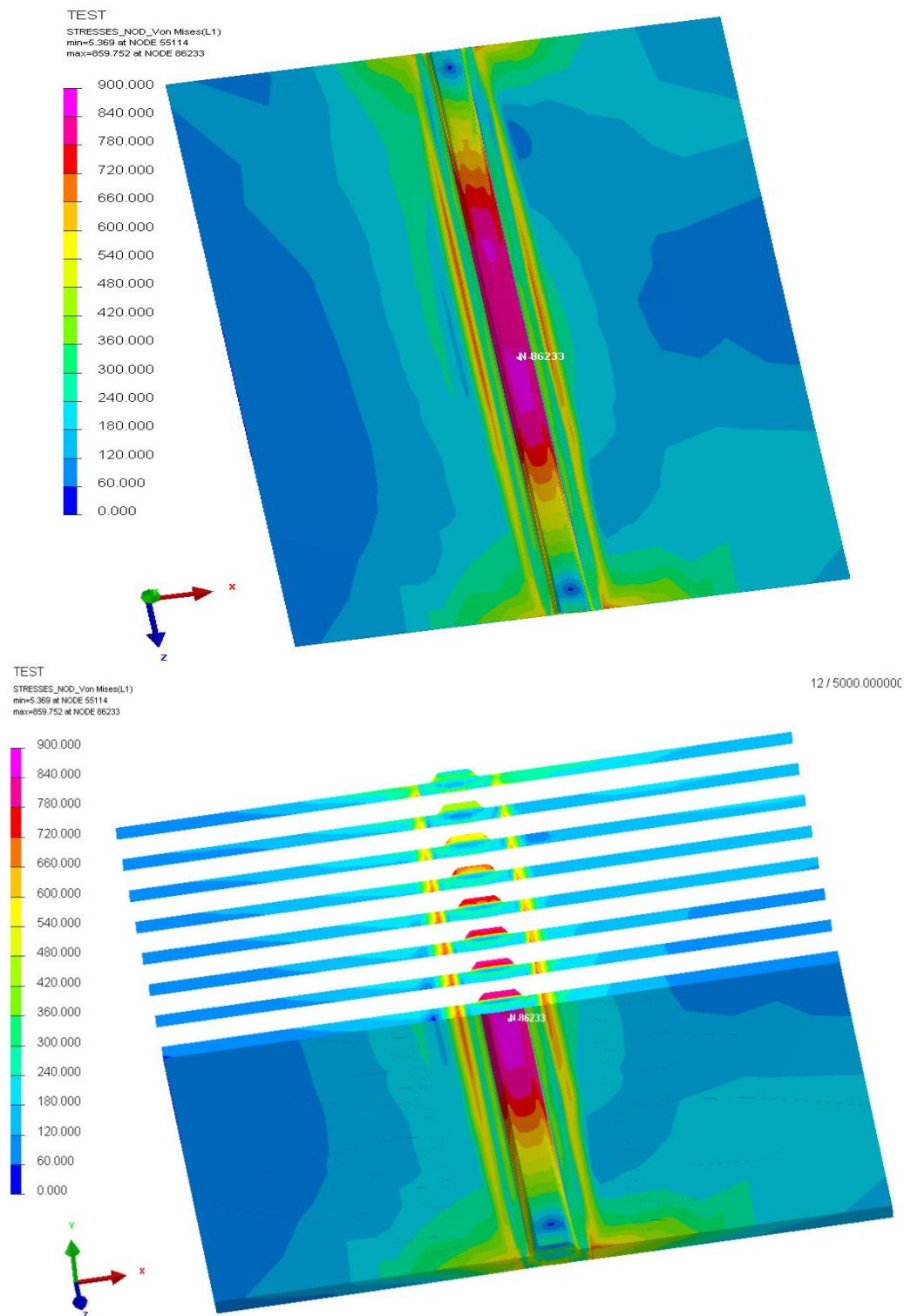


Obr. 8. 26 Výsledné zbytkové redukované napětí na modelu tří housenek v ose Z

Vysoké hodnoty v ose Z jsou způsobeny až trojnásobným přetavením materiálu. Jedná se především o místa v TOO, která prošla plnou austenitizací a v oblasti návaru, kde se vyskytuje bainitická struktura. U jedné housenky maximální zbytkové redukované napětí dosahuje hodnoty 844 MPa, u tří housenek se hodnota pohybuje až kolem 914 MPa. Viz tabulka 8. 6.

Na obrázku 8. 27 jsou patrné oblasti, kde existují tahová napětí, která překračují mez kluzu, tam jsou kritická místa pro vznik trhlin. Maximální hodnota von Mises napětí pro model tří housenek je 859 MPa. Při srovnání s $R_m=800-950$ MPa, se opět musí porovnávat pouze materiál, který byl ochlazován stejným způsobem. Vysoké hodnoty nad 700 MPa se vyskytují v horní části svaru, ale pouze v jeho střední části plus ještě v TOO. Hodnoty napětí von Mises ve svarovém kovu jsou nižší.

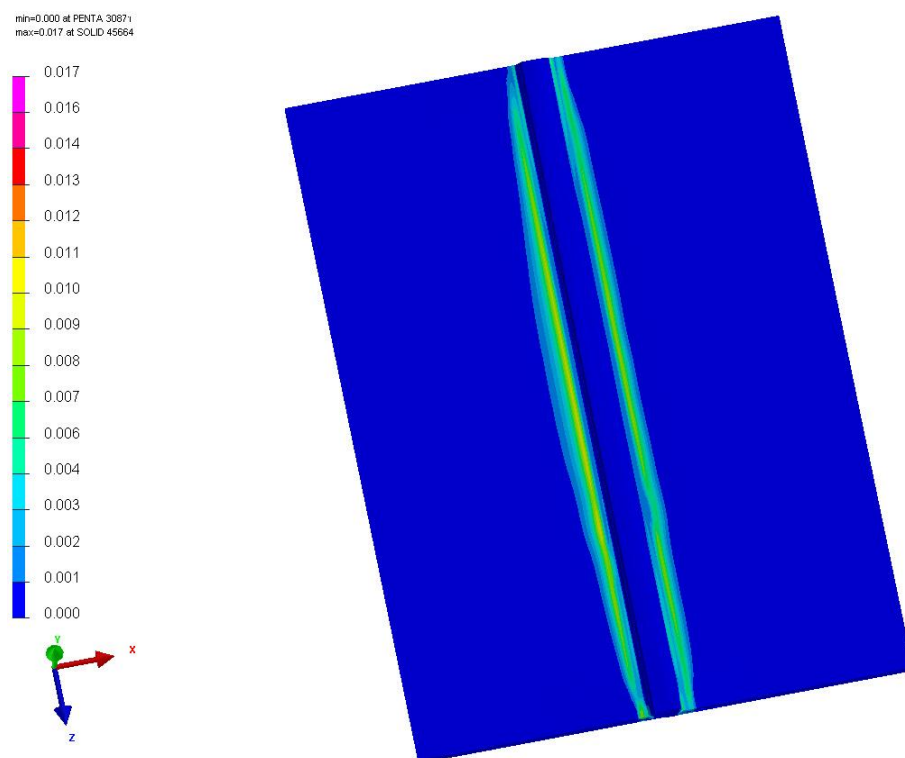
Redukované napětí von Mises (podmínka HMH), obrázek 8. 27, "přepočítává" trojosý stav napjatosti na napjatost jednoosou. Bohužel zde nepoznáme, jestli výsledné napětí je v tlaku nebo v tahu.



Obr. 8. 27 Rozložení zbytkového redukovaného napětí von Mises po navaření krycího návaru

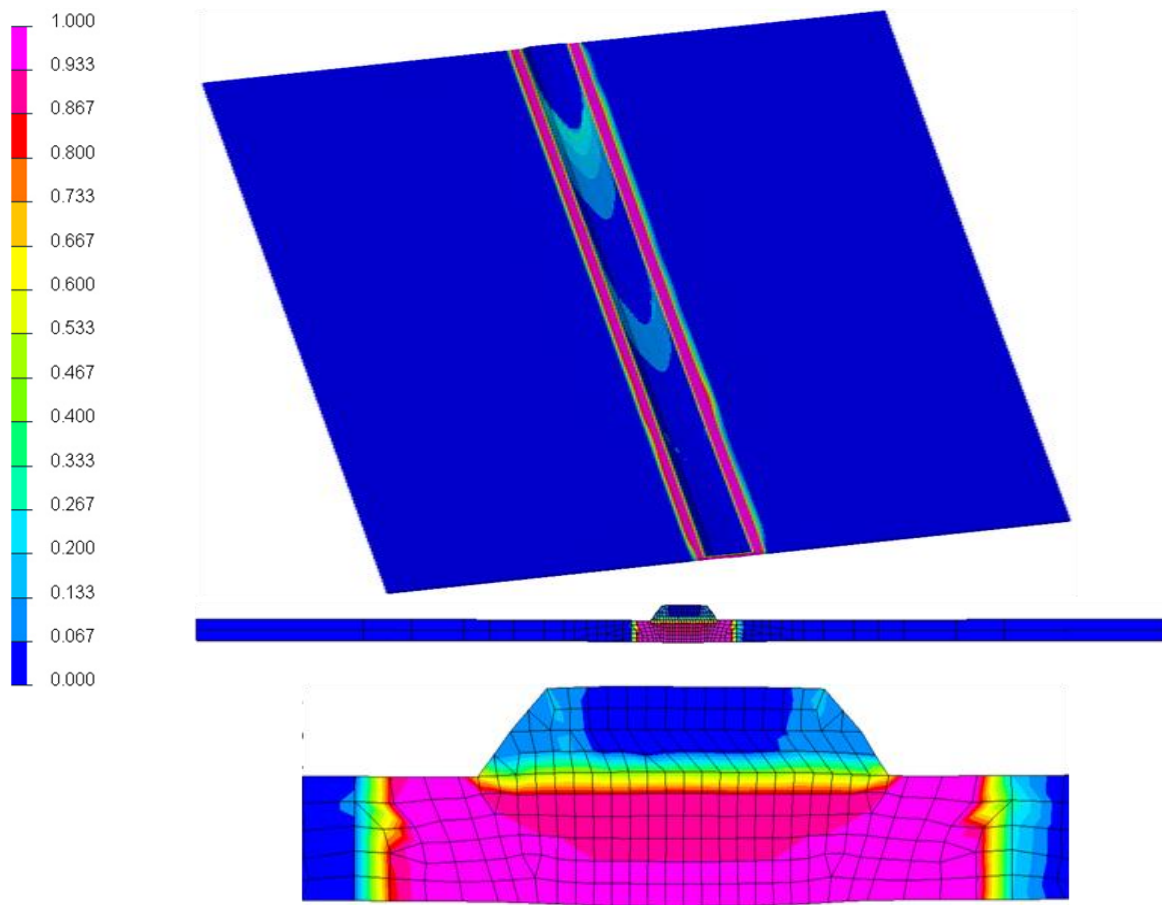
Tab. 8. 6 Rozdíly mezi zbytkovými napětími

Zbytkové redukované napětí v osách [MPa]		osa X	osa Y	osa Z	von Mises
1 housenka	Min	-542	-211	-444	5
	Max	389	217	844	859
	Rozdíl	931	428	1288	864
3 housenky	Min	-663	-193	-464	16
	Max	386	274	914	762
	Rozdíl	1049	467	1378	778



Obr. 8. 28 Kumulativní plastické deformace

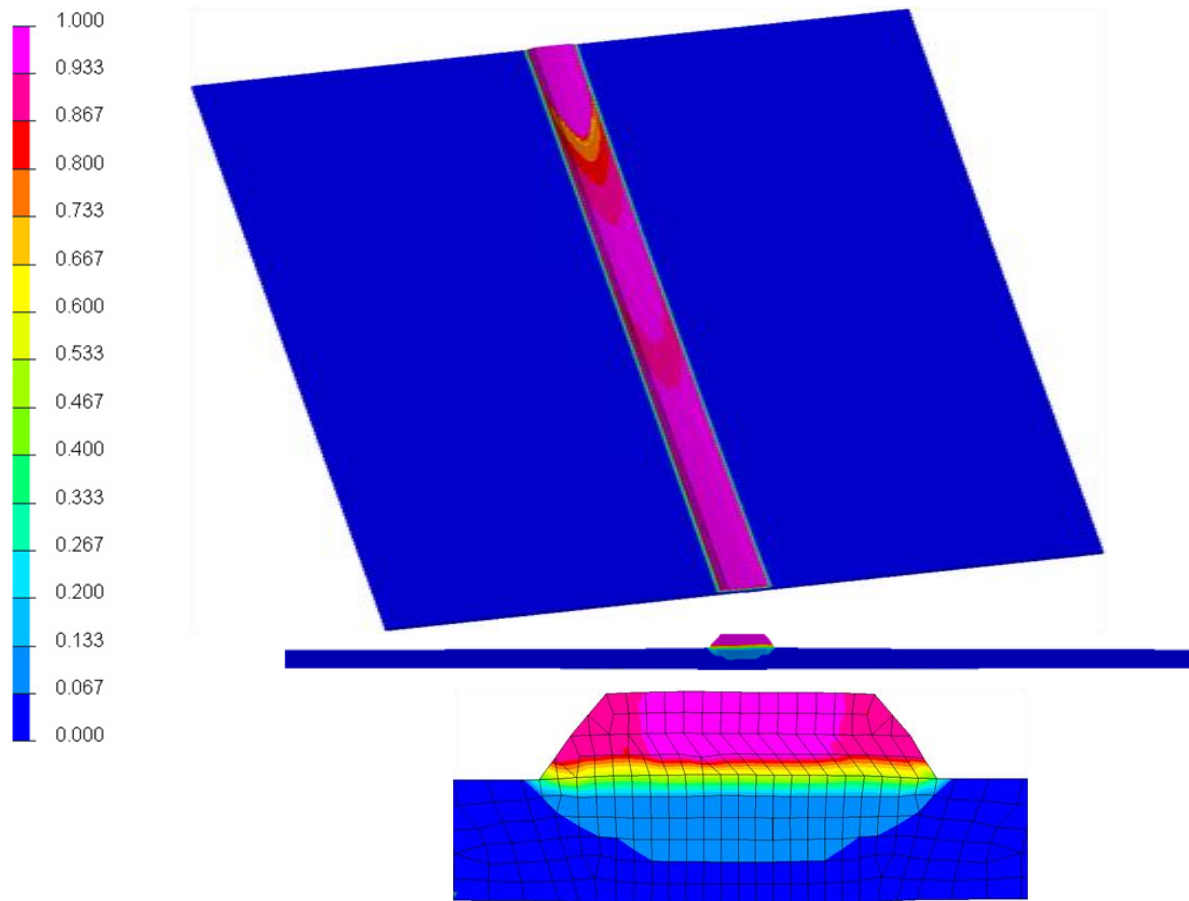
Obrázek 8. 28 zobrazuje celkovou plastickou deformaci v materiálu. Oproti kumulativní plastické deformaci u jednoho návaru nedosahuje zde maximální hodnota takové hodnoty. Zde se maximum pohybuje kolem 1 % plastické deformace. Zde by tažnost klesla na cca 13 %. Tato deformace je uvedena až po procesu navaření. I přesto nám v návaru vznikla trhlinka, která ovšem není z vyčerpání plastici, ale je to studená trhlinka.



Obr. 8. 29 Rozložení martenzitu po vychladnutí vzorku na pokojovou teplotu

Návar obsahuje téměř 100 % bainitu. Přejchod do základního materiálu má strukturu bainiticko – martenzitickou a je označen barevnými mapami. Základní materiál, který prošel přes teplotu A_{c3} vykazuje martenzitickou strukturu označenou fialovou barvou. Tento materiál prošel procesem austenitizace. Přejchod mezi fialovým a modrým zabarvením v základním materiálu kopíruje linii TOO

Na obrázku 8. 30 je vidět, že téměř v celém objemu návaru vznikl bainit, a to v celé délce návaru. Ovšem jeho procento lehce kolísá, což může být ovlivněno předešlými dvěma návary. Je patrné, že se malé procento bainitu vyskytuje i v oblasti závaru. Lze hodnotit, že závar tvoří z 80 % martenzit, zbylých 20 % je bainit. Toto strukturní rozložení je způsobeno popuštěním při navařování krycí housenky. V TOO oblasti se bainit po navaření nevyskytl.



Obr. 8. 30 Rozložení bainitu v návaru

8. 7 ARA diagramy [23]

Pro tvorbu či kontrolu dat v ARA diagramu je nutné znát vstupní data, těmi jsou chemické složení materiálu. Na jejich základě lze vykalkulovat teploty začátku - M_s a konce - M_f přeměny martenzitu, dále teplotu B_s a B_f a také čas bainitického nosu. Sestavení ARA diagramu vychází z experimentálního ARA diagramu na totožné nebo podobné oceli, převážně nalezeného v literatuře. Sestavení vlastního ARA diagramu je možné v programu SYSWELD. Na obrázku 8. 31 je vidět kontinuální ARA diagram základního materiálu pro porovnání s ARA diagramem vytvořeným v SYSWELDu, který je na obrázku 8. 32.

Na obrázku 8. 33 je ARA diagram promíseného materiálu. Jeho tvorba spočívala ve zkombinování ARA diagramů ZM a PM v SYSWELDu a následném posunutí dle rovnic 8. 7 a 8. 8. Potřebné chemické složení pro promísenou oblast vycházelo z vypočítaného promísení 58 % v kapitole 7. 2. V tomto poměru jsme promísili chemické složení základního a přídatného materiálu. Viz tabulka 8. 7. Z těchto dat už nebyl problém v SYSWELDu sestavit ARA diagram pro promísenou oblast.

Tab. 8. 7 Chemické složení promísené oblasti

Chemický prvek	C	Mo	Cr	Ni	Mn	Si
Chemické složení ZM	0,22	0,85	11,5	0,65	0,65	0,22
Chemické složení PM	0,05	0,4	0,6	2,5	1,4	0,2
Chemické složení promísení	0,16	0,73	7,02	1,83	1,19	0,24

Pro svářeče je sestrojován tzv. speciální svářečský ARA diagram. V něm je rychlost ochlazování konstantní, což velice usnadňuje práci. Je v něm totiž na vodorovné ose uveden čas $t_{8/5}$, což je rychlost ochlazování mezi hodnotami 800 °C a 500 °C

Teplota M_S :

$$M_S = 539 - 423 \cdot C - 30,4 \cdot Mn - 17,7 \cdot Ni - 12,1 \cdot Cr - 7,5 \cdot Mo \quad (8. 7)$$

$$M_S = 539 - 423 \cdot 0,23 - 30,4 \cdot 0,56 - 17,7 \cdot 0,47 - 12,1 \cdot 11,78 - 7,5 \cdot 0,91$$

$$M_S = 267 \text{ °C}$$

Teplota M_f :

$$M_f = 346 - 474 \cdot C - 33 \cdot Mn - 17 \cdot Ni - 21 \cdot Mo - 17 \cdot Cr \quad (8. 8)$$

$$M_f = 346 - 474 \cdot 0,23 - 33 \cdot 0,56 - 17 \cdot 0,47 - 21 \cdot 0,91 - 17 \cdot 11,78$$

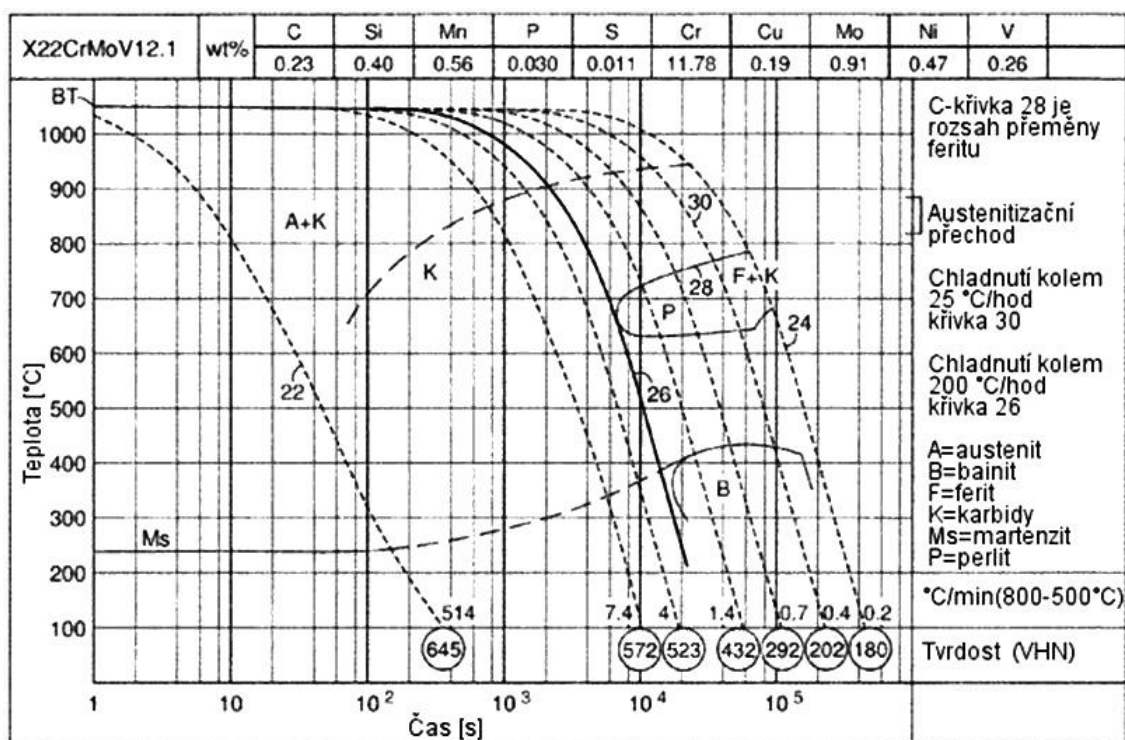
$$M_f = -9 \text{ °C}$$

Počátek bainitické přeměny B_S : (8. 9)

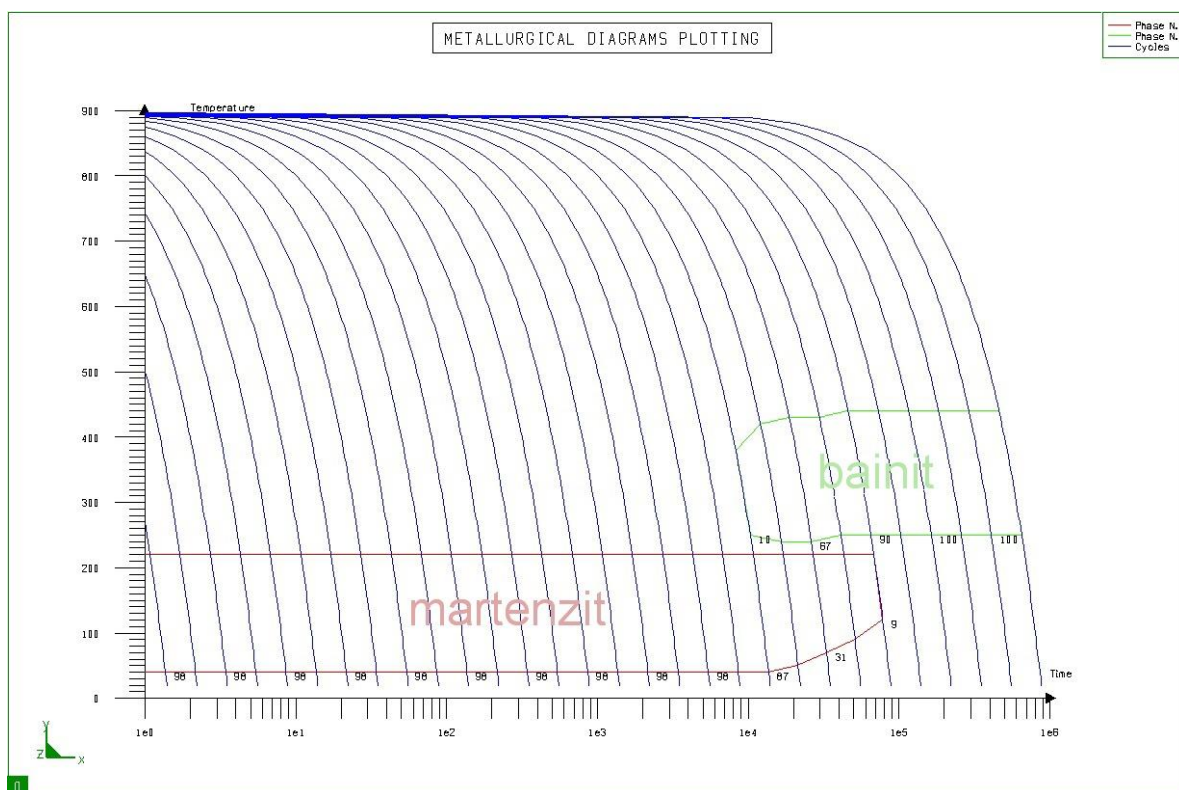
$$B_S = -4,979 + 18,77 \cdot C + 2,343 \cdot Mn + 4,251 \cdot Si$$

$$B_S = -4,979 + 18,77 \cdot 0,23 + 2,343 \cdot 0,56 + 4,251 \cdot 0,22$$

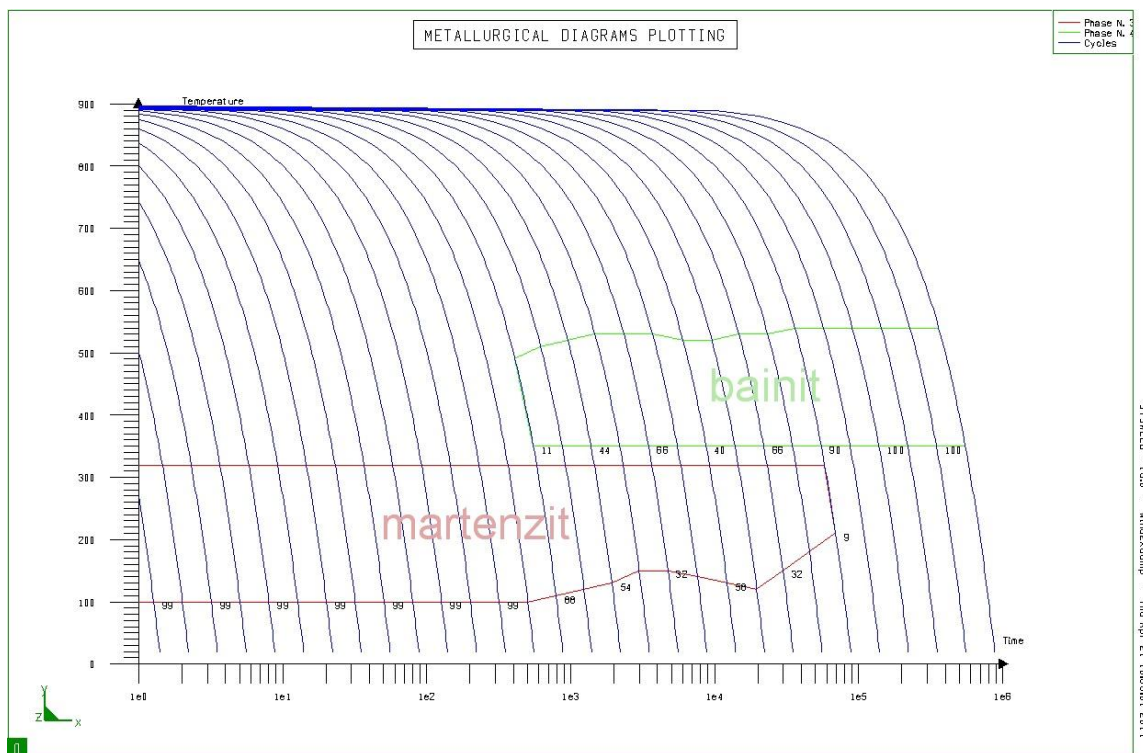
$$B_S = 1,61$$



Obr. 8. 31 Kontinuální ARA diagram oceli X22CrMoV 12-1



Obr. 8. 32 ARA diagram oceli X22CrMoV 12-1 vytvořený v programu SYSWELD



Obr. 8. 33 ARA diagram promíšené oblasti u jedné housenky vytvořený v programu SYSWELD

8.8 Teplotně metalurgická analýza [18], [24]

Znalost tepelné a metalurgické historie by měla být dostatečná pro predikci tvrdosti ve všech místech tepelně ovlivněné oblasti. Obě analýzy v simulaci probíhají současně. Je to dáno tím, že strukturní část čerpá data z rozložení teplotních polí a rychlosti ohřevu a chlazení.

Ve skutečnosti, tvrdost v každém bodě v daném materiálu závisí na:

- chemické složení materiálu
- struktura na konci tepelného zpracování
- rychlost ochlazování
- velikost zrna

Tvrdost na určeném místě se stanovuje z tvrdosti struktury v dané oblasti (martenzit, bainit, ferit, kalené struktury), chemickém složení a rychlosti ochlazování. Záleží tu na znalosti základních tvrdostí struktur a samozřejmě na jejich vzájemném podílu. Výpočet tvrdosti se provádí na základě empirických vztahů. Z výsledků tvrdosti v jednotkách Vickerse HV se dá dalšími empirickými výpočty dosáhnout na hodnoty meze pevnosti R_m a meze kluzu R_e daného materiálu.

Pro kontrolu tvrdosti v ARA diagramu, obrázek 8. 8, jsme použili rovnice 8. 6 a 8. 7. Rovnice kdysi vznikly na základě velkého množství měření, jsou tedy empirické. Avšak tyto rovnice mají jistá omezení. U zkoumané ocele se to týká důležitého chromu a dále vanadu. Povolené hodnoty jsou u Cr $\leq 3 \%$ a u V $\leq 0,2 \%$. Ocel X22CrMoV 12-1 obsahuje 11,5 % Cr a 0,3 % V. I přesto rovnice 8. 6 a 8. 7 pro ilustraci použijeme. Jiné rovnice pro výpočet tvrdosti v literatuře nebyly nalezeny. Po dosazení chemických prvků do těchto rovnic, vzešly výsledky pro danou strukturu a rychlost ochlazování, které jsou v tabulce 8. 6 Vypovídací hodnota vypočtené tvrdosti martenzitu v porovnání s ARA diagramem, je do jisté míry dobrá. To už se nedá říci o bainitu, tyto hodnoty se diametrálně odlišují. Po navaření přídavného materiálu na základní kov je rychlost ochlazování tak velká, že se do bainitu v ARA diagramu ani nedostaneme. Pro bainit a perlit rovnice nesedí, ale to nám v tomto případě nevadí.

$$HV_{\text{martensit}} = 127 + 949 \cdot C + 27 \cdot Si + 11 \cdot Mn + 8 \cdot Ni + 16 \cdot Cr + 21 \cdot \log v_r \quad (8. 10)$$

$$HV_{\text{bainit}} = - 323 + 185 \cdot C + 330 \cdot Si + 153 \cdot Mn + 65 \cdot Ni + 144 \cdot Cr + 191 \cdot Mo + \log_{10} v_r (89 + 53 \cdot C - 55 \cdot Si - 22 \cdot Mn - 10 \cdot Ni - 20 \cdot Cr - 33 \cdot Mo) \quad (8. 11)$$

$$HV_{\text{ferit}} = 42 + 223 \cdot C + 53 \cdot Si + 30 \cdot Mn + 12,6 \cdot Ni + 7 \cdot Cr + 1 \cdot Mo + \log_{10} v_r (10 - 19 \cdot Si + 4 \cdot Ni + 8 \cdot Cr + 130 \cdot V) \quad (8. 12)$$

v_r - rychlost ochlazování [$^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$]

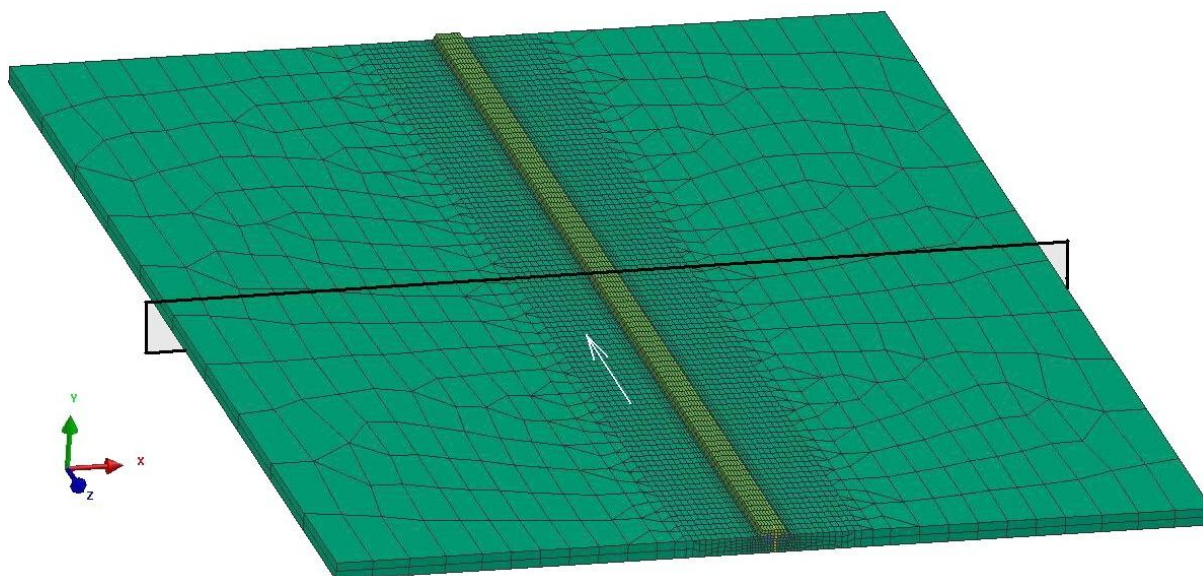
Tab. 8. 8 Porovnání tvrdosti z ARA diagramu a vypočtené tvrdosti

Struktura	Martenzit	Martenzit	Martenzit	Bainit	Bainit	Bainit	Perlit/ferit
Tvrdost HV v ARA diagramu	645	572	523	432	292	202	180
Tvrdost HV vypočtená	637	598	592	1413	1473	1520	367
Ochlazování [$^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$]	514	7,4	4	1,4	0,7	0,4	0,2

Program SYSWELD také pracuje s výše uvedenými rovnicemi pro výpočet tvrdosti. V referenčním manuálu se udává, že vzorce pro výpočet tvrdosti dávají rozptyl pro standardní odchylku asi 10 HV.

Z výsledků v tabulce 8. 8 lze vyvodit hodnocení pro použití vzorců 8. 10, 8. 11, 8. 12. Pro výpočet tvrdosti martenzitu můžeme použít vzorec 8. 10 jako orientační ověření. Použít vzorce 8. 11 a 8. 12 pro výpočet tvrdosti bainitu a feritu absolutně nelze.

Software SYSWELD samozřejmě zvládá i výpočet tvrdosti. Proto byl využit pro další porovnání tvrdosti s hodnotami z ARA diagramu. Výpočet se provedl v polovině desky v řezu rovinou XY, jak je vidět na obrázku 8. 34. Na následujícím obrázku 8. 35 je již vidět žlutě podbarvená linie, na které se počítala tvrdost. Program SYSWELD počítá tvrdost vždy přes 2 uzly. To znamená, že v přídavném materiálu počítal v lichoběžnících označených 1 a 2, v promísené zóně přes prvky 1, 2, 3 a v základním materiálu přes prvky 1, 2 a 3. Výsledky měření jsou v tabulce 8. 9.



Obr. 8. 34 Umístění řezu pro měření tvrdosti v modelu



Obr. 8. 35 Linie měření tvrdosti

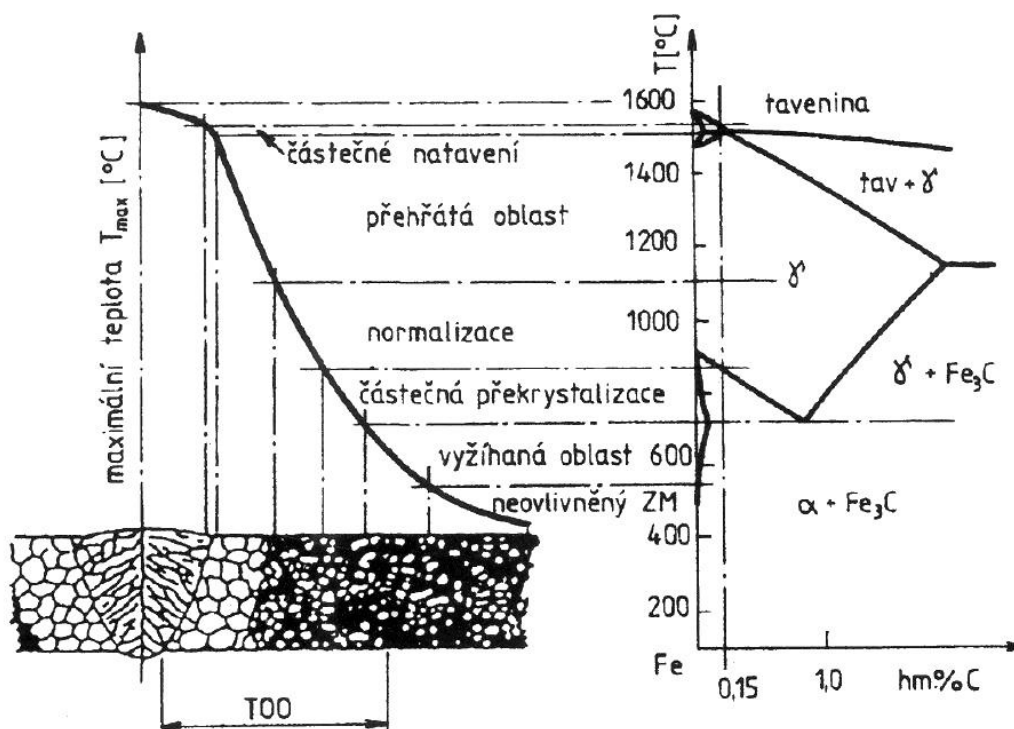
Tab. 8. 9 Hodnoty tvrdosti vypočtené v simulačním programu SYSWELD

	$t_{8/5}$ [s]	Rychlost ochlazování [°C·min ⁻¹]	Vypočítaná tvrdost [HV]	Struktura
Přídavný materiál	26	692	325	bainit
Promísení	26	692	479	bainit/martenzit
Základní materiál	26	692	655	martenzit

Může se konstatovat, že výsledky ze SYSWELDU jsou korektní. Tvrdosti byly počítány pro konkrétní rychlost ochlazování a každý materiál má svoje konkrétní chemické složení danou pro konkrétní oblast v modelu. Referenční manuál pro tento software udává, že vypočítané hodnoty mají rozptyl pro standardní odchylku kolem 10 HV.

Teplotně-metalurgická analýza dále poskytuje možnost predikce velikosti austenitického zrna. Je to z toho důvodu, že hrubší zrna vykazuje vysokou pevnost a nízké hodnoty houževnatosti. V průběhu chladnutí svarového kovu a teplotně ovlivněné oblasti (v místech, kde došlo částečným přeměnám, nad teplotou A_{c1}) se mění velikost zrna. „V pásmu přehřátí a ve svarovém kovu, kde došlo k roztavení kovu nebo byly tyto oblasti vystaveny po krátkou dobu teplotám nad 1100°C a ochlazení bylo velmi rychlé, dochází k velkému zhrubnutí zrna.“ [18]

Obrázek 8. 36 slouží k odlišení zón v TOO. Ve svarovém kovu je patrný růst dendritů kolmo k maximálnímu odvodu tepla. V přehřáté zóně nad 1200 °C dochází k největšímu zhrubnutí zrna. V oblasti normalizace, v austenitu, se austenitické zrna zjemňuje. Oblast vyžhání je mezi teplotami A_{c1} a A_{c3} nemusí zde dojít k plné austenitizaci.

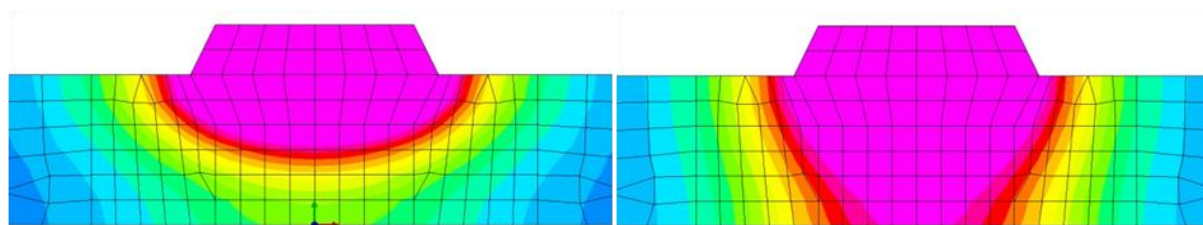


Obr. 8. 36 Vliv svařování na zhrubnutí zrna v TOO a růst dendritů ve svarovém kovu

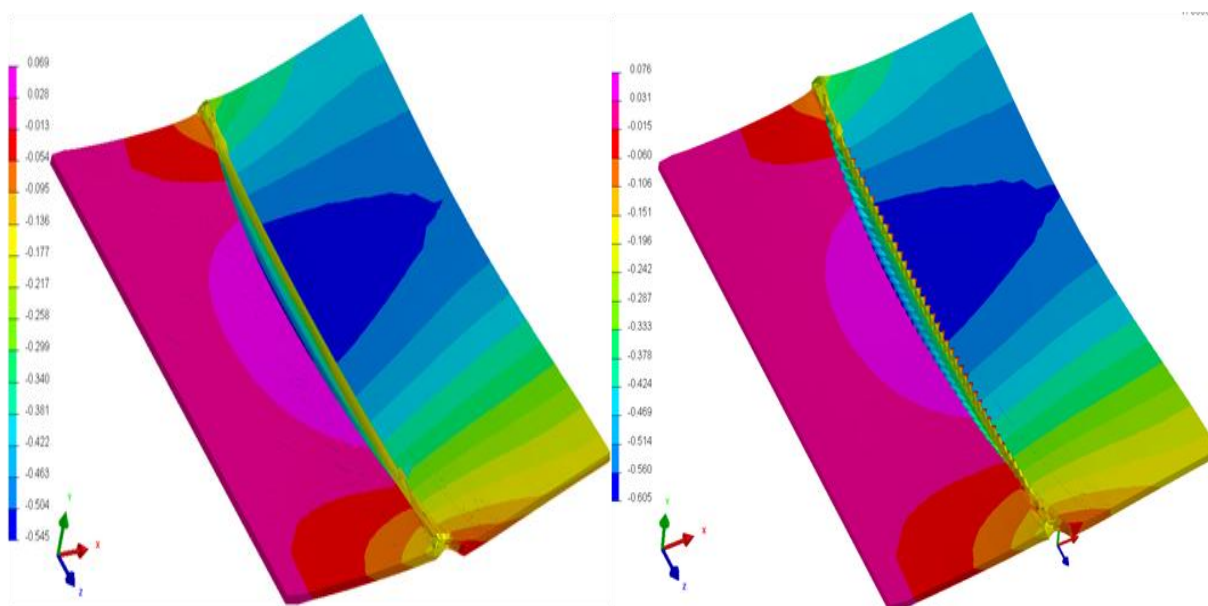
9 INTERPRETACE VÝSLEDKŮ MECHANICKÉ ANALÝZY [23]

9.1. Vliv tepelného zdroje na deformace

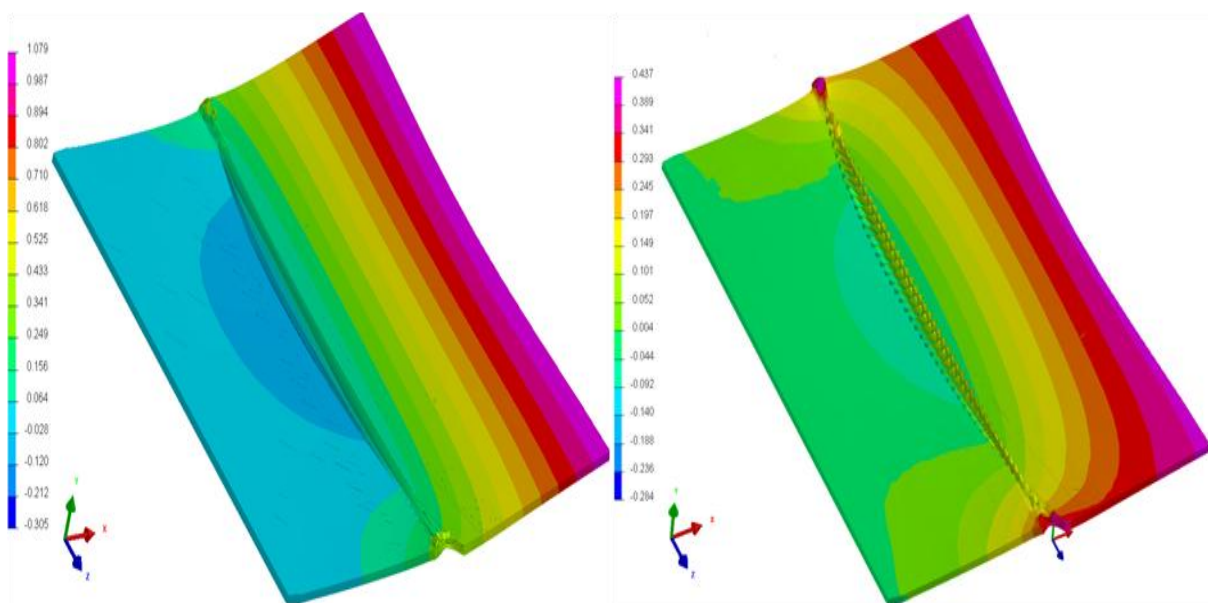
Prezentované modely jsou 50x zvětšeny, aby vypovídací hodnota deformovaných kusů byla co největší. V oblasti svaru jsou vidět obrovské deformace, které nejsou ovšem reálné. Je to dáno měřítkem zvětšení. Ve svaru jsou velké deformace, které jsou 50x zvětšeny, protože jinak bychom neviděli malé deformace na krajích desek. V levé části se jedná o modely s nejméně protavenou oblastí, v prvním dílu obrázky s nejvíce protaveným modelem. Pro ilustraci jsou zde přiloženy obrázky 9. 1.



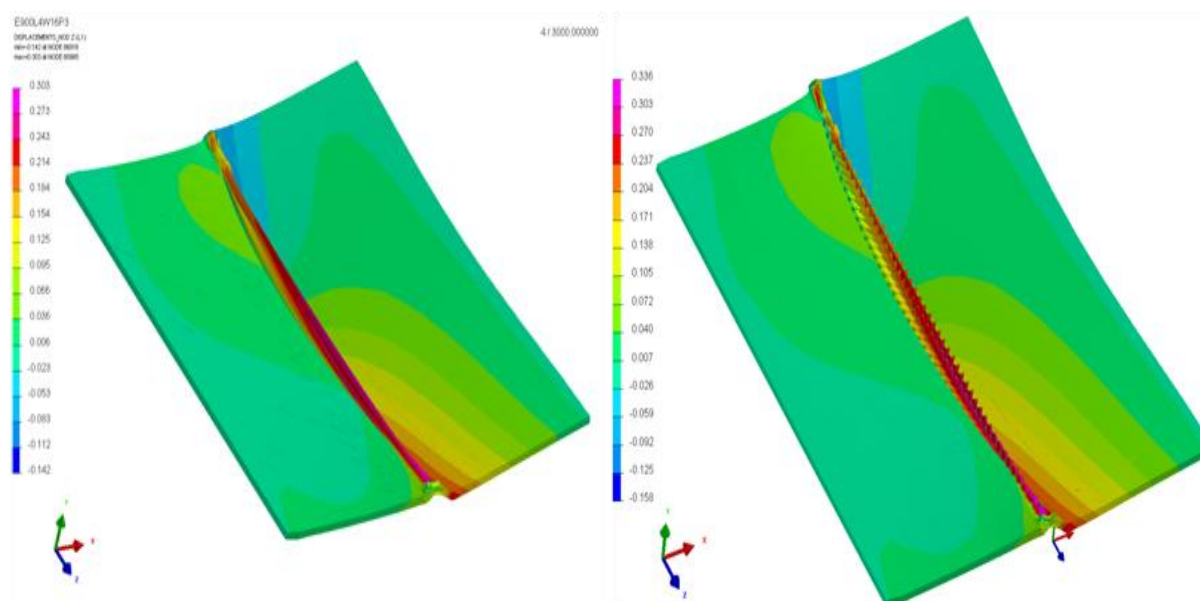
Obr. 9. 1 Teplotní pole. Vlevo je model nejméně protavený, tj. model č. 2, vpravo je nejvíce protavený model č. 10



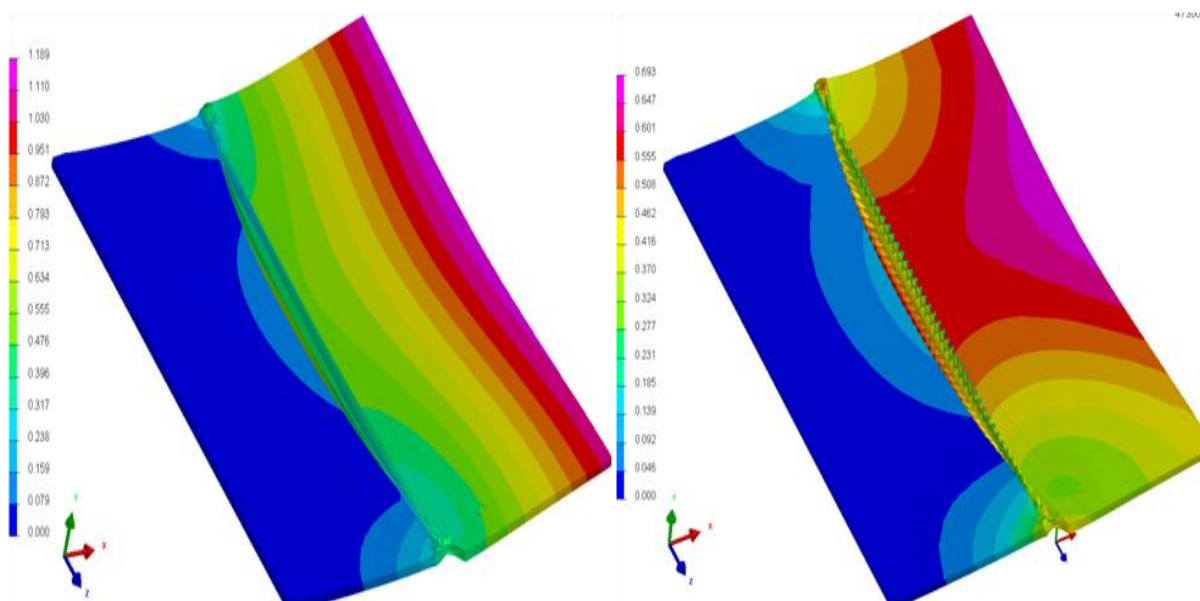
Obr. 9. 2 Deformace v ose X u modelu č. 3Z a č. 10Z



Obr. 9. 3 Deformace v ose Y u modelu č. 3Z a č. 10Z



9. 4 Deformace v ose Z u modelu č. 3Z a č. 10Z



Obr. 9. 5 Deformace magnitude $\{(U_x^2+U_y^2+U_z^2)^{1/2}$ [mm] $\}$, u modelu č. 3Z a č. 10Z

Názorná tabulka 9. 1 poukazuje na viditelný rozdíl deformací, výhradně na vlivu tepelného zdroje (protavené oblasti) u nejméně a nejvíce tepelně ovlivněných desek. Je patrné, že i relativně nepatrné rozdíly v osových posuvech mohou po přepočtu na procenta dosahovat značných hodnot. Značný rozdíl v celkovém posuvu, téměř 50 %, vykazuje osa Y.

Zde vidíme, jak je důležité korektní namodelování tepelného zdroje, jak má velký vliv na rozdíl ve výsledcích, např. zde distorze.

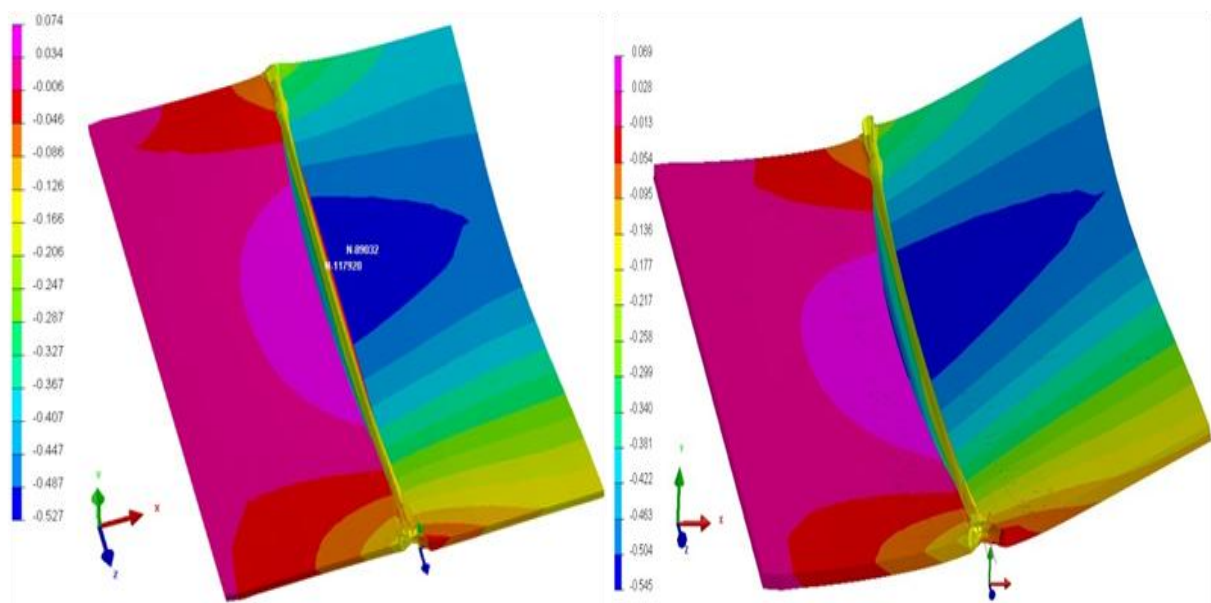
Tab. 9. 1 Vliv tepelného zdroje na deformace

Číslo modelu	Okrajové podmínky	Poznámka	Ux [mm] celkové	Uy [mm] celkové	Uz [mm] celkové	U $(x^2+y^2+z^2)^{1/2}$ [mm] celkové
3	typ A, typ B	nejméně protaveno	0,614	1,384	0,445	1,189
10	typ A, typ B	nejvíce protaveno	0,681	0,721	0,494	0,693
Jednotkový rozdíl posuvů [mm]			0,067	(-)0,663	0,049	(-)0,491
Procentuální rozdíl posuvů [%]			9,8	(-)47,9	9,9	(-)21,8

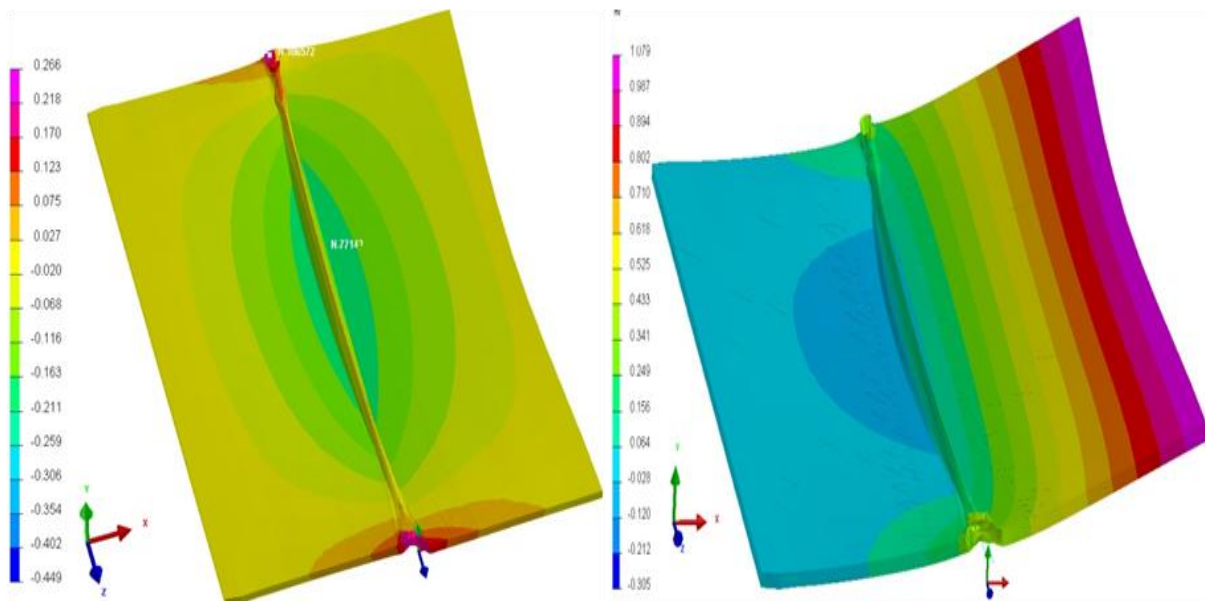
9. 2 Vliv okrajových podmínek na deformace – nejméně protavený model

Na obrázcích 9. 6 až 9. 9 je demonstrován vliv okrajových podmínek. Jedná se o model s nejmenším protavením, model č. 3. U tohoto modelu je největší teplotní gradient. To znamená, že na jedné straně desky je materiál úplně nataven, na druhé zůstává v tuhém stavu. U tohoto vzorku předpokládáme největší deformace.

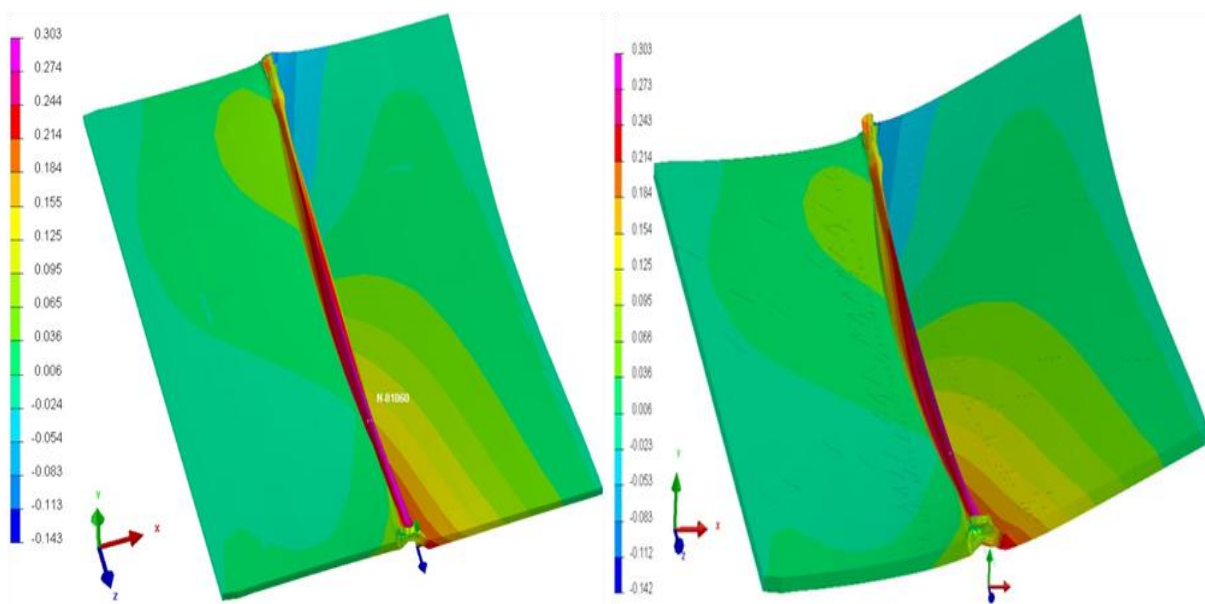
Pod tímto textem vlevo jsou modely s ukotvením typu A na jedné straně desky a typu B na druhé straně desky. Vpravo na stránce je použit na jedné straně desky typ A a na druhé typ C. V tomto případě se deska může více deformovat.



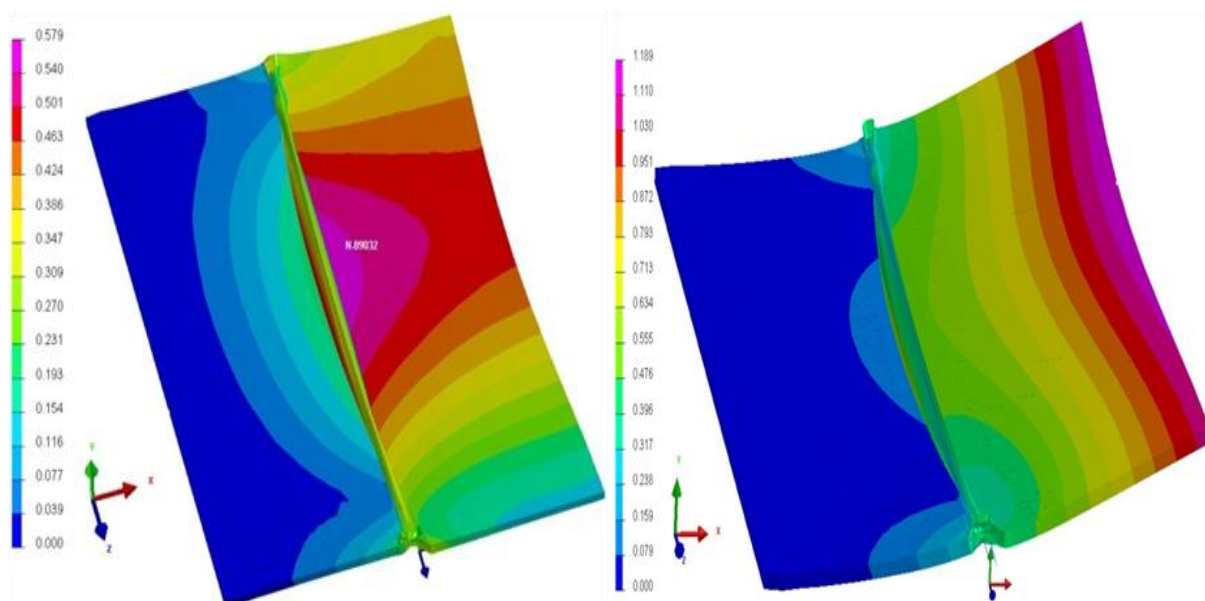
Obr. 9. 6 Deformace v ose X u model č. 3



Obr. 9. 7 Deformace v ose Y u model č. 3



Obr. 9. 8 Deformace v ose Z u model č. 3



Obr. 9. 9 Deformace magnitude $\{(Ux^2+Uy^2+Uz^2)^{1/2}$ [mm]], u model č. 3

Tab. 9. 2 Vliv okrajových podmínek na deformace

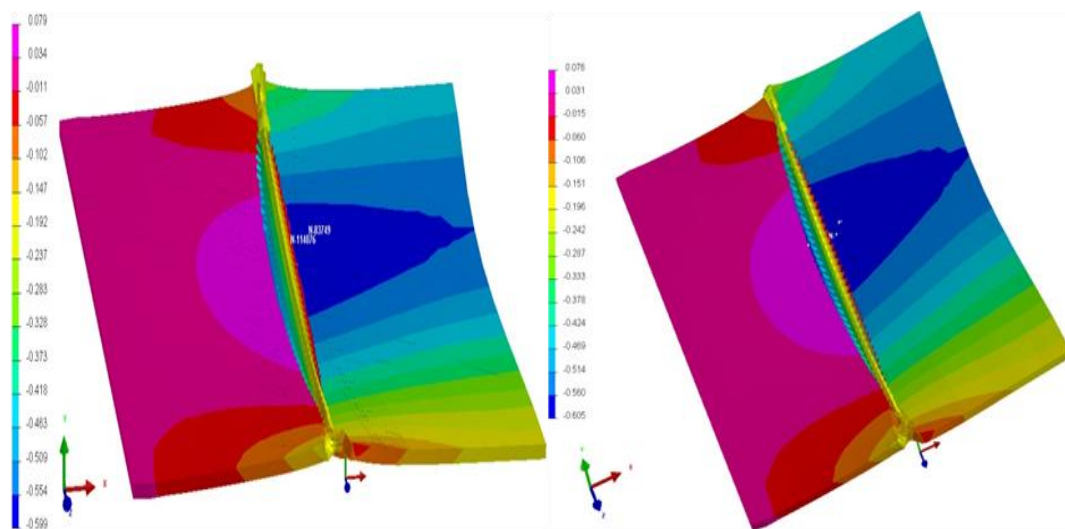
Číslo modelu	Okrajové podmínky	Poznámka	Ux [mm] celkové	Uy [mm] celkové	Uz [mm] celkové	U (x ² +y ² +z ²) ^{1/2} [mm] celkové
3	typ A, typ B	nejméně protavený model	0,601	0,715	0,446	0,579
3 “Z”	typ A, typ C		0,614	1,384	0,446	1,189
Jednotkový rozdíl posuvů [mm]			0,013	0,669	0	0,610
Procentuální rozdíl posuvů [%]			2,2	48,3	9	51,3

Obrovský rozdíl deformací po změně okrajových podmínek v ose y a celkové deformaci je viditelný z tabulky 9. 2. Dali jsme možnost materiálu se deformovat a projevit účinky velkého teplotního gradientu přes tloušťku vzorku. Potvrdil se předpoklad velkých deformací způsobených chladnutím (smrštěním) roztaveného materiálu.

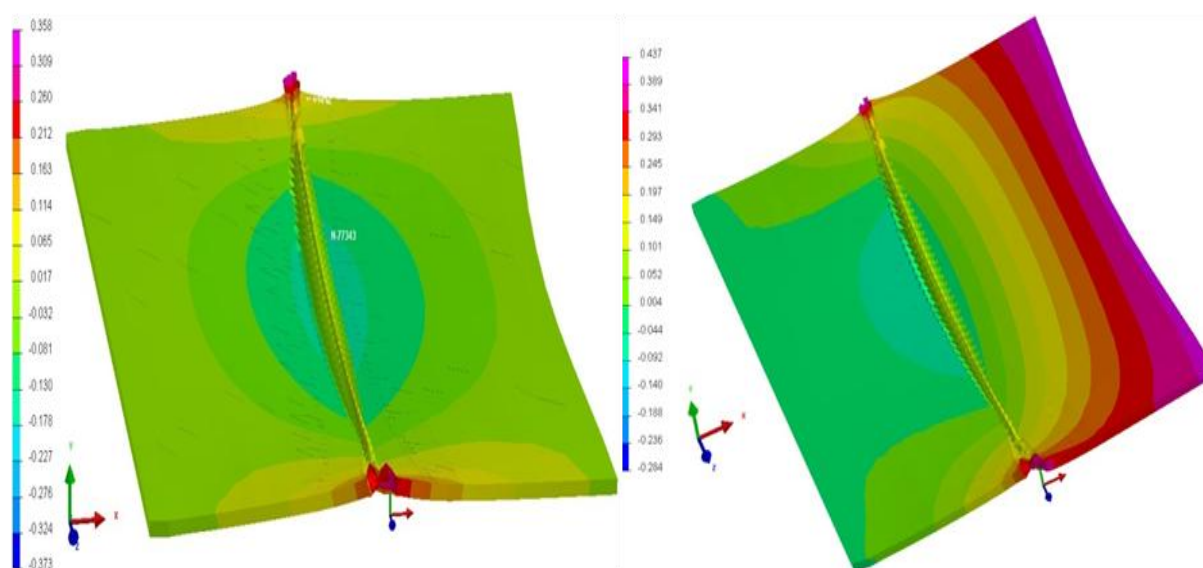
9.3 Vliv okrajových podmínek na deformace – nejvíce protavený model

Na obrázcích 9. 10 až 9. 13 je demonstrován vliv okrajových podmínek. Jedná se o model s největším protavením, výše značený jako model č. 10. Ten je ze všech zkušební vzorků nejvíce protavený. Teplotní gradient je tedy nejmenší a domníváme se, že deformace budou minimální. Jak svařenec chladne ze spodu a z vrchu stejnou téměř stejnou rychlostí, není důvod k deformacím.

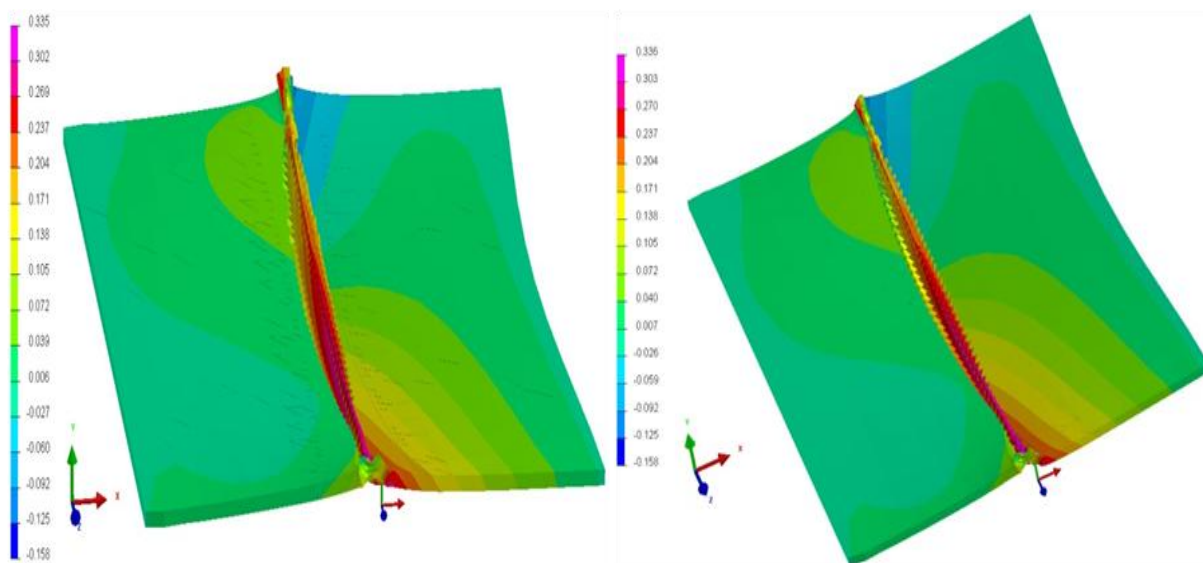
Níže vlevo jsou modely s ukotvením typu A na jedné straně desky a typu B na druhé straně desky. Vpravo na stránce je použit na jedné straně desky typ A a na druhé typ C.



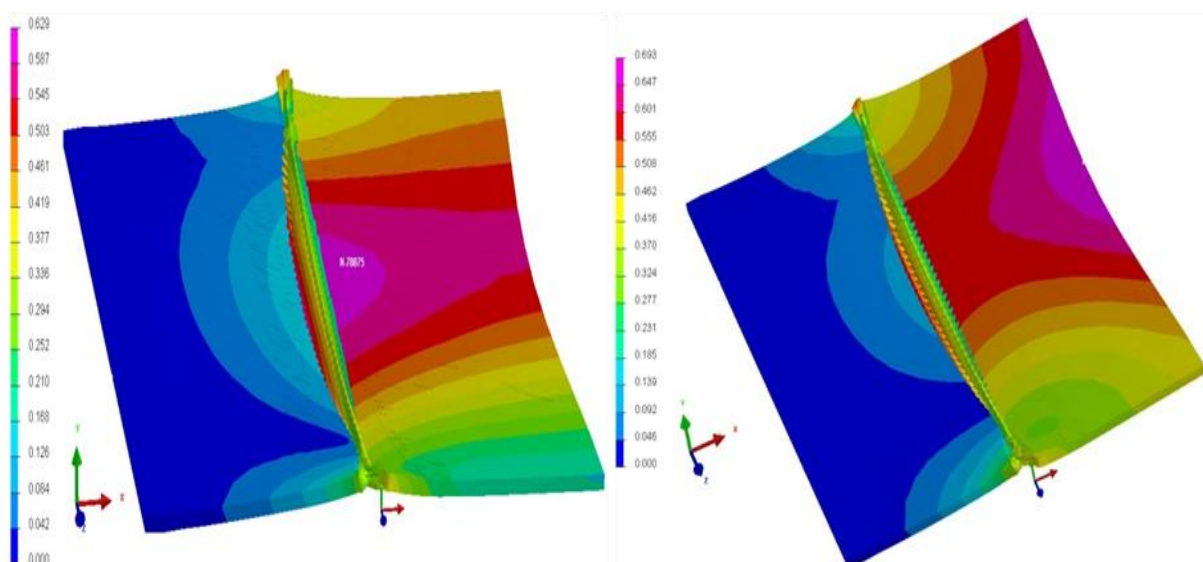
Obr. 9. 10 Deformace v ose X



Obr. 9. 11 Deformace v ose Y



Obr. 9. 12 Deformace v ose Z



Obr. 9. 13 Deformace magnitude $\{(U_x^2+U_y^2+U_z^2)^{1/2} \text{ [mm]}\}$

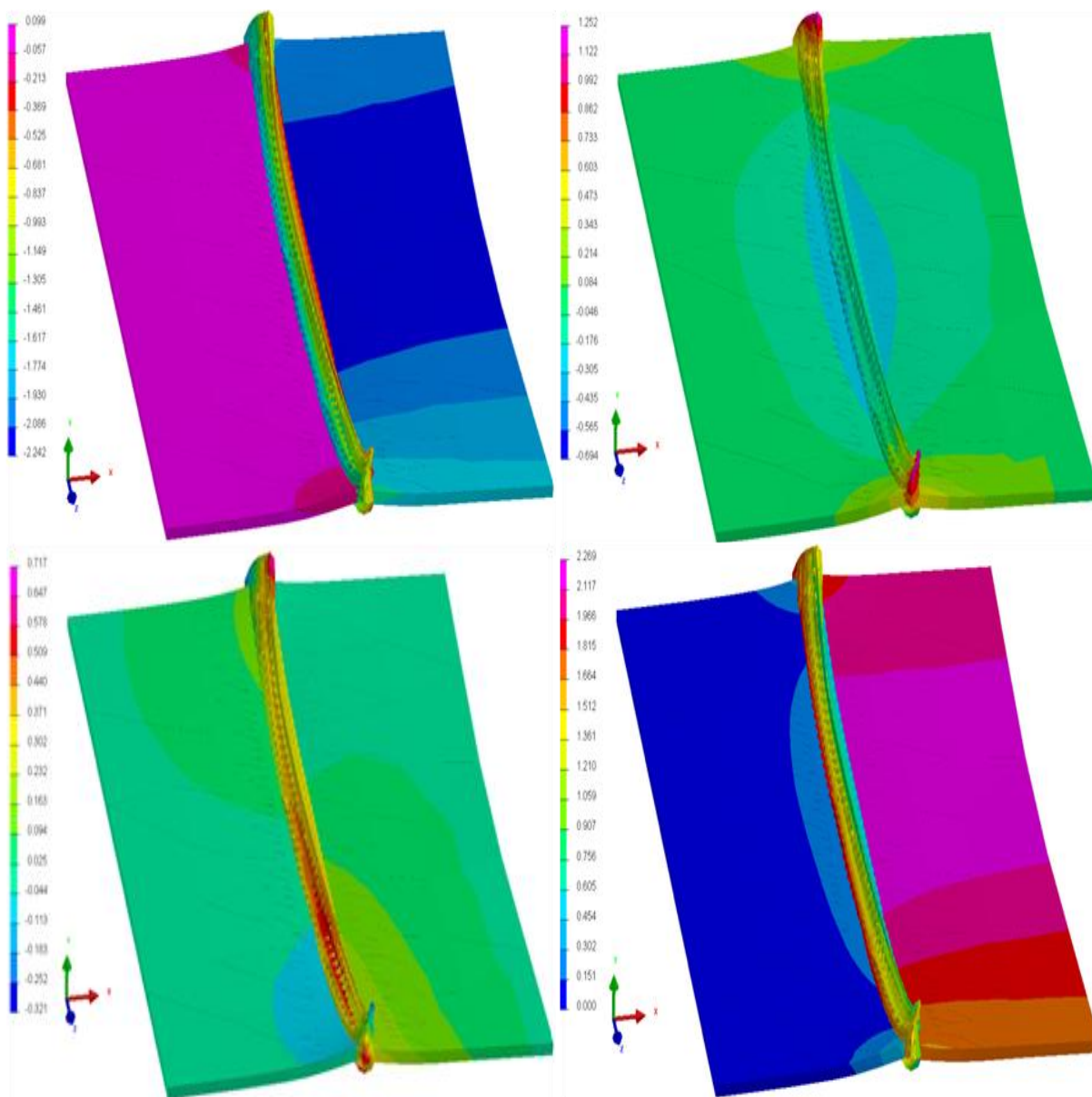
Tab. 9. 3 Vliv okrajových podmínek

Číslo modelu	Okrajové podmínky	Poznámka	Ux [mm] celkové	Uy [mm] celkové	Uz [mm] celkové	U (x ² +y ² +z ²) ^{1/2} [mm] celkové
10	typ A, typ B	nejvíce protavený model	0, 678	0,731	0,493	0,629
10 “Z“	typ A, typ C		0,681	0,721	0,494	0,693
Jednotkový rozdíl posuvů [mm]			0,003	(-)0,010	0,001	0,064
Procentuální rozdíl posuvů [%]			0,4	(-)1,4	0,2	9,2

Podle predikce došlo pouze k nepatrným deformacím v hlavních směrech pohybu. V tabulce 9.3 je vidět, že rozdíl celkových posuvů U_y je dokonce záporný. V kapitolách 9.1 a 9.2 se prokazuje, jak důležité je vnést do materiálu správné množství energie v podobě tepla. Mnoho lidí si myslí, že pokud do materiálu vneseme málo tepla, tak je to ve výsledku lepší, než kdybychom ho tam vnesli hodně. Samozřejmě se musí brát zřetel na konstrukčním řešení daného dílce. Pokud měním tepelný zdroj, má to vliv na kvalitu výsledků.

9.4 Vliv tepelného zdroje a okrajových podmínek na deformace tří návarů

Modely na obrázku 9. 2. 1 byly 20x zvětšeny pro lepší viditelnost posuvů. Na první pohled je vidět, že při dvacetinásobném zvětšení jsou deformace v oblasti svaru velmi velké, ale je to dáno pouze měřítkem zvětšení, aby byly vidět posuvy na krajích desky a typický “vlaštovkovitý” tvar vyskytující se u tenkých plechů.



Obr. 9. 2. 1 Deformace v ose X, Y, Z a celkový posun u tří housenek

Tab. 9. 4 Vliv tepelného zdroje a okrajových podmínek na deformace

Číslo housenky	Okrajové podmínky	Ux [mm] celkové	Uy [mm] celkové	Uz [mm] celkové	$U (x^2+y^2+z^2)^{1/2}$ [mm] celkové
1	typ A, typ B	1,23	0,577	1,412	0,931
2	typ A, typ B	1,549	0,886	1,505	1,516
3	typ A, typ B	2,341	1,946	1,038	2,269
Rozdíl posuvů mezi 1. a 2. housenkou [mm]		0,319	0,309	0,093	0,585
Procentuální rozdíl posuvů mezi 1. a 2. housenkou [%]		20,6	34,9	6,2	38,6
Rozdíl posuvů mezi 2. a 3. housenkou [mm]		0,792	1,06	(-)0,467	0,753
Procentuální rozdíl posuvů mezi 2. a 3. housenkou [%]		33,8	54,5	(-)31	32,5

V tabulce 9. 2. 1 jsou umístěna data, která posuzují vliv jednotlivých návarů na deformaci. Je patrné, že čím více je na desce položeno housenek, tím větší jsou celkové deformace v jednotlivých osách. Velmi velký nárůst zaznamenaly posuvy v ose Y, kdy mezi první a druhou housenkou vzrostly o téměř 35 % a mezi druhým a třetím návarem dokonce o 55 %.

10 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo řešit problematiku simulování navařování ložiskových čepů rotoru turbíny. Navařování rotorových čepů je uvažováno z důvodu renovace opotřebených čepů a současně zavádění navařování již při výrobě nové turbíny. Důsledek po navaření bude takový, že nebude docházet k zadírání kluzných dvojic v oblasti ložiskového čepu. Tímto řešením se mají ušetřit náklady, které by způsobila odstávka v případě poruchy nebo havárie zařízení. Simulace byly provedeny v programu SYSWELD a Visual – WELD.

Z důvodů velké časové a odborné náročnosti numerické simulace, nelze řešit celé téma podrobně. Proto se úsilí ubíralo směrem přípravných prací na zkušebních vzorcích. Byly použity stejné základní (ocel X22CrMOV 12 - 1) i přídatný materiál (Fluxocord 42) spolu s tavidlem (OP 121TT W), které by byly reálně použity u navařování na čepch rotorů. Získali jsme tím podrobnější informace o chování materiálu v navařené vrstvě a je možno posoudit difference mezi numerickým modelem a reálným zkušebním vzorkem.

Výpočtem byla stanovena teplota přehřevu 400 – 500 °C pro mohutnější materiály, zkušební vzorek tloušťky 6 mm byl přehříván na teplotu 200 °C. Navařily se housenky, kde na jejich formování má hlavní vliv svářecí napětí, proud a rychlost svařování. Po vyhodnocení makrovýbrusů se zjistila přítomnost studené trhliny. Experiment byl proveden tak, že v oblasti návaru jsou velmi vysoké koncentrátoři napětí. Tyto koncentrátoři na numerickém modelu namodelovány nebyly, protože ve skutečně kvalitním svaru by neměly co dělat. Z toho plyne, že na experimentálním vzorku se mohou lokálně vyskytovat místa s až 2x vyšší koncentrací napětí.

Již před vyhodnocováním zkušebních návarů se přistoupilo k vytvoření modelu zkušební desky, ten byl vytvořen v programu Visual – Mesch. Po nasítování modelu se rozdělil na tři části. Svar, promísená zóna a základní materiál. Modelu byl software přiřazen přestup tepla do okolí. Soubor byl přenesen do dalšího programu společnosti ESI Group, Visual – WELD, kde. Zde byly jednotlivým skupinám přiděleny materiálové vlastnosti, přehřev, okrajové podmínky a parametry svařování.

Výsledky numerických analýz navařování na modelech jedné a třech housenek jsou popsány níže a lze konstatovat následující závěry jednotlivých rozborů:

Tepelný zdroj:

Abychom mohli sladit numerickou simulaci a skutečný tvar svaru (makrovýbrus), musíme správně regulovat parametry tepelného zdroje. Teplota v tavné lázni je při hledání tvaru a velikosti natavené oblasti rozhodujícím parametrem.

Cílem optimalizace tepelného zdroje je uvedení jeho parametrů na takové hodnoty, aby se co nejvíce shodovaly se skutečností. Namodelování teplotního pole, tzn. tepelného zdroje, má dominantní vliv na výslednou materiálovou strukturu, tvrdost, zbytkové napětí a distorze.

Teplotní analýza:

Autor provedl více jak 20 časově náročných simulací pro validaci tepelného zdroje pro návar jednou housenkou. Výpočty se prováděly s různými proměnnými a sledoval se jejich vliv na protavenou oblast. Nejlepší shody bylo dosaženo u simulace č. 2. Postup byl analogický i u tří housenek.

Strukturní analýza:

Struktura návaru je bainitická, v promísené oblasti je bainiticko – martenzitická. Základní materiál je tvořen martenzitickou strukturou, ovšem jen v místech přetavení materiálu. V základním materiálu se vyskytuje nezaustenizovaná oblast a také plně zaustenizovaný materiál, který překročil teplotu A_{c3} . Přechod mezi nezaustenizovaným a plně zaustenizovaným materiálem kopíruje linii TOO, oblast mezi A_{c1} a A_{c3} .

Bainitická struktura návaru je žádoucí. Je dostatečně pevná za současně dostačující houževnatosti. Čím víc se návar blíží k základnímu materiálu, tím procento bainitické struktury klesá a přechází do martenzitu. Je to dáno chemickým složením přídavného materiálu.

Mechanická analýza:

Hodnota zbytkového napětí se drží pod mezí kluzu pro jeden návar, ale pro tři housenky je už hodnota zbytkových napětí blízká mezí kluzu, což může v místě s lokálním koncentrátorem napětí způsobit trhlinu. Obzvláště, když je lokalizovaná v přehřáté oblasti nebo částečně natavené oblasti TOO, kde se nachází martenzitická struktura. Dle lokalizace vady na experimentu k tomu také došlo. Dominantní hodnoty napětí jsou v osách X a Z.

ARA diagramy:

Na základě vstupních dat se vypočítaly teploty začátku - M_s a konce - M_f přeměny martenzitu, dále teplotu B_s a B_f a také čas bainitického nosu. Sestavení ARA diagramu vychází z experimentálního ARA diagramu na totožné nebo podobné oceli, převážně nalezeného v literatuře. Byly sestaveny ARA diagramy ZM, PM a oblasti promísení. Tvorba ARA diagramu promíseného materiálu spočívala ve zkombinování ARA diagramů ZM a PM v SYSWELDu a následném posunutí dle rovnic. Potřebné chemické složení pro promísenou oblast vycházelo z vypočítaného promísení 58 %.

Teplotně metalurgická analýza:

Tvrdost na určeném místě se stanovuje z tvrdosti struktury v dané oblasti (martenzit, bainit, ferit, kalené struktury), chemickém složení a rychlosti ochlazování, dle empirických vztahů. Výsledná hodnota vypočtené tvrdosti martenzitu v porovnání s ARA diagramem, je do jisté míry dobrá. U bainitu se tyto hodnoty diametrálně odlišují – empirický vztah nelze použít. Po navaření přídavného materiálu na základní kov je rychlost ochlazování tak velká, že se do bainitu v ARA diagramu ani nedostaneme. Pro bainit a perlit rovnice nesedí, ale to nám v tomto případě nevádí.

Tepelný zdroj a okrajové podmínky mají vliv na strukturu, deformace a zbytkové napětí. Z obrazových výstupů simulací v kapitole 9 lze říci, že je již viditelný rozdíl deformací, výhradně na vlivu tepelného zdroje (záleží na okrajových podmínkách). Zde se projevila důležitost korektního namodelování tepelného zdroje, má velký vliv na rozdíl ve výsledcích, například distorze.

U modelu s nejmenším protavením je největší teplotní gradient. U tohoto vzorku se vyskytly největší deformace. Materiál dostal možnost se deformovat vlivem změněných okrajových podmínek a vlivem velkého teplotního gradientu.

Model s největším protavením a tedy nejmenším teplotním gradientem měl minimální deformace. Jak svařenec rovnoměrně chladl stejnou rychlostí, neměl důvod k deformacím.

Tepelné zpracování se v diplomové práci neřešilo. Je velmi náročné na čas a odborné znalosti a svým rozsahem by mohlo zahrnovat další celou diplomovou práci.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [29]

- 1 Teorie a technologie svařování [online]. 20.1:2010 [cit. 2011-01-27]. Základní metody svařování, řezání a pájení. Dostupné z WWW: <<http://fs1.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/indexs.htm>>.
- 2 General weld [online]. 2008 [cit. 2011-01-27]. Pracovní polohy svařování dle ČSN EN ISO 6947. Dostupné z WWW: <<http://www.generalweld.cz/cz/standards.php?id=20>>.
- 3 DUBEN, Zdeněk. Svařování pod tavidlem. Vyd. 2. Praha : SNTL, 1956. 96 s.
- 4 Svarinfo : svařování prakticky a s nadhledem [online]. 28.1.2010 [cit. 2011-01-30]. Svařování pod tavidlem (SAW). Dostupné z WWW: <<http://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cisloclanku=2009010801>>.
- 5 ESAB : Svařování a řezání [online]. c2006 [cit. 2011-01-30]. Svařování trubičkovým drátem pod tavidlem. Dostupné z WWW: <<http://www.esab.com/cz/cz/education/Technicke-clanky.cfm>>.
- 6 HRIVŇÁK, Ivan. Zváranie a zvariteľnosť materiálov. 1. vyd. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave v Nakladateľstve STU, 2009. 492 s. ISBN 978-80-227-3167-6
- 7 POCHODNJA, I.K. a kol., Svařování trubičkovým drátem. 1.vyd. Vydalo SNTL Praha, 1977, 252 s.
- 8 Technologie svařování a zařízení : Učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. 1. vydání. Ostrava : Zeross, 2001. 395 s. ISBN 80-85771-81-0.
- 9 Příručka pro svařování pod tavidlem. In Technická příručka [online]. [s.l.] : [s.n.], [200?] [cit. 2011-02-01]. Dostupné z WWW: <[http://www.degas-km.cz/dokumenty/esab/SAW_CZ2009\(2\).pdf](http://www.degas-km.cz/dokumenty/esab/SAW_CZ2009(2).pdf)>. XA0013601403 2009.
- 10 Svařování korozivzdorných ocelí. In CUNAT, Pierre-Jean. Materiály a jejich použití, Volume 3 [online]. první vydání 2007. D'Arion, Lucembursko : Euro Inox, 2007[cit. 2011-02-07]. Dostupné z WWW: <http://www.euro-inox.org/pdf/map/BrochureWeldability_CZ.pdf>. ISBN 978-2-87997-177-3.

- 11 Zváracie metódy a zariadenia : II. diel učebných textov pre kurzy zvaračských technologov. 1. vydání. Ostrava : Zeross, 2000. 616 s. ISBN 80-85771-84-5.
- 12 LÖBL, Karel. Tvrdé návary. vydání první. Praha : SNTL, 1953. 80 s. DT 621.9.025.002:669.018.25.
- 13 Key to metals [online]. 1999 [cit. 2011-03-01]. 9–12% Chromium Steels. Dostupné z WWW: <http://www.keytometals.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&LN=CZ&NM=272>>.
- 14 AMBROŽ, Oldřich. Svařitelnost materiálu [online]. [s.l.], 200?. 11 s. Učební texty. VUT Brno. Dostupné z WWW: <http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/svaritelnost_materialu__ambroz.pdf>.
- 15 FOLDYNA, Václav, et al. Materiály a jejich svařitelnost : Učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. Ostrava : Zeross, 2001. 292 s. ISBN 80-85771-85-3.
- 16 Svarák.cz [online]. 14. 1. 1996 [cit. 2011-03-15]. Nová norma EN 14 700 pro klasifikaci návarových materiálů. Dostupné z WWW: <<http://www.svarak.cz/cz/nova-norma-en-14-700-pro-klasifikaci-navarovych-materialu.htm>>.
- 17 BURŠA, Jiří. Metoda konečných prvků [online]. Brno, 200?. 5 s. Studijní opory. ÚMT, FSI, VUT Brno.
- 18 SLOVÁČEK, Marek. Numerická simulace svařování, výpočet a hodnocení deformací a zbytkových napětí. Brno, 2005. 154 s. Dizertační práce. Univerzita obrany, Brno.
- 19 DT Zkoušky svarů - praskavost. In Destruktivní zkoušky [online]. Brno : [s.n.], 1. 6. 2008 [cit. 2011-03-22]. Dostupné z WWW: <www.tesydo.cz/dokumenty/technicke.../dt-zkousky-svaru-praskavost.doc>.
- 20 Koontz machine and welding, Inc [online]. c2010 [cit. 2011-03-28]. Service. Dostupné z WWW: <<http://koontzmachine.com/services/services.htm>>.
- 21 Siemens Gas Turbines [online]. 2002-2010 [cit. 2011-04-06]. Gas Turbine SGT5-8000H. Dostupné z WWW: <<http://www.energy.siemens.com/hq/en/power-generation/gas-turbines/sgt5-8000h.htm>>.

- 22 Deutsche Edelstahlwerke : Providing special steel solutions [online]. 2001 [cit. 2011-04-09]. Dostupné z WWW: <<http://www.edelstahl-e.com/shop/de/secure/index.jsp>>.
- 23 DOHNAL, Ivo. Numerická simulace svařování lopatky a rotoru turbíny. Brno, 2010. 82 s. Diplomová práce. VUT Brno, Fakulta strojního inženýrství.
- 24 SYSWELD 2010 : Reference Manual. [Paris] : ESI Group, leden 2010. 316 s. GL/SYWE/09/03/00/A.
- 25 Technické normy : Materiálové listy ocelí. [s.l.] : [s.n.], 1993.
- 26 Oerlikonline : Tavidla a dráty [online]. C2008 [cit. 2011-05-12]. Oerlikon svařovací materiály. Dostupné z WWW:http://oerlikonline.hu/fedoporok_es_huzalok#8>.
- 27 KON, Sindo. Welding metallurgy. Madison, Wisconsin : [s.n.], 1987. 411 s.
- 28 KIRÁLY, František. Diagramy rozpadu austenitu. Bratislava, 1980. 9 s., XLII s. Výzkumná práce. VÚZ Bratislava.
- 29 Citace 2. 0 : vše o citování literatury a dokumentů [online]. Verze 2. 0. ©2004-2011 [cit. 2011-05-15]. Generátor citací. Dostupné z WWW: <www.citace.com>.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
a	Rozměr tavné lázně	[mm]
a'	Převýšení návaru	[mm]
A ₅	Tažnost	[%]
A	Ampér	[A]
Ac ₁	Teplota začátku austenitické přeměny	[°C]
Ac ₃	Teplota konce austenitické přeměny	[°C]
AC	Alternating current (střídavý proud)	[A]
APT	Svařování automatem pod tavidlem	[-]
ARA	Diagram anizotermického rozpadu austenitu	[-]
b	Rozměr tavné lázně	[mm]
b'	Šířka návaru	[mm]
B _B	Bazicita	[-]
B _S	Bainit start	[°C]
B _f	Bainit finish	[°C]
C _C	Ekvivalent chemického složení (dle Seferiána)	[%]
c	Měrné teplo	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
cca	Circa	[-]
CCT	Continuous cooling transformation (ARA diagram)	[-]
Cr _E	Chromový ekvivalent	[-]
C _S	Ekvivalent tloušťky materiálu (dle Seferiána)	[%]
CTS	Controlled thermal severity (řízená tepelná závažnost)	[-]
DC	Direct current (stejnoseměrný proud)	[A]
E	Modul pružnosti v tahu	[MPa]
El.	Elektrický	[-]
f _f	Konstanty ovlivňující rozložení intenzity toku energie do materiálu	[-]
f _r	Konstanty ovlivňující rozložení intenzity toku energie do materiálu	[-]
h	Hloubka závaru v základním materiálu	[mm]
H	Materiálové zpevnění	[MPa]

$H_{D(GL)}$	Obsah difúzního vodíku stanovený glycerinovou zkouškou	[ml/100g]
HHM	Huber, Mises, Hencky, plastická deformace	[-]
HV	Tvrdość podle Vickerse	[HV]
Hz	Frekvence	[Hz]
I	Proud	[A]
IRA	Diagram izotermického rozpadu austenitu	[-]
J_2	Von Mises Invariant tenzoru napětí	[-]
K	Faktor intenzity tuhosti	[10N/mm.mm]
K_0	Měrná tuhost	[-]
KCV	Nárazová práce	[J·cm ⁻²]
L	Lenght	[mm]
LGA	Lokálně globální přístu	[-]
M_f	Martenzit finish	[°C]
M_s	Martenzit start	[°C]
MAG	Metal Active Gas (svařování v atmosféře aktivního plynu)	[-]
MIG	Metal Inert Gas (svařování v ochranné atmosféře inertního plynu)	[-]
MKK	Mezikrystalová koroze	[-]
MKP	Metoda konečných prvků	[-]
Ni_E	Niklový ekvivalent	[%]
P_{CM}	Uhlíkový ekvivalent	[hm%]
P_w	Parametr praskavosti	[%]
P	Penetration (hloubka)	[mm]
PA	Poloha svařování vodorovná z hora	[-]
PB	Poloha svařování šikmo z hora	[-]
PM	Přídavný materiál	[-]
q	Tepelný tok do materiálu	[W·m ⁻²]
Q_s	Vnesené teplo	[kJ·mm ⁻¹]
Q	Výstupní energie oblouku	[W]
QT1	Quenching Temperature (kalící teplota 800 °C)	[°C]
QT2	Quenching Temperature (kalící teplota 900 °C)	[°C]
$R_{p0,2}$	Mez kluzu	[N·mm ⁻¹]
R_m	Mez pevnosti	[N·mm ⁻¹]

S_n	Plocha návaru	$[\text{mm}^2]$
S_z	Plocha závaru	$[\text{mm}^2]$
SAW	Submerged Arc Welding	[-]
spol. s r. o.	Společnost s ručením omezeným	[-]
$t_{8/5}$	Čas chlazení svaru mezi teplotami 800°C a 500°C	$[\text{°C}]$
$T_{\max}$	Teoretická maximální teplota v tavné lázni	$[\text{°C}]$
Tep.	Teplota	$[\text{°C}]$
TIG	Tungsten Inert Gas	[-]
TOO	Teplotně ovlivněná oblast	[-]
TZ	Tepelné zpracování	[-]
TZPS	Tepelně zpracováno po svaření	[-]
U	Napětí	$[\text{V}]$
UV	Ultrafialové záření	[-]
U_x, y, z	Posuv v osách X, Y, Z	$[\text{mm}]$
U_{mag}	Posuv magnitude (celkový)	$[\text{mm}]$
v_r	Rychlost ochlazování	$[\text{°C} \cdot \text{s}^{-1}]$
v_S	Rychlost svařování	$[\text{m} \cdot \text{hod}^{-1}]$
V	Volt	$[\text{V}]$
VA	Zdánlivý elektrický výkon – voltampér	$[\text{VA}]$
Z	Kontrakce	$[\%]$
Z'	Promísení	$[\%]$
ZM	Základní materiál	[-]
α	Koeficient tepelné roztažnosti	$[1/\text{K}]$
β	Přestup tepla do okolí	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$
λ	Měrná tepelná vodivost	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
η	Účinnost svařovacího procesu	$[\%]$
$\sigma_{11, 22, 33}$	Hlavní složky napětí	$[\text{MPa}]$
σ_{VM}	Napětí von Mises	$[\text{MPa}]$
τ	Celková doba svařování	$[\text{s}]$
ρ	Hustota	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
Ψ	Součinitel formy svaru	[-]

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA č. 1 Materiálový list oceli X22CrMOV 12-1

PŘÍLOHA č. 2 Materiálový list oceli X22CrMOV 12-1

PŘÍLOHA č. 3 Přídavný materiál

PŘÍLOHA č. 4 Tavidlo

PŘÍLOHA č. 5 Tavidlo

PŘÍLOHA č. 6 Tavidlo

PŘÍLOHA č. 1 Materiálový list oceli X22CrMOV 12-1

W Nr. (číslo materiálu) 1.4923		Cr-Mo-V žárupevná ocel k zušlechťování						OCEL Kurzname (značka) X22CrMoV12-1			
Chemické složení [hm. %]											
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V			
0,18–0,24	max 0,50	0,40–0,90	max 0,025	max 0,015	11,0–12,5	0,30–0,80	0,80–1,20	0,25–0,35			
Normy DIN											
DIN EN 10269-99 – oceli a niklové slitiny na upevňovací části pro zvýšené a/nebo snížené teploty											
DIN 17240-76 – žárupevné a vysoce žárupevné materiály na šrouby a matice											
Mechanické vlastnosti											
Rozměr t, d [mm]		–			≤ 160						
Stav		žíhaný na měkko			zušlechtěný na QT1			zušlechtěný na QT2			
Mez kluzu R _p 0,2 [MPa] min		–			600			700			
Mez pevnosti R _m [MPa]		–			800–950			900–1 050			
Tažnost A [%] min		–			14			11			
Kontrakce Z [%] min		–			40			35			
Nárazová práce KV [J] min		–			27			20			
Tvrdost HB max		302			–			–			
Modul pružnosti E [GPa]		216									
Min. hodnoty meze kluzu R _p 0,2 při zvýšených teplotách (stav zušlechtěný na QT1, resp. QT2)											
Teplota [°C]	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550
Mez kluzu QT1	585	560	545	530	505	480	450	420	380	335	280
R _p 0,2 [MPa] QT2	681	650	625	600	575	550	518	485	440	390	330
Hodnoty modulu pružnosti E při zvýšených teplotách											
Teplota [°C]	100		200		300		400		500		600
Modul pružnosti E [GPa]	209		200		190		179		167		127
Fyzikální vlastnosti											
Hustota ρ [kg.m ⁻³]	Měrné teplo c _p [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]			Teplotní součinitel roztlačnosti α [K ⁻¹]			Tepelná vodivost λ ₁ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]			Rezistivita [Ω.mm ² .m ⁻¹]	
7 700	460			10,5.10 ⁻⁶			24			0,60	
Odolnost proti degradačním procesům											
ODOLNOST PROTI OXIDACI ZA ZVÝŠENÝCH TEPLOT do 600 °C											
ODOLNOST PROTI TEČENÍ											
Mez pevnosti při tečení v tahu R _{mT} [MPa]											
Teplota [°C]	450	480	500	520	540	560	580	600			
R _{mT} /10 ⁴	480	394	338	286	235	187	143	103			
R _{mT} /10 ⁵	432	336	275	216	161	118	83	59			
Mez tečení v tahu R _T [MPa]											
R _T /10 ⁴ /1	436	344	289	235	187	144	108	79			
R _T /10 ⁵ /1	373	278	221	170	127	91	64	44			

PŘÍLOHA č. 2 Materiálový list oceli X22CrMoN 12-1

Mez tečení R_T [MPa] při celkové deformaci $\epsilon_A = 0,2 \%$ (začátek tečení)					
Teplota [°C]	400	450	500	550	580
$R_T / 10^3/0,2$	255	216	157	87	56
$R_T / 10^4/0,2$	232	173	103	51	32
$R_T / 3 \cdot 10^4/0,2$	216	155	85	38	20
Technologické údaje					
TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ					
žihání na měkko	750–780 °C	ochlazovat v peci			
kalení	1 020–1 070 °C	ochlazovat na vzduchu nebo v oleji nebo ve vodě			
popouštění	680–740 °C	min 2h – QT1 ($R_m = 800$ –950 MPa)			
	660–720 °C	min 2h – QT2 ($R_m = 900$ –1 050 MPa)			
SVARITELNOST					
vhodná ke svařování el. obloukem, v ochranné atmosféře a metodou WIG, předehřev ca 350 °C, po svaření pomalu ochlazovat do teploty 120 °C, opakovat zušlechťení					
Použití					
Součásti pro reaktorovou techniku, chemický průmysl, turbíny, parní kotle a potrubní systémy pracující do teploty 580 °C					
Porovnání se zahraničními materiály					
ISO		EURO		Česká republika	
–	–	X22CrMoV12-1	EN 10269-99	17 134	ČSN 41 7134
Francie		Velká Británie		Rusko	
X22CrMoV12-1	NF EN 10269-99	X22CrMoV12-1	BS EN 10269-99	–	–
Z21CDV12	NF A35-578-91				
USA		Japonsko		Kanada	
–	–	–	–	–	–
Itálie		Rakousko		Švédsko	

FLUXOCORD 42
SAW Cored Wires
C-Mn and low-alloy steels

Fluxocord 42 is a seamless copper coated basic flux cored wire for submerged arc welding. Used for the welding of high strength steels in combination with fluxes OP 121TT W and OP 41TT. The weld metal composition obtained with Fluxocord 42 meets the mechanical property requirements in both the as welded and stress relieved conditions. Before use, welding flux should be re-dried at 300-350°C.

Flux	Classification
OP 121TT W	AWS A5.23: F11A4-EC-F5

Flux	Approvals	Grades
	DB	
	DNV	
	GL	

see Appendix, Classification Society Approvals,
for details pag. 521

Typical Applications

Flux	Materials
OP 121TT W	ASME: X80; HY80; QIN; SA 302 Gr.C-D EN: S620-S690

Analysis of all-weld metal (Typical values in %)

Flux	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Nb	N	Cu
OP 121TT W	0.05	1.40	0.20	0.60	2.50	0.40	-	-	-

All-weld metal Mechanical Properties

Flux	Heat Treatment	Yield Strength N/mm ²	Tensile Strength N/mm ²	Elongation A5 (%)
OP 121TT W	PWHT 580°C x 2h	≥ 660	740 - 820	≥ 16
OP 121TT W	As Welded	≥ 680	750 - 830	≥ 16

All-weld metal Mechanical Properties - Cv

Flux	Heat Treatment	Charpy V Notch Impact Toughness (J)							
		+20	0	-20	-30	-40	-50	-60	-196
OP 121TT W	As Welded	-	-	80	-	50	-	-	-
OP 121TT W	PWHT	-	-	50	-	100	-	-	-

Current condition

DC+; AC

Packaging data: K415 kg, 25

Diameters	2,4	3,2	4,0	5,0		
-----------	-----	-----	-----	-----	--	--

OP 121TT W
**SAW Basic and Semi-basic Fluxes
C-Mn and low alloy steels**

OP 121TT W is an agglomerated basic flux used for welding high-tensile, fine-grain steels and for joints requiring high toughness at sub-zero temperatures and resistance to ageing. The neutral behaviour of OP 121TTW in terms of silicon and manganese pick-up and burn-out indicates that OP 121TTW is used in combination with wires such as OE-SD3 and can be used tandem wire and for multi-wire processes.

The slag is fast freezing and applications include circumferential joints on small-diameter components, which can be welded without the risk of slag run-off. Regularly shaped welds are deposited without undercut.

The flux can be welded on DC+ and AC, up to approximately 800 A. Grain size according to EN 760: 2-20.

Damp flux should be re-dried at 300-350°C.

Wire	Classification
OE-S1 CrMo2	AWS A5.23:F8P2-EB3-B3
OE-S2 CrMo1	AWS A5.23:F8P4-EB2-B2
OE-S2 Mo	AWS A5.23:F8A6-F8P6 EA2
OE-S2	AWS A5.17:F7A2 - F6P3 EM12K
OE-SD3	AWS A5.17:F7A8-F7P8 EH12K
OE-SD3NiMo1	AWS A 5.23: F9 AP8 EG-F3
OE-SD3 2NiCrMo	AWS A5.23: F11A6-P5-EM4-M4
OE-S2 Ni2	AWS A5.23: F7A10-F7P10 ENi2-Ni2
OE-S2 Ni3	AWS A5.23: F8A15-F7P15 ENi3-Ni3
	EN 760: SA FB 1 55 AC H5
OE-SD3NiMo1	EN 756: S50 5 FB S3Ni1Mo

Wire	Approvals	Grades
OE-SD3	DNV	
OE-SD3	TÜV	
OE-SD3NiMo1	TÜV	
OE-S2 Ni2	RINA	

see Appendix, Classification Society Approvals,
for details pag. 521

Flux Analysis	
CaF ₂	30 %
Al ₂ O ₃ + MnO	20 %
SiO ₂ + TiO ₂	15 %
CaO + MgO	35 %

Basicity to Boniszewski 3,1

OP 121TT W



Typical Applications

Wire	Materials
OE-S1 CrMo2	ASME: A387 Gr.22, Cl 1 and 2, A 182 Gr.F 22, A 336 Gr.F22 EN: 10CrMo9-10, 12CrMo9-10
OE-S2	ASME: ASTM A131 Grades A, B, D, DS; A253 All grades; A529 Grades 42, 50; A570 All grades; A572 Grades 42, 50; A709 Grades 36, 50 EN: 'S(P)235-S(P)355; L245-L360
OE-S2 CrMo1	ASME: A199 and A200 grade T11, A213 Grades T11, T12 EN: 113CrMo4-5, 13CrMoS5-5
OE-SD3	ASME: A516 all grades EN: S(P)235-S(P)420
OE-S2Mo	ASME: X 60, X 65, ASTM A355 Gr. P1; A182M Gr. F1 EN: 16 Mo 3, S(P)355-S(P)460, L245-L450
OE-SD3NiMo1	ASME: X70, X80, N-A-XTRA 55, HY80, QIN EN: 'S(P)420-S(P)500; L245-L485; 20MnMoNi5-5, 15NiCuMoNb5
OE-SD3 2NiCrMo	ASME: Q1N, HY80, HY100; USS T1, T1A and T1B; RQT 601, RQT 701 EN: S620-S690; P680; L415-L555
OE-S2 Ni1	ASME: EN:
OE-S2 Ni2	ASME: EN: 11MnNi5-3, 15NiMn-3
OE-S2 Ni3	ASME: ASTM A333 Grade 3, ASTM A334 Grade 3; A352LC3; ASTM A203 D,E EN: 12Ni14, S(P)275-S(P)460

Analysis of all-weld metal (Typical values in %)

Wire	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Nb	N	Cu
OE-S2	0.05	0.70	0.15	-	-	-	-	-	-
OE-SD3	0.05	1.30	0.25	-	-	-	-	-	-
OE-S2Mo	0.05	0.80	0.20	-	-	0.50	-	-	-
OE-SD3NiMo1	0.06	1.50	0.30	-	1	0.60	-	-	-
OE-SD3 2NiCrMo	0.07	1.40	0.40	0.60	2.20	0.50	-	-	-
OE-S2 Ni1	0.05	1	0.25	-	1.20	-	-	-	-
OE-S2 Ni2	0.065	0.60	0.25	-	2.70	-	-	-	-
OE-S2 Ni3	0.06	0.60	0.25	-	3.50	0.15	-	-	-
OE-S2CrMo1	0.05	0.80	0.20	1	-	0.50	-	-	-
OE-S1CrMo2	0.05	0.70	0.20	2.20	-	1	-	-	-

OP 121TT W**All-weld metal Mechanical Properties**

Wire	Heat Treatment	Yield Strength N/mm ²	Tensile Strength N/mm ²	Elongation A5 (%)
OE-S2	As Welded	≥ 360	450 - 550	≥ 28
OE-SD3	As Welded	≥ 450	560 - 640	≥ 25
OE-S2Mo	As Welded	≥ 500	580-680	≥ 20
OE-SD3NiMo1	PWHT 580-620°C	≥ 540	630 - 730	≥ 22
OE-SD3NiMo1	As Welded	≥ 540	650 - 750	≥ 20
OE-SD3 2NiCrMo	PWHT 600°C X 2 H	≥ 690	780 - 820	≥ 19
OE-SD3 2NiCrMo	As Welded	≥ 720	830 - 870	≥ 18
OE-S2 Ni1	PWHT 580-620°C	≥ 380	480 - 580	≥ 26
OE-S2 Ni1	As Welded	≥ 420	500 - 600	≥ 24
OE-S2 Ni2	PWHT 580-620°C	≥ 400	480-660	≥ 22
OE-S2 Ni2	As Welded	≥ 400	480-660	≥ 22
OE-S2 Ni3	PWHT 580-620°C	≥ 430	500 - 610	≥ 26
OE-S2 Ni3	As Welded	≥ 460	565 - 645	≥ 24
OE-S2CrMo1	PWHT 920°C/air+710°C	≥ 380	530 - 630	≥ 24
OE-S1CrMo2	PWHT 940°C/air+740°C	≥ 450	550 - 650	≥ 22

All-weld metal Mechanical Properties - Cv

Wire	Heat Treatment	Charpy V Notch Impact Toughness (J)							
		0	-20	-30	-40	-50	-60	-80	-196
OE-S2	As Welded	160 min	100 min	-	-	-	-	-	-
OE-SD3	As Welded	160 min	140 min	-	100 min	-	70 min	-	-
OE-S2Mo	As Welded	120 min	100 min	-	70 min	-	50 min	-	-
OE-SD3NiMo1	PWHT	140 min	120 min	-	90 min	-	70 min	-	-
OE-SD3NiMo1	As Welded	120 min	90 min	-	70 min	-	47 min	-	-
OE-SD3 2NiCrMo	PWHT	-	-	-	50 min	-	-	-	-
OE-SD3 2NiCrMo	As Welded	-	-	-	50 min	-	-	-	-
OE-S2 Ni1	PWHT	90 min	-	-	-	-	-	-	-
OE-S2 Ni1	As Welded	130 min	100 min	-	70 min	-	50 min	-	-
OE-S2 Ni2	PWHT	-	-	-	160 min	-	100 min	80 min	-