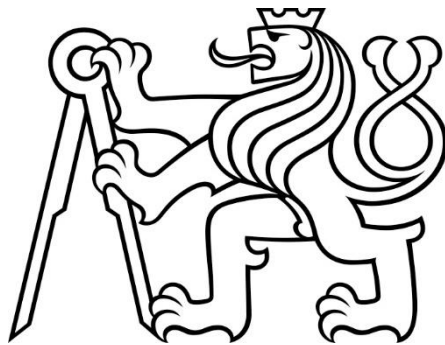


ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE

FAKULTA  
STROJNÍ



VYUŽITÍ NUMERICKÝCH METOD PRO  
OPTIMALIZACI AUTOMATIZOVANÝCH  
ZPŮSOBŮ SVAŘOVÁNÍ

DISERTAČNÍ PRÁCE

ING. ŠTĚPÁN JEŽEK, IWE

ŠKOLITEL: DOC. ING. LADISLAV KOLAŘÍK, PH.D., IWE

STUDIJNÍ PROGRAM: STROJNÍ INŽENÝRSTVÍ

STUDIJNÍ OBOR: STROJÍRENSKÁ TECHNOLOGIE

V PRAZE 2024

# Prohlášení

*Prohlašuji, že jsem svou disertační práci vypracoval samostatně a to výhradně s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.*

*Nemám žádný závažný důvod proti užití školního díla ve smyslu §60 Zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).*

*V Praze dne: .....*

.....

*Podpis*

# Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu práce doc. Ing. Ladislavovi Kolaříkovi, Ph.D, IWE za příkladné vedení a sdílení odborných znalostí nejen při tvorbě této práce, ale i v rámci celého mého doktorského studia. Děkuji všem mým kolegům z Ústavu strojírenské technologie ČVUT v Praze, jejich pomoc a rady při tvorbě této práce měly pozitivní vliv na její dokončení.

Dále bych také rád poděkoval své manželce Anně, která byla významnou oporou při mém studiu. Děkuji také svým rodičům, kteří mě vždy vedli ke vzdělání, jako k důležitému nástroji pro budoucí život.

# Anotace

Disertační práce se zabývá tématem využití numerických metod (MKP) pro predikci deformací po svařování vysokopevnostní konstrukční oceli S960QL robotickým MAG procesem. V první, teoretické části, se práce zabývá přehledem současného stavu v oblasti simulací technologických procesů pomocí specializovaných MKP softwarů, dále pak problematikou simulací procesu svařování. Navazuje popis v průmyslu nejpožívanější metody svařování - MAG. V dalších kapitolách teoretické části práce pojednává o vysokopevnostních ocelích a jejich svařitelnosti. Na závěr teoretické části je popsána problematika deformací svarových spojů. Na základě rešerše a teoretické části byl zvolen cíl disertační práce zaměřený na simulaci deformací vícevrstvého V svaru z oceli S960QL.

V praktické části disertační práce bylo navrženo několik experimentů, jejichž cílem bylo potvrdit volbu specializovaného simulačního softwaru pro MKP simulaci procesu svařování Simufact Welding v. 2021.1 a jeho schopnosti ohledně predikce deformací. Dále byl navržen materiálový model pro ocel S960QL a byla provedena jeho validace, za pomoci reálného svařence. Poslední experimenty (využívající validovaný materiálový model) byly navrženy tak, aby ověřily schopnost softwaru predikovat výsledné deformace svařence při modifikacích svařovacího procesu za účelem omezit výsledné deformace svařence. Jako modifikace procesu byly zvoleny – úprava trajektorie svařování, použití upínek omezující pohyb svařence, změna úhlu rozevření tupého svaru a kombinace všech opatření.

Na základě realizovaných experimentů lze tvrdit, že se v rámci disertační práce podařilo navrhnout a validovat materiálový model, který byl následně úspěšně použit pro predikci deformací u modifikovaných procesů svařování.

# Abstract

Doctoral thesis deals with utilization of finite element method (FEM) for prediction of distortion after welding of high strength structural steel S960QL by robotic GMAW welding process. The first part of theoretical part contains literary research of utilization of specialized FEM software for simulation of welding technological process and description of welding simulation problematics. Following chapter describes the most widely used welding method GMAW. The theory of high strength steels and their weldability is in the next chapter. Last chapter of theoretical part is aimed to distortion of welded structures. The main topic of the thesis was prediction of distortion of 10V-groove butt weld made of S960QL steel.

Several experiments were designed in the beginning of practical parts of the doctoral thesis. Main goal of designed experiments was to confirm feasibility of selected software Simufact Welding to simulate welding process and predict distortion. Material model for steel S960QL was developed and it was validated by comparison with real weldment, for utilization in following experiments. Last experiments with validated material model were designed to confirm feasibility of used MKP software to predict distortion in process with implemented modification. Modification of welding process were aiming to reduction of weldment distortion. The modifications were – change of welding trajectory, utilization of clamps during welding, reduction of V groove angle and combination of all. Can be claimed that material model of S90QL steel was successfully developed and validated and later was successfully used for prediction of weldment distortion in modified welding processes.

# Obsah

<b>PROHLÁŠENÍ .....</b>	<b>1</b>
<b>PODĚKOVÁNÍ.....</b>	<b>2</b>
<b>ANOTACE .....</b>	<b>3</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>4</b>
<b>OBSAH.....</b>	<b>5</b>
<b>SEZNAM ZKRATEK.....</b>	<b>8</b>
<b>1. ÚVOD.....</b>	<b>10</b>
<b>2. ZHODNOCENÍ SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ.....</b>	<b>12</b>
2.1. NUMERICKÉ SIMULACE SVAŘOVACÍHO PROCESU .....	12
2.1.1. <i>Metoda konečných prvků.....</i>	14
2.1.2. <i>Specifikace vstupních dat do numerické simulace .....</i>	16
2.1.3. <i>Výstup ze simulace procesu svařování.....</i>	22
2.1.4. <i>Dostupné simulační sw .....</i>	24
2.1.5. <i>Simulace svařování vysokopevnostních konstrukčních ocelí .....</i>	25
2.2. KONVENČNÍ ZPŮSOBY SVAŘOVÁNÍ.....	27
2.2.1. <i>Svařování MAG.....</i>	27
2.2.2. <i>Zvyšování efektivity výrobních procesů .....</i>	28
2.3. VYSOKOPEVNOSTNÍ KONSTRUKČNÍ OCELI .....	30
2.4. SVAŘITELNOST VYSOKOPEVNOSTNÍCH KONSTRUKČNÍCH OCELÍ .....	34
2.4.1. <i>Uhlíkový ekvivalent.....</i>	35
2.4.2. <i>Tepelný příkon .....</i>	36
2.4.3. <i>Hodnocení teplotních cyklů – <math>t_{8/5}</math>.....</i>	39
2.4.4. <i>Praskavost za studena – vodíkové praskání.....</i>	46
2.4.5. <i>Eliminace vodíkového praskání – volba předeřevu .....</i>	48
2.5. DEFORMACE A NAPĚTÍ SVAROVÝCH SPOJŮ.....	54
2.5.1. <i>Podstata vzniku deformací a napětí při svařování .....</i>	55
2.5.2. <i>Faktory ovlivňující napětí a deformace.....</i>	56
2.5.3. <i>Rozdělení deformací .....</i>	60
2.5.4. <i>Opatření pro redukci deformací .....</i>	61
<b>3. CÍL DISERTAČNÍ PRÁCE.....</b>	<b>67</b>
<b>4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....</b>	<b>68</b>
4.1. VYTIPOVÁNÍ VHODNÉHO SIMULAČNÍHO SOFTWARE A OVĚŘENÍ VHODNOSTI JEHO POUŽITÍ PRO PREDIKCI DEFORMACÍ .....	68
4.1.1. <i>Vytipování vhodného simulačního softwaru.....</i>	68
4.1.2. <i>Ověření vhodnosti použití vybraného softwaru pro predikci deformací .....</i>	69
4.2. NÁVRH MATERIÁLOVÉHO MODELU PRO SIMULACI PROCESU SVAŘOVÁNÍ MATERIÁLU S960QL.....	77
4.3. VALIDACE VSTUPNÍCH DAT NAVRŽENÉHO MATERIÁLOVÉHO MODELU PRO VYBRANÝ PŘÍPAD SVAROVÉHO SPOJE .....	81
4.3.1. <i>Návrh svarového spoje.....</i>	82
4.3.2. <i>Hodnocení teplotních cyklů .....</i>	89
4.3.3. <i>Hodnocení makroskopických deformací .....</i>	92

4.3.4.	<i>Výsledky simulací</i> .....	95
4.4.	ANALÝZA VLIVU PROCESU SVAŘOVÁNÍ NA VZNIK DEFORMACÍ A OVĚŘENÍ, ZDA ZVOLENÝ SOFTWARE JE SCHOPEN TYTO VLIVY IDENTIFIKOVAT .....	108
4.4.1.	<i>Změna trajektorie svařování</i> .....	109
4.4.2.	<i>Použití upínek pro omezení deformace</i> .....	110
4.4.3.	<i>Změna úhlu rozevření z 60° na 40°</i> .....	111
4.4.4.	<i>Kombinace předchozích opatření</i> .....	114
<b>5.</b>	<b>DISKUSE VÝSLEDKŮ</b> .....	<b>115</b>
5.1.	VYTIPOVÁNÍ VHODNÉHO SIMULAČNÍHO SOFTWARE A OVĚŘENÍ VHODNOSTI JEHO POUŽITÍ PRO PREDIKCI DEFORMACÍ .....	115
5.2.	NÁVRH MATERIÁLOVÉHO MODELU PRO SIMULACI PROCESU SVAŘOVÁNÍ MATERIÁLU S960QL .....	115
5.3.	VALIDACE VSTUPNÍCH DAT NAVRŽENÉHO MATERIÁLOVÉHO MODELU PRO VYBRANÝ PŘÍPAD SVAROVÉHO SPOJE ....	115
5.4.	ANALÝZA VLIVU PROCESU SVAŘOVÁNÍ NA VZNIK DEFORMACÍ A OVĚŘENÍ, ZDA ZVOLENÝ SOFTWARE JE SCHOPEN TYTO VLIVY IDENTIFIKOVAT .....	116
5.4.1.	<i>Změna trajektorie svařování</i> .....	116
5.4.2.	<i>Použití upínek pro omezení deformace</i> .....	116
5.4.3.	<i>Změna úhlu rozevření z 60° na 40°</i> .....	117
5.4.4.	<i>Kombinace předchozích opatření</i> .....	117
<b>6.</b>	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>118</b>
<b>7.</b>	<b>POUŽITÉ LITERÁRNÍ ZDROJE</b> .....	<b>120</b>
<b>8.</b>	<b>PUBLIKACE AUTORA SOUVISEJÍCÍ S DP</b> .....	<b>131</b>
<b>9.</b>	<b>PUBLIKACE AUTORA NESOUVISEJÍCÍ S DP</b> .....	<b>132</b>
<b>10.</b>	<b>PŘÍLOHY DISERTAČNÍ PRÁCE</b> .....	<b>133</b>
	PŘÍLOHA 1 – VÝSLEDKY SIMULACE Č. 2 .....	133
	P1.1. <i>Teplotní cykly</i> .....	133
	P1.2. <i>Deformace</i> .....	135
	PŘÍLOHA 2 – VÝSLEDKY SIMULACE Č. 3 .....	137
	P2.1. <i>Teplotní cykly</i> .....	137
	P2.2. <i>Deformace</i> .....	139
	PŘÍLOHA 3 – VÝSLEDKY SIMULACE Č. 4 .....	141
	P3.1. <i>Teplotní cykly</i> .....	141
	P3.2. <i>Deformace</i> .....	143
	PŘÍLOHA 4 – VÝSLEDKY SIMULACE Č. 5 .....	145
	P4.1. <i>Teplotní cykly</i> .....	145
	P4.2. <i>Deformace</i> .....	147
	PŘÍLOHA 5 – VÝSLEDKY SIMULACE Č. 6 .....	149
	P5.1. <i>Teplotní cykly</i> .....	149
	P5.2. <i>Deformace</i> .....	150
	PŘÍLOHA 6 – VÝSLEDKY SIMULACE Č. 7 .....	153
	P6.1. <i>Teplotní cykly</i> .....	153
	P6.2. <i>Deformace</i> .....	155
	PŘÍLOHA 7 – ZMĚNA TRAJEKTORIE SVAŘOVÁNÍ .....	157
	P7.1. <i>Reálné svařování</i> .....	157
	P7.2. <i>Simulace</i> .....	158
	PŘÍLOHA 8 – POUŽITÍ UPÍNEK PRO OMEZENÍ DEFORMACE .....	160

<i>P8.1. Reálné svařování</i> .....	160
<i>P8.2. Simulace</i> .....	161
PŘÍLOHA 9 – ZMĚNA ÚHLU ROZEVŘENÍ Z 60° NA 40° .....	163
<i>P9.1. Reálné svařování</i> .....	163
<i>P9.2. Simulace</i> .....	164
PŘÍLOHA 10 – KOMBINACE PŘEDCHOZÍCH OPATŘENÍ.....	166
<i>P10.1. Reálné svařování</i> .....	166
<i>P10.2. Simulace</i> .....	167



## Seznam zkratek

MKP – Metoda Konečných Prvků

DP – Disertační práce

IoT – Internet of Things (internet věcí) – z angličtiny

TOO – Tepelně Ovlivněná Oblast

WPQR -Welding Process Qualification Report (protokol o kvalifikaci svařovacího procesu (viz EN ISO 15609) – z angličtiny

sw - software

CE – uhlíkový ekvivalent

CET – uhlíkový ekvivalent

CEV – uhlíkový ekvivalent

MMA – Manual Metal Arc (ruční svařování obalenou elektrodou) – z angličtiny

SAW – Submerged Arc Welding (svařování pod tavidlem) – z angličtiny

ESW – Electroslag Welding (elektrostruskové svařování) – z angličtiny

TIG – Tungsten Arc Welding (svařování netavící se elektrodou v ochranné atmosféře inertního plynu) – z angličtiny

MAG – Metal Active Gas (svařování tavící se elektrodou v ochranné atmosféře aktivního plynu) – z angličtiny

MIG – Metal Inert Gas (svařování tavící se elektrodou v ochranné atmosféře inertního plynu) – z angličtiny

ARA – Anizotermický Rozpad Austenitu

CMT – Cold Metal Transfer, modifikace MIG/MAG procesu se sníženým tepelným příkonem

KCV – rázová houževnatost

VPO – Vysokopevnostní Ocel

FEM – Finite Element Method (Metoda konečných prvků) – z angličtiny

MKP – Metoda Konečných Prvků

OP VVV - Operační program, Výzkum, vývoj a vzdělávání - dotační program MŠMT (ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy)

ZM – Základní Materiál

PM – Přídavný Materiál

TS – Teplota Simulace

TM – Teplota Měření

ČVUT – České vysoké učení technické v Praze

FS – Fakulta Strojní

ÚST – Ústav strojírenské technologie

VT – Visual Test – vizuální zkouška - z angličtiny

# 1. Úvod

V oblasti svařovaných konstrukcí dochází v současné době ke změně při použití základních materiálů. S rostoucími nároky na efektivní využívání zdrojů a na funkční vlastnosti výrobku je výhodné ve vhodných případech nahrazovat konstrukční oceli běžných pevností (S235, S355 apod.) oceli s jemnozrnnou strukturou – vysokopevnostními oceli

Tyto oceli se vyznačují redukovanou velikostí zrna ve struktuře získané řízeným válcováním a ve spojení s tepelným zpracováním normalizací, zušlechtním nebo termomechanickým zpracováním dosahují meze kluzu vyšší než 420 MPa.

Zmiňované oceli se běžně používají jako základní materiál ve formě výrobků válcovaných za tepla pro obloukové svařování kusových a sériových výrobků. Typickými výrobky, které ve vyrábějí z těchto ocelí jsou jeřábové konstrukce, nástroje stavebních a zemědělských strojů anebo mostní konstrukce. [1, 2, 3]

Příklady využití jsou uvedeny na obrázku 1.



Obrázek 1: Využití jemnozrnných vysokopevnostních ocelí. [4, 5, 6]

Ve stavebním inženýrství se dle normy EN 1090-1 (*Provádění ocelových konstrukcí a hliníkových konstrukcí – Část 1: Požadavky na posouzení shody konstrukčních dílců*) používají maximálně oceli s mezí kluzu 690 MPa, ale v autojeřábové technice se využívají oceli až o mezi kluzu 1100 MPa. Ve strojírenství začíná být použití oceli o mezi kluzu 960 MPa (S960QL, S960Q, S960MC) relativně běžným jevem. Tento materiál díky své podmíněné svařitelnosti a vynikajících vlastnostech po svařování je používán pro nosné rámy strojů.

S rostoucí mezí kluzu u mikrolegovaných jemnozrnných konstrukčních ocelí (S690QL, S960QL, S1100QL, S1300QL) dochází k redukci tloušťky stěny u svařovaných výrobků a tím ke zvýšení makroskopických deformací. U této skupiny materiálů je odstraňování nežádoucích deformací výrobku mechanickým způsobem velmi obtížné a rovnání pomocí plamene (v minulosti nejpoužívanější metoda pro rovnání konstrukčních ocelí) je velmi omezené. Pro mechanické rovnání je potřeba využívat výkonných lisů, a z důvodu blízké hodnoty meze kluzu a meze pevnosti je při tomto procesu vždy nebezpečí vzniku trhlin, jejichž výskyt je u svařovaných konstrukcí nepřijatelný. Rovnání plamenem lokálně ovlivňuje mechanické vlastnosti svařovaného materiálů, v jehož důsledku dochází k výrazné lokální redukci meze kluzu a pevnosti, a

to může mít během technického života výrobku fatální následky. Z tohoto důvodu je využití simulačních metod, které dokážou s určitou přesností predikovat pozici a velikost deformací velmi cenným nástrojem při navrhování a následné optimalizace svařovacího procesu.

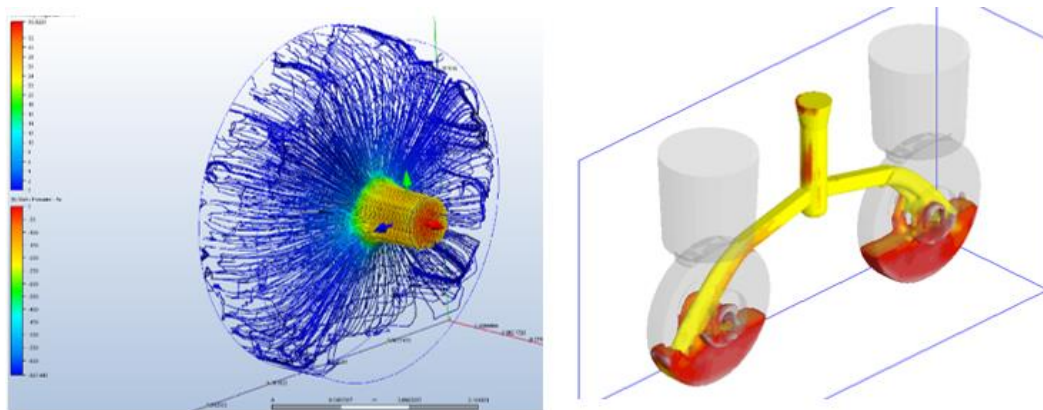
Existuje řada způsobů pro redukci deformací v průběhu svařování, např. vhodně upravit sled svařování jednotlivých svarových spojů na konstrukci, sled kladení jednotlivých svarových housenek, redukce průřezu housenky (omezení množství taveniny), ovlivnění tepelného cyklu, použití svařovacích přípravků apod. (Detailní popis způsobů pro redukci deformací je uveden v kapitole 2.6.4.) Většina těchto metod je však založena na zkušenosti pracovníka zodpovědného za specifikaci svařovacího procesu a volby protiopatření u složitých svařenců před změnou procesu lze jen velmi omezeně ověřit. S rozšířením MKP (metoda konečných prvků) softwarů do výrobní průmyslové sféry vznikla možnost ověřit účinnost plánovaných protiopatření před změnou procesu a tím zvolit optimální metodu redukce deformací pro konkrétní aplikaci.

V současnosti na trhu lze nalézt mnoho softwarů (sw), které lze dělit na univerzální pro výpočet problematiky pomocí MKP (např. Abaqus, Ansys, Marc apod.), ale také lze použít simulační softwary navržené přímo pro simulaci svařovacích procesů. Mezi nejvýznamnější zástupce specializovaných simulačních softwarů patří: Hexagon Simufact Welding a ESI Sysweld. V průmyslu je rozšířenějším softwarem ESI Sysweld, neboť tento software se na trhu objevuje již delší čas.

## 2. Zhodnocení současného stavu poznání

### 2.1. Numerické simulace svařovacího procesu

S mohutným rozšířením výpočetní techniky jsou počítačové simulace moderním trendem a jsou v současnosti využívány v mnoha odvětvích světového průmyslu. Jsou založeny na metodě konečných prvků. Numerické simulace mohou být zaměřeny na pevnostní výpočty, hodnocení proudění, deformační vlastnosti, topologickou optimalizaci či problematiku výrobních procesů, viz obrázek 2. Tato práce je zaměřena na termomechanickou simulaci výrobního procesu svařování.



Obrázek 2: Využití numerických simulací (vlevo – ukázka proudění vzduchu do sání motoru, vpravo – ukázka tuhnutí taveniny při slévárenském procesu výroby)

V současné době se mnoho autorů věnuje numerickým simulacím technologických (výrobních) procesů, využití simulací v oblasti svařování a čím dál výkonnější výpočetní techniky pro predikci a optimalizaci procesu či výrobku je současným trendem. Jak již bylo krátce zmíněno výše, pro simulace založené na MKP existuje mnoho všestranných softwarů, které umí řešit obecně problémy řešitelné v MKP. Tyto softwary (Abaqus, Ansys, Marc,... - viz bližší popis v kapitole 2.7.4) jsou využívány také na ověření, mapování a predikci tepelných polí, zbytkových napětí a deformací při procesu svařování. [7, 8, 9]

Současně jsou ale také vyvíjeny a využívány speciální MKP softwary přímo pro simulaci procesu svařování (Sysweld, Simufact Welding, JWeld,... viz kapitola 2.7.4), které již také podávají věrohodné výsledky simulací, které s určitou mírou přesnosti odpovídají reálným svařencům a z hlediska zpracování požadované úlohy jsou uživatelsky přívětivější. [10, 11, 12]

S výsledky simulací pracují autoři publikací různě. Při svařování se autoři zaměřují hlavně na zjišťování zbytkového napětí, rozložení tepelných polí a velikosti deformací. Simulační programy ale dovolují hodnotit také materiálové vlastnosti, např. precipitaci karbidických fází, fázové strukturní změny či rekrytalizaci materiálové struktury.

Simulační softwary svařovacího procesu dokážou pracovat s různými základními materiály. Správná definice materiálu je pouze jeden ze vstupních údajů do simulačního

procesu. Materiálové databáze simulačních softwarů obsahují spektrum standardně používaných základních a přídatných materiálů pro svařování. V oblasti moderních materiálů jako jsou i vysokopevnostní oceli, je však většina databází velmi omezená. Chybějící data je tedy nutné před vlastní simulací doplnit, což je možné realizovat s pomocí softwarů pro výpočet materiálových vlastností např. sw JMatPro, nebo pomocí experimentálně získaných dat.

Ve vědecké sféře se výzkum v současnosti orientuje více na korozivzdorné oceli menších tlouštěk ( $t < 5\text{mm}$ ) [8, 9, 12], a konstrukční oceli běžných jakostí (S355) [7]. U mikrolegovaných vysokopevnostních konstrukčních ocelí je problematika simulací zatím řešena jen velmi omezeně [11].

Dalším z důležitých vstupů do simulace je definice použité metody svařování. Zvolená metoda definuje způsob vzniku svarového spoje a také typ tepelného zdroje jako vstupu pro simulaci. V celosvětovém měřítku se při simulacích svařování věnují autoři různým technologiím, zejména dnes nejčastěji používané metodě svařování elektrickým obloukem [9, 10, 12], svařování laserem [7, 8] a hybridním metodám svařování (což bývá obvykle spojení obou jmenovaných variant) [11]. Z tlakových metod svařování pak svařování elektrickým odporem [13] a také třecímu svařování s promíšením (FSW) [14]. Pro řešení disertační práce autor předpokládá využití metody MAG (135 dle EN ISO 4063 (*Svařování a příbuzné procesy – Přehled metod a jejich číslování*)), tzn. průmyslově nejpoužívanější konvenční metody pro svařování ocelových konstrukcí.

Pro dosažení využitelného výsledku simulace svařovacího procesu je nutné, aby před začátkem simulací upraveného procesu došlo k validaci výsledků simulace. Tato validace má za cíl potvrdit, že veškeré nastavení okrajových podmínek pro simulaci je správné a že simulace je schopná predikovat výsledky reálného procesu s předem nastavenou přípustnou odchylkou – obvykle  $\pm 10\%$ . Validace se provádí porovnáním výsledků simulace s reálným svařencem, kde kritéria pro vyhodnocení mohou být pouze výsledné deformace, avšak většina autorů vědeckých publikací validuje jak výsledné deformace, tak průběhy teplotních cyklů.

U hodnocení teplotních cyklů se limity pro hodnocení rozcházejí. Cia a kol. [15] se věnuje jednovrstvému svařování ASTM A1011 HSLAS Grade 50, kde však uvádí pouze graf a shodu, bez číselných výsledků. Fisk a kol. [16] také uvádí pouze výsledné grafy s dobrou shodou, avšak věnuje se pouze tepelnému zpracování s výrazně nižšími teplotami. Bozani a kol. [17] se věnuje svařování slitin v T-spoji, kde materiálová data jsou použita z materiálové databáze softwaru Sysweld. Ve výsledku také uvádí pouze porovnání grafů s dobrou shodou, bez číselného výsledku. Rahman a kol. [18] uvádí jako kritérium rozdíl v maximální teplotě do  $50\text{ }^\circ\text{C}$  jako vyhovující. Vzhledem k reálnému svařování vzorku týkajícího se předložené disertační práce a maximální dosažené teploty při svařování 1. krycí housenky =  $361\text{ }^\circ\text{C}$ , viz tabulka 19, je  $50\text{ }^\circ\text{C}$  dle Rahmana více jak zmíněných nastavených  $10\%$ . Zubairuddin a kol. [19] hodnotí pouze maximální teploty, kde dosahuje vysoké shody kolem  $10\text{ }^\circ\text{C}$ .

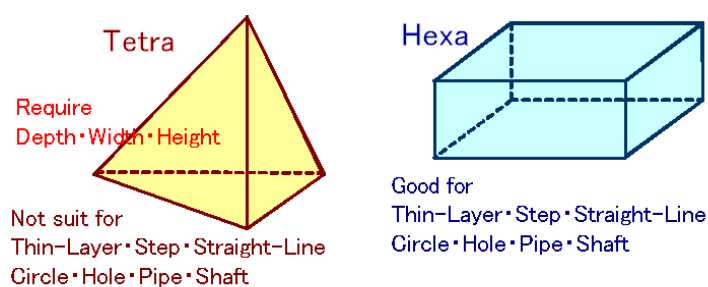
U hodnocení deformací je porovnání výsledků jasnější. Cia a kol. [15] při studování jednovrstvého svaru uvádí dosažený výsledek se shodou 95 %. Zubairuddin a kol. [19] se věnuje vícevrstvému TIG svařování feriticko-martenzitické oceli Grade91. Z experimentu popsáném v [19] vyplývá, že pro simulaci svařování ocelí, u kterých probíhá v rámci svařování fázová transformace, je nutné pro zpřesnění výsledku tuto transformaci zahrnout. V případě zahrnutí fázové transformace dosahovali jeho simulace nepřesnosti do 10 %. Lidam a kol. [20] studuje vícevrstvé svařování konstrukční oceli S355J2G3 při využití složitějšího svařence a hodnotí úhlovou deformaci. Na jedné straně svařence uvádí rozdíl mezi simulací a realitou 14,4 % a na druhé 17 %. Yazdian a kol. [11] se věnuje svařování vysokopevnostní konstrukční oceli pomocí hybridního svařování (tzv. laser-hybrid). Při porovnání výsledků simulace uvádí rozdíl mezi simulací a reálným svařencem 20 %. Zhan a kol. [21] se věnuje simulaci vícevrstvého svařování slitiny Invat metodou MIG. Rozdíl mezi reálným svařencem a simulací uvádí v rozmezí 10-15 %.

### 2.1.1. Metoda konečných prvků

Metoda konečných prvků (MKP, FEM) je numerická metoda řešení problémů mechaniky kontinua, plynů, šíření tepla apod. Pro provedení výpočtu dojde k rozdělení spojitého tělesa na diskrétní soustavu prvků navzájem spojených v uzlech. [22]

Před provedením výpočtu je nutné ověřit, že těleso rozdělené na sestavu, splňuje spojitosti a rovnováhy ve všech uzlech. Při následném numerickém výpočtu dochází k výpočtu pro jednotlivé uzly. Pro správnost a přesnost výpočtu a konvergenci úlohy je nutné volit správný typ elementu a rozumnou hustotu sítě. [23]

Základními typy elementů jsou elementy tetragonální a hexagonální, viz obrázek 3.

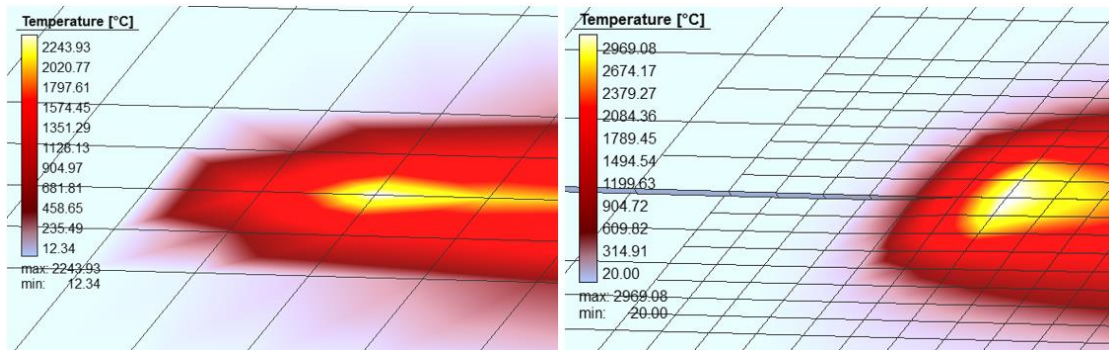


Obrázek 3: Základní typy elementů pro využití v MKP [23]

Každý z těchto elementů je vhodný pro jiný typ úlohy. Pro pevnostní výpočty a topologickou optimalizaci je vhodné použít elementy tetragonální, tyto elementy díky svému tvaru mohou nahradit tvar zkoumaného dílu s vysokou přesností. Pro simulace svařovacích procesů se doporučuje využít hexagonální elementy. [22]

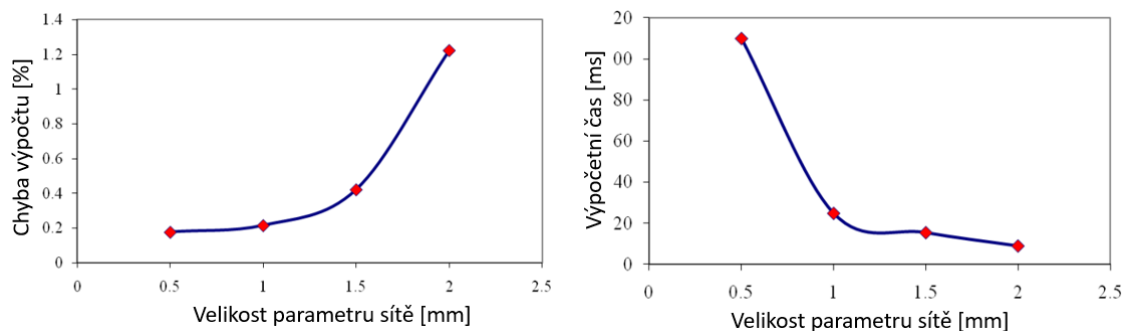
Hustota výpočtové sítě výrazně ovlivňuje výpočetní čas úlohy a také přesnost výsledků, viz obrázek 4. Při omezené hustotě sítě dojde k rychlému výpočtu úlohy, avšak dosažené výsledky mohou být odlišné od reálného procesu. Při vysoké hustotě sítě roste potřebný čas k provedení výpočtu neúměrně se zvýšením přesnosti výpočtu.

Na výslednou přesnost simulace mají vliv také další okrajové podmínky simulace, jako např. tvorba MKP sítě. Volba sítě má výrazný vliv na přesnost výpočtu, viz obrázek 4 a na celkový výpočetní čas.



Obrázek 4: Vliv hustoty sítě na přesnost výpočtu [24]

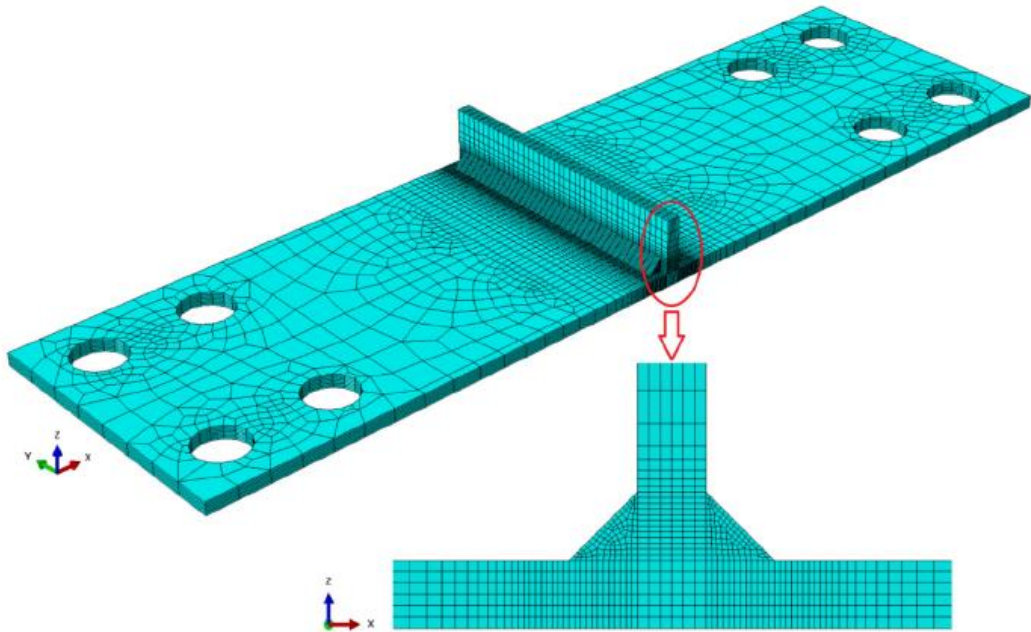
Je nutné najít kompromis mezi přesností výsledků a délkou výpočtu. Od určité jemnosti sítě už zpřesnění výsledku není výrazné a roste pouze výpočetní čas. Ukázka vlivu velikosti parametru sítě na přesnost a výpočetní čas je na obrázku 5. [25, 26]



Obrázek 5: Vliv parametru sítě na výsledky [25]

Z výše popsaného důvodu se pro tvorbu sítě u svarových spojů tyto přístupy kombinují – v místech, kde lze očekávat největší změny teplotní, mechanické a strukturální (tzn. svarový kov a TOO) se obvykle provádí síť hustší než v místě, kde se předpokládá tepelně neovlivněný ZM. Příklad takto vytvořené sítě je viditelný na obrázku 6.





Obrázek 6: Změna hustoty sítě na MKP modelu [27]

Pro MKP výpočet je možné využít několik strategií, kde každá strategie je vhodná pro jiný typ úlohy – objemový výpočet, symetrický výpočet, prostřední plocha, skořepina a další.

### 2.1.2. Specifikace vstupních dat do numerické simulace

Přesná specifikace vstupních dat (vstupů) do simulace je rozhodujícím faktorem pro dosažení výsledku v požadované přesnosti. Množství vstupů, které je nutné přesně specifikovat, je velmi rozsáhlé. Právě množství proměnných v průběhu procesu svařování je největší překážkou pro masivní rozšíření simulace procesu svařování.

Vstupy do simulace se velmi podobají problematice svařitelnosti. V případě simulace je nutné specifikovat tři základní oblasti – Konstrukci svarového spoje, použitý materiál a specifikaci použité technologie. [22, 24]

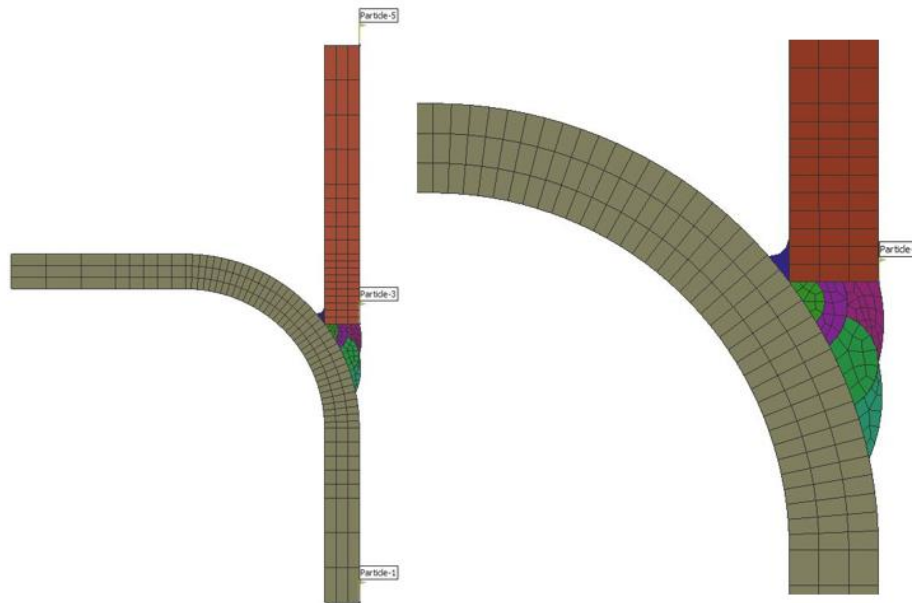
#### Konstrukce svarového spoje

Konstrukce svarového spoje musí být přenesena do simulačního softwaru. Konstrukcí svarového spoje se rozumí skutečné rozměry polotovarů, příprava svarových ploch a typ a rozměr použitého svaru.

Konstrukční řešení svarového spoje je za pomoci specializovaných softwarů zjednodušeno pro potřeby simulace a převedeno na MKP síť. Při specifikaci konstrukce svarového spoje je důležitá snaha o co největší shodu mezi modelem pro simulaci a reálným svařencem. Při tvorbě MKP sítě je velmi důležité vhodně volit její hustotu.

Svarové housenky mohou být modelovány v prostředí simulačních softwarů, avšak jednoduchá generace je výhodná pouze pro velmi jednoduché svarové spoje (jednovrstvé koutové spoje). V případě vícevrstvých koutových a tupých spojů je nutné každou svarovou housenku modelovat na základě rozměrů housenek získaných z příčných řezů.

Příklad konstrukce svarového spoje (včetně svarových housenek) připraveného pro potřeby simulace viz obrázek 7.



Obrázek 7: Připravený svarový spoj pro MKP simulaci

### Použitý materiál

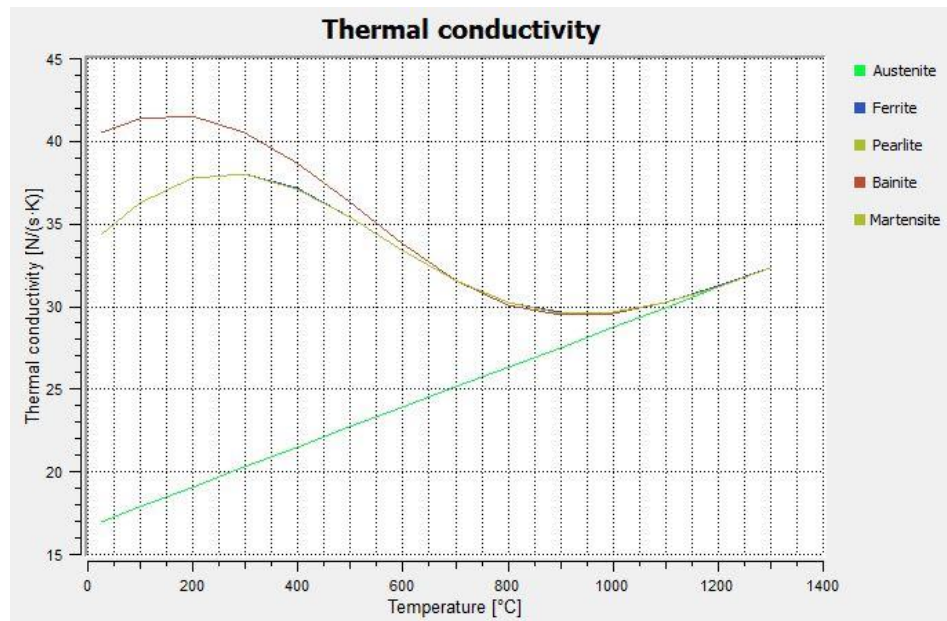
Specifikace materiálových vlastností je kritická pro kvalitní výsledek simulace. V rámci specifikace je nutné určit v závislosti na teplotě jak mechanické vlastnosti – pevnostní a plastické charakteristiky, fyzikální vlastnosti – Hustota  $\rho$ , tepelná vodivost  $\lambda$ , tepelná roztažnost  $\alpha$ , měrná tepelná kapacita  $c$ , a strukturní vlastnosti – fázové transformace a rozpadové křivky.

Veškeré vlastnosti ovlivňují tepelnou bilanci svaru a tepelně ovlivněné oblasti, a mají přímý vliv na vznikající napěťové vztahy a výsledný poměr mezi zbytkovým napětím a deformacemi.

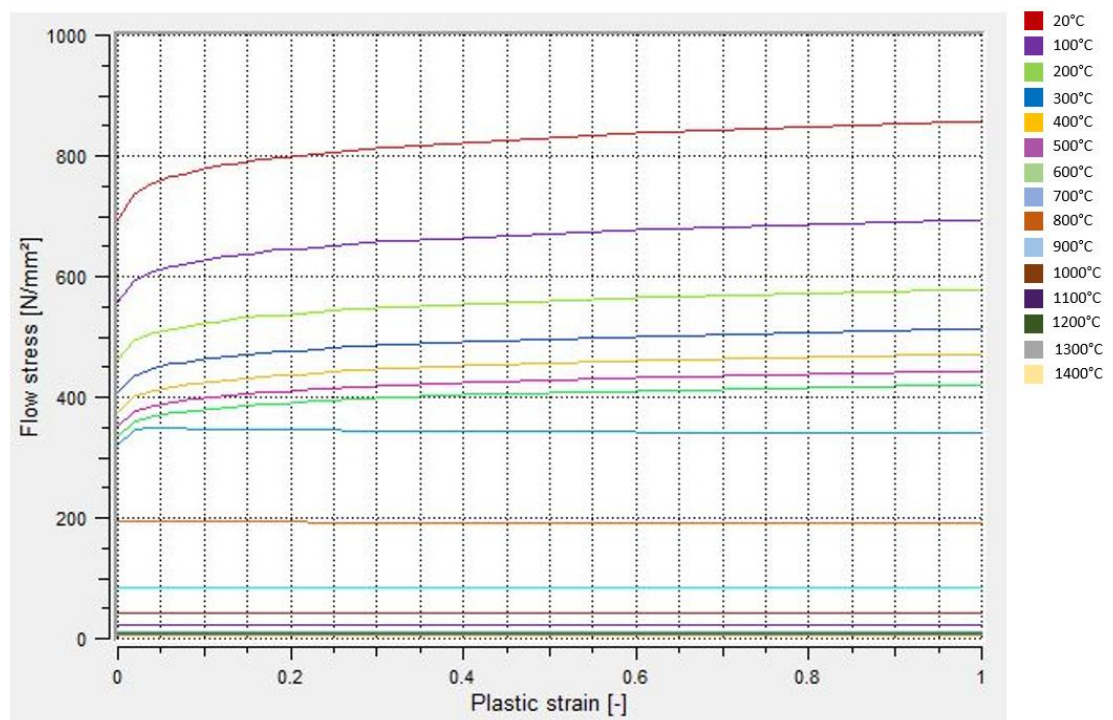
Veškeré materiálové vlastnosti jsou závislé na teplotě. V průběhu svařování prochází základní materiál tepelnými cykly o rozsahu teplot od teploty okolí (20 °C) až po teplotu tavení (u slitin Fe teplot až okolo 1500 °C). Při specifikaci materiálu pro simulaci svařování musí být veškeré vlastnosti specifikovány v uvedeném teplotním rozsahu.

Příklad specifikace fyzikální vlastnosti (tepelná vodivost  $\lambda$ ), viz obrázek 8 a mechanických vlastností (tahové křivky), viz obrázek 9 závislých na teplotě pro materiál S690QL.

U tahových červená barva reprezentuje pokojovou teplotu 20 °C, nejnižší světle žlutá znázorňuje tahovou křivku při teplotě 1400 °C. Ze zobrazených křivek je vidět, že simulační software počítá s postupným snižováním pevnosti se zvyšující se teplotou.

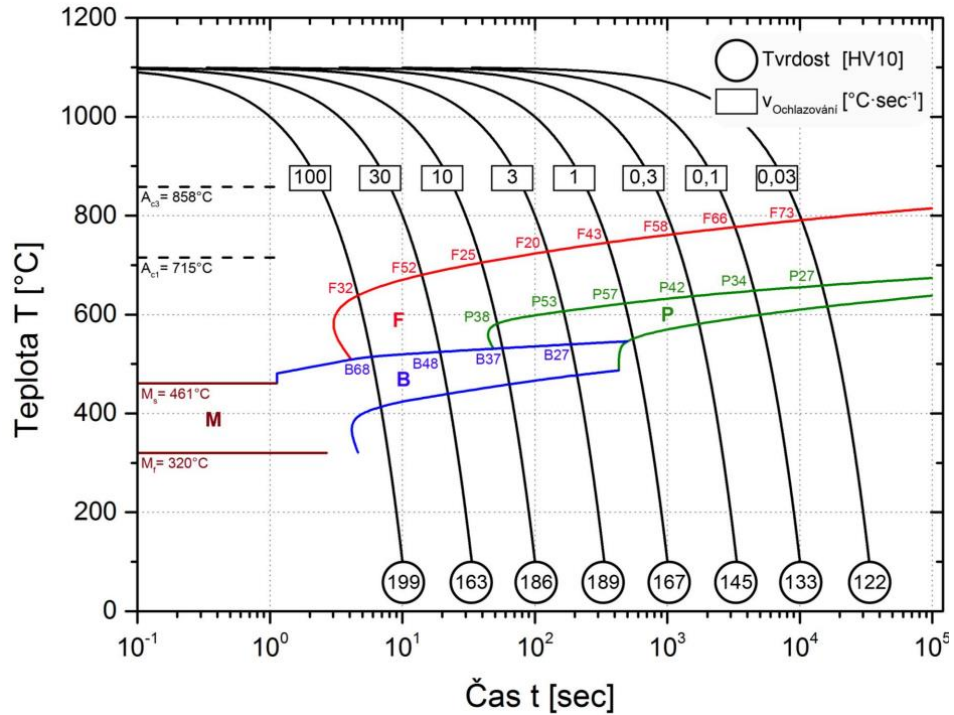


Obrázek 8: Specifikace tepelné vodivosti  $\lambda$  pro jednotlivé struktury v závislosti na teplotě [24]



Obrázek 9: Specifikace tvaru a pozice tahových křivek v závislosti na teplotě [24]

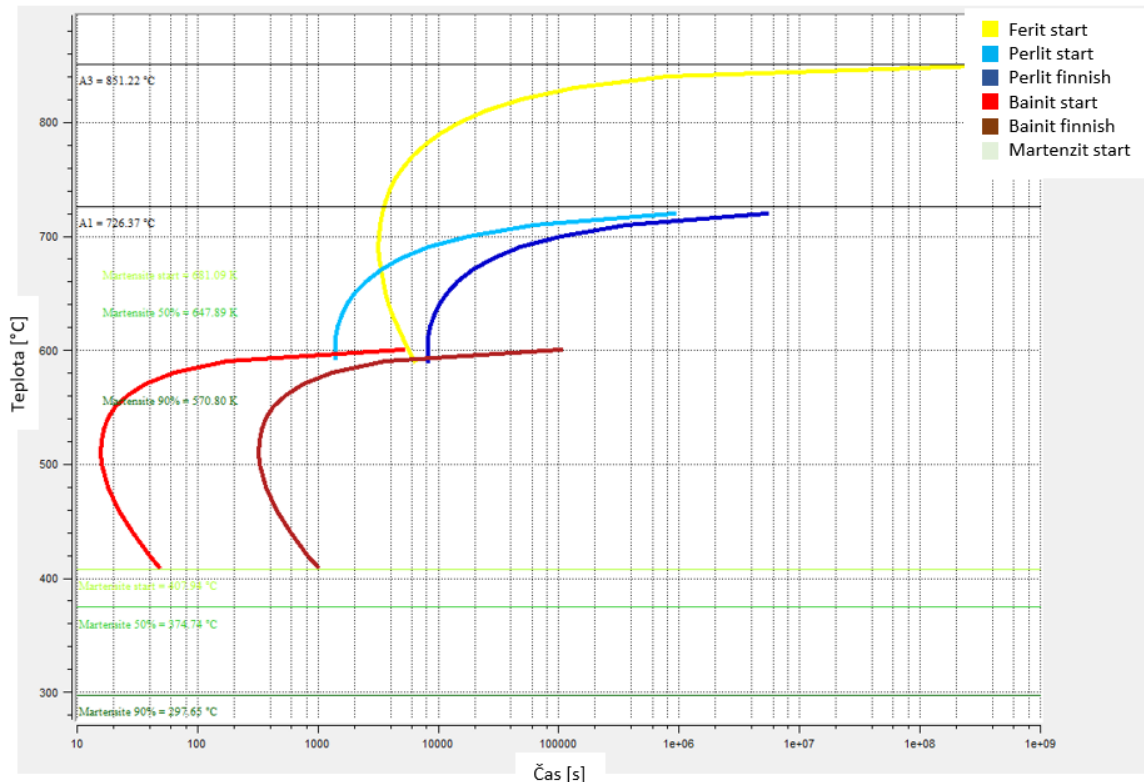
U ocelí s vyšší pevností je také velmi kritickým vstupem do simulace specifikace fázových transformací v průběhu chladnutí svařence. Tyto fázové transformace jsou běžně specifikovány pomocí ARA diagramu (anizotermický rozpad austenitu). Na základě ARA diagramu a rychlosti chladnutí oceli lze vyčíst průběh fázové transformace a výslednou materiálovou strukturu, viz obrázek 10.



Obrázek 10: Příklad ARA diagramu kalitelné oceli [28]

Fázové transformace jsou důležité z několika důvodů – vlivem fázové transformace dochází ke změně mechanických vlastností a tím i k výraznému ovlivnění výsledných deformací. Dále ale také strukturální změny ovlivňují ostatní fyzikální vlastnosti (tepelné apod.), které mají vliv na šíření tepla ve svařenci a tím i na výsledné rozložení napětí a deformací.

Příklad ARA diagramu pro ocel S960QL, ze softwaru Simufact Material, je uveden na obrázku 11.

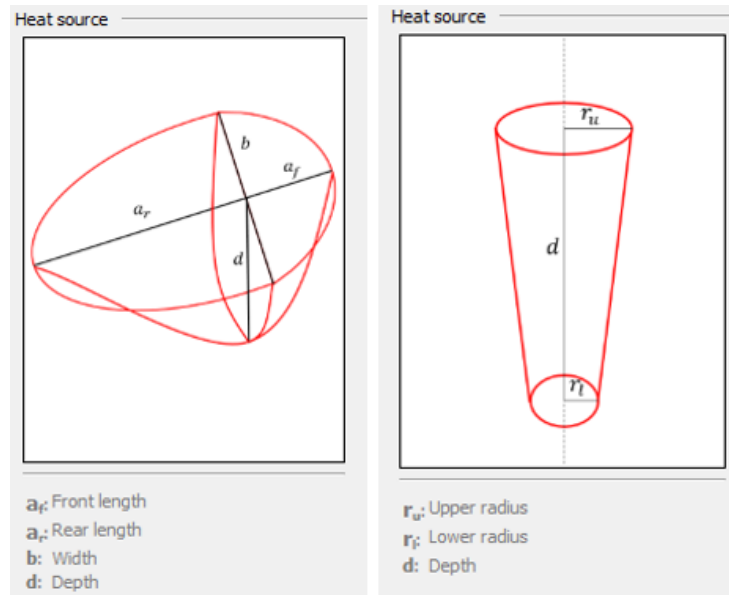


Obrázek 11: ARA diagram konstrukční oceli S960QL

### Specifikace použité technologie

Různé metody svařování je nutné přesně popsat z hlediska působení tepelného zdroje. Hlavní rozdíl mezi metodami je v rozdílu působení tepla a způsobu přívodu a vzniku tepelné energie. Veškeré metody jsou specifikovány vneseným teplem, které se určuje různými způsoby pro různé metody svařování – např. obloukové metody, metody s vysokou koncentrací energie a bodové odporové svařování. Součástí specifikace vneseného tepla je také přiřazení odpovídající teploty předehřevu.

Metody svařování se dále velmi liší ve specifikaci oblasti pro působení tepla. Zdroj tepla u běžných obloukových metod (MAG, TIG, SAW) je specifikován pomocí tavné lázně definované dle Goldaka [29]. Metody s vysokou koncentrací energie je nutné specifikovat pomocí „key-hole“, u těchto metod není možné specifikovat zdroj tepelné energie jako u obloukových metod. Příklad specifikace rozměrů tepelného zdroje pro obloukové metody a pro metody s vysokou koncentrací energie viz obrázek 12. Reálné rozměry tavné lázně lze vyhodnotit např. pomocí makrovýbrusů svařových spojů.



Obrázek 12: Specifikace rozměrů tavné lázně (definice tvaru tepelného zdroje) [24]

Při popisu technologie svařování (tepelného zdroje) pro potřeby simulací je nutné určit trajektorii postupu tepelného zdroje (postup svařování) a použitá podpůrná zařízení (přípravky, upínací zařízení, stehové svary a svařovací stůl).

Použití svařovacích přípravků je jednou z důležitých okrajových podmínek, přípravky ovlivňují jak deformace svařence, tak odvod tepla a tím i teplotní pole svařence. U přípravků je nutné definovat jejich polohu, počet, tuhost a fyzikální vlastnosti tak, aby jejich vlastnosti co nejvíce odpovídali vlastnostem reálných přípravků použitých při experimentu nebo ve výrobě.

### Přenos tepla s okolím v simulačním prostředí

V rámci simulačního softwaru je možné nastavit tepelné a teplotní podmínky v okolí svařence. Základním nastavením je nastavení teploty základního materiálu před začátkem svařování. Pomocí této metody lze jednoduše specifikovat homogenní ohřev svařence.

Stejně tak jako teplotu základního materiálu, tak lze jednoduše nastavit teplotu okolí, kde svařování probíhá. Tím lze simulovat vlivy prostředí, například svařování ve velmi nízkých teplotách.

Abyste teplotní bilance mezi okolím a svařencem fungovaly správně, je nutné specifikovat tři základní tepelné toky – tepelný tok konvencí ( $\dot{Q}_k [\frac{W}{m^2 \cdot K}]$ ), vedení tepla ( $\dot{Q}_v [\frac{W}{m^2 \cdot K}]$ ) a hustotu zářivého toku (emisivita povrchu).

Tepelný tok konvencí je založen na Newtonovu zákonu ochlazování a vedení tepla na Fourierovu zákonu. V základním nastavení simulace jsou obě tyto hodnoty konstantní (nemění se v čase ani teplotě) a dosahují těchto hodnot [24, 30]:

$$\dot{Q}_k = 20 \left[ \frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$$

$$\dot{Q}_v = 1000 \left[ \frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$$

Emisivita povrchu je definována pomocí Stefan-Boltzmanova zákona a je definována jako poměr vyzářené energie reálného tělesa v poměru k vyzáření černého tělesa při stejné teplotě. Při simulacích svařovacího procesu se emisivita používá k výpočtu celkové intenzity záření  $I$  [ $W \cdot m^{-2}$ ], která se určí dle Stefan-Boltzmanova zákona pro šedé těleso (viz výpočtový vztah 1) [73]

$$E = \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot T^4 \quad [W \cdot m^{-2}] \quad (1)[30]$$

Kde:

$E$  = hustota zářivého toku [ $W \cdot m^{-2}$ ]

$\varepsilon$  = emisivita povrchu [/]

$\sigma_0$  = Stefan – Boltzmannova konstanta [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$ ]

$T$  = teplota [K]

V základním nastavení simulace je emisivita nastavena na hodnotu  $\varepsilon = 0,6$  [/] [24]

### 2.1.3. Výstup ze simulace procesu svařování

Z termomechanické simulace procesu svařování lze získat široké spektrum výsledků. Simulace je schopná predikovat: teplotní pole, napěťové stavy, deformace, strukturní změny, a dokonce elektrické vlastnosti svařence v průběhu procesu. Veškeré výsledky jsou proměnné v závislosti na průběhu procesu, takže lze vyhodnotit hodnoty zkoumané proměnné jak na konci procesu, tak v jeho průběhu.

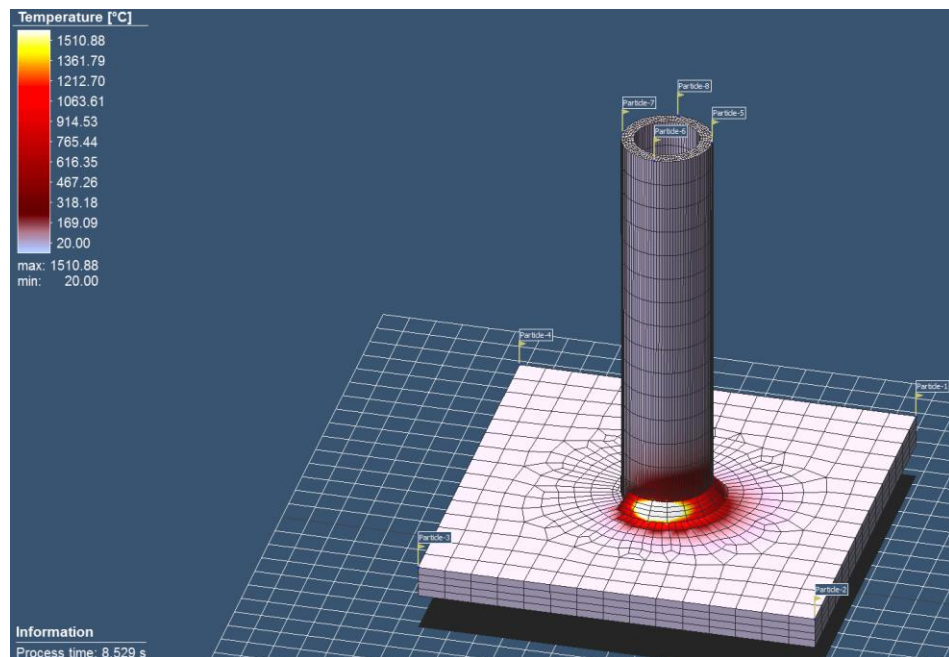
Pro optimalizaci procesu tavného svařování jsou nejdůležitějšími výstupy:

- Teplotní pole
- Působící napětí
- Deformace

#### Teplotní pole

Teplotní pole (viz obrázek 13) lze využít z několika důvodů. Prvním a velice důležitým využitím je hodnocení teplotních cyklů při svařování, neboť hodnocení teplotních cyklů je jedním ze způsobů validace simulace svařovacího procesu. Přenos tepla ze zdroje a jeho odvod materiálem je hlavním důvodem vzniku makrodeformací. Pro dosažení vyhovujících výsledků při predikci deformací je nutnou podmínkou shoda teplotního cyklu u reálného svařence a v simulaci. Teplotní cykly lze také hodnotit za účelem ověření hodnoty teploty interpass, či maximální dosažené teploty ve zvolené části TOO.

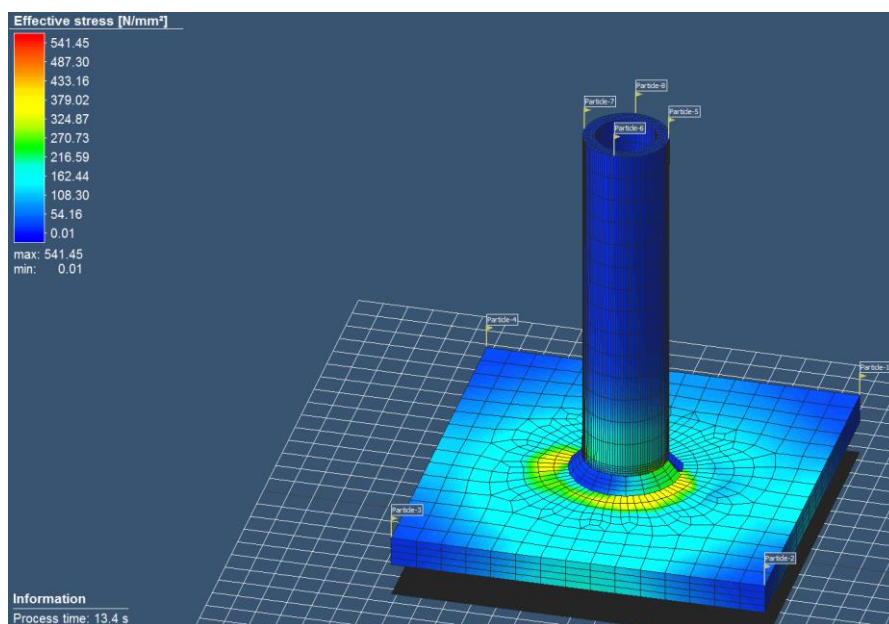
Dalším využitím je hodnocení teplotních map (termogramů), pomocí kterých lze hodnotit šíření tepla ve svařenci.



Obrázek 13: Teplotní pole při svařování

### Působící napětí

Působící napětí (viz obrázek 14) v průběhu procesu způsobuje deformace svařence a může být příčinou vzniku trhlin za tepla a za studena. Cílem hodnocení napětí je efektivně vyhodnotit rozložení napětí v průběhu procesu a po vychladnutí. V případě vzniku vad na svařenci lze pomocí získaných dat ze simulace optimalizovat proces svařování tak, aby se zamezilo jejich opětovnému vzniku.

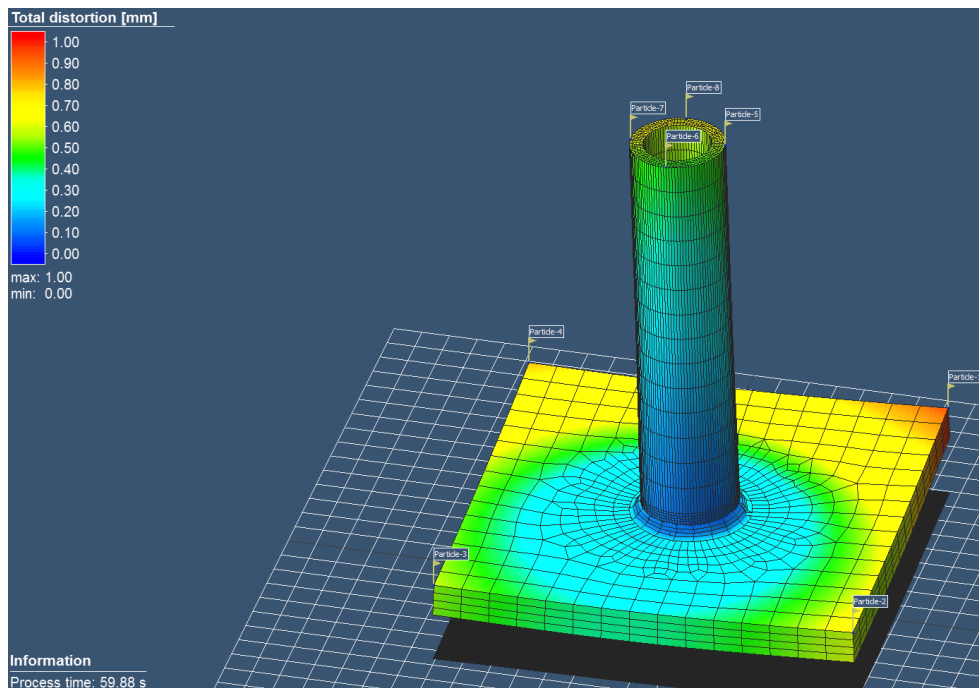


Obrázek 14: Napětové pole při svařování



## Deformace

Deformace (viz obrázek 15) jsou negativním doprovodným jevem procesu svařování. Na základě predikce deformací lze pomocí simulace specifikovat, jaká technologie, metoda, postup svařování, konstrukce svarového spoje nebo konstrukce přípravku je nejefektivnější pro dosažení rozměrových a geometrických tolerancí. Při omezení makrodeformací lze optimalizovat také např. přídatky na obrábění a tím omezit obráběcí čas a celkové náklady na výrobu svařence.



Obrázek 15: Deformace při svařování

Přesnost predikce zkoumané proměnné je velice závislá na kvalitě vstupních dat a na přesnosti specifikace okrajových podmínek.

### 2.1.4. Dostupné simulační sw

Pro simulaci procesu svařování je v současnosti dostupná celá řada softwarů. Všechny softwary fungují na stejném principu (MKP), musejí být zadány stejné vstupy a lze z nich získat stejné výsledky, viz kapitoly 2.1.2 a 2.1.3.

Hlavním rozdílem mezi softwary je jejich rozšířenost a univerzálnost. Mezi velice univerzální MKP softwary patří ABAQUS. Tento software je i velmi rozšířený v akademické sféře a vyniká svojí univerzálností. Pomocí tohoto softwaru lze simulovat i více metodami (2D, symetrické řešení, zjednodušené řešení, tepelné, tepelně-mechanické řešení apod.) Jeho nevýhodou je náročnost užívání. Software je vysoce univerzálním MKP softwarem, a proto je pro jeho ovládání a nastavení potřeba vysoká odborná znalost. [31].

Dalším univerzálním softwarem je ANSYS. Tento software je podobného typu jako ABAQUS, a sám výrobce zmiňuje na svém blogu, že simulace svarových spojů představují výzvu. [32]

Kvůli zjednodušení uživatelského prostředí a snadného rozšíření do průmyslu vzniklo několik zástupců MKP softwarů, které jsou přímo specializovány na technologický proces svařování např. SOPRAS, SYSWELD, FabWeld, Simufact Welding apod.

SYSWELD od společnosti ESI Group byl jedním z prvních softwarů určených pro oblast svařování. Z důvodu dlouhého působení na trhu je rozšířený jak v akademické, tak v průmyslové sféře. Pomocí tohoto softwaru lze předpovědět jak výsledky procesu svařování, tak výsledky tepelného zpracování. Z pohledu svařování je uvedený software schopný simulovat obloukové procesy svařování, svařování elektronovým svazkem, laserové svařování, třecí svařování s promíšením a bodové odporové svařování. [33]

Simufact Welding od společnosti Hexagon je druhým významným zástupcem simulačního softwaru pro technologii svařování. Software je také poměrně rozšířený i v průmyslu a vyniká svojí jednoduchostí ovládání v uživatelském prostředí. Software je schopný simulovat obloukové svařování, svařování elektronovým svazkem, laserové svařování, bodové odporové svařování, ale proti softwaru SYSWELD obsahuje přímo modul také pro pájení či aditivní procesy. [34]

SOPRAS od společnosti SWANTEC se zaměřuje hlavně na bodové odporové svary. Jeho výhodou je predikce pevnosti bodových svarů nebo také možnost simulace nýtování. [35]

FabWeld od společnosti DR.LOOSE je software zaměřený hlavně na obloukové svařování, svařování elektronovým svazkem, laserové svařování a pájení. Stejně jako ABAQUS podporuje mnoho přístupů k řešení úlohy. [36]

### **2.1.5. Simulace svařování vysokopevnostních konstrukčních ocelí**

Stejně tak, jako roste využití ocelí se zvýšenou mezí kluzu v průmyslu, tak i v akademické sféře roste počet výzkumných prací, které se zabývají svařitelností a vlastnostmi vysokopevnostních ocelí po svaření. Pro výzkum využívají vědecká centra různé softwary, většinou jeden z výše zmíněných v kapitole 2.1.4. V této kapitole bude popsán současný stav výzkumu svařitelnosti a dopadů procesu svařování na vysokopevnostní konstrukční oceli, za podpory simulačních softwarů.

Autor disertační práce provedl rozsáhlou rešerši dostupných informačních zdrojů a lze tvrdit, že v oblasti simulace svařování lze nalézt velké množství publikací. Jejich příklady, závěry a zjištění byly uvedeny v předchozím textu teoretické části DP (kapitola 2). Nicméně v oblasti simulací svařování vysokopevnostních ocelí již je podstatně méně publikovaných výsledků a ty nejzásadnější jsou uvedeny níže v následujícím textu.

Ghafouri a kol. [37] se ve své práci věnuje navařování housenky na materiál S960QL a hodnotí přesnost predikce teplotního cyklu a výsledné úhlové deformace po svaření. Pro svůj výzkum využívá termo-mechanickou simulaci s využitím fázové transformace v pevném stavu. Jeho výsledky simulace odpovídají reálnému procesu s menší chybou, tento způsob provádění simulace vysokopevnostních ocelí zajišťuje vyhovující výsledek simulace. Pro simulaci byl použit software Abaqus.

Qu a kol. [38] se věnuje hodnocení predikce výsledných deformací vysokopevnostní oceli BS960E o tloušťce 4,5mm svařované tupým V svarem na jednu housenku, technologií svařováním pod tavidlem. V rámci experimentu do simulace autor zahrnuje fázovou transformaci v pevném stavu a hodnotí rozdíl oproti vynechání této proměnné. Z jeho výsledků jasně plyne, že pro simulaci vysokopevnostních konstrukčních ocelí je nutné zahrnout fázovou transformaci, pro dosažení přesných výsledků. Použitý software není v textu uveden.

Sun a kol. [39] se věnuje hodnocení přesnosti predikce zbytkového napětí za pomoci dvou různých metod – simulace pohybujícího se tepelného zdroje nebo simulace pomocí teplotního cyklu za pomoci softwaru Sysweld. Simulace teplotního cyklu homogenně ohřeje v jednu chvíli celý svarový kov pomocí předem daného teplotního cyklu. Díky tomu lze výrazně snížit požadavek na výpočetní čas. Sun pro svůj experiment použil ocel S960QL a simuloval navařování housenky na plech pomocí TIG metody. Na základě jeho výsledků lze doporučit metodu teplotního cyklu pouze pro hodnocení podélného napětí, příčné napětí a deformace po svaření vykazují u této metody vysokou chybovost.

Ghafouri a kol. [40] se ve své další práci věnuje hodnocení přesnosti predikce deformací oceli S700, která je svařována různými postupy svařování a následně i v kombinaci s upnutím. Jeho výsledky simulace mají dobrou shodu s reálným procesem. Simulace potvrdila, stejně jako reálný proces, že využití upínek více redukuje výsledné deformace než změna postupu svařování. Pro simulaci byl použit software Abaqus.

Weingril a kol. [41] se věnuje simulaci teplotního cyklu a fázových transformací u vícevrstvého svařování při opravě kolejnic z materiálu R350HT. V rámci experimentu hodnotí výslednou strukturu při navrženém procesu svařování, neboť je po svařování nutné ve struktuře zachovat pouze perlit. Výsledkem jeho experimentu je shoda mezi teplotním cyklem a výslednou strukturou mezi reálným svařencem a simulací. Pro simulaci byl použit sw Sysweld.

Sarmast a kol. [42] se věnují porovnání vlivu vícevrstvé opravy na T spoji z ocelí S355J2+N a S960QL na úroveň zbytkového napětí. Pro výpočet ARA diagramu použili autoři software JMatPro. Simulace byla provedena pomocí 2D termomechanické analýzy. Ze závěrů práce lze vyčíst, že vlivem oprav dochází ke zvýšení úrovně zbytkového napětí a u oceli S960QL navíc i ke změnám ve struktuře oceli.

Mente a kol. [43] se věnují simulaci obsahu difúzního vodíku v různých konstrukcích spojů při vícevrstvě svařování oceli o mezi kluzu 1100 MPa. V závěru uvádí, že množství zbytkového obsahu vodíku je ovlivněno jak tloušťkou základního materiálu, tak i typem svaru. S rostoucí tloušťkou množství narůstá z důvodu delší cesty z povrchu na kraj plechu. Tupé svary jsou vhodnější pro snížení obsahu vodíku, neboť dochází k vyššímu prohřátí základního materiálu a tím i ke zrychlení difúze. Pro simulaci byl použit software Ansys.

Jako výsledek uvedené rešerše simulací technologického procesu svařování lze uvést, že výzkum simulací v oblasti deformací vícevrstvého MAG svařování oceli S960QL a vlivu úprav pro omezení deformací není v dostupných zdrojích zastoupen.

## 2.2. Konvenční způsoby svařování

Z dostupných zdrojů lze získat více druhů definic procesu svařování. Jednu, kterou formuloval prof. Faltus v roce 1947 lze uvést formě přímé citace: „*Svařování je spojování kovů v nedělitelný stejnorodý celek za působení tepla a případně i tlaku a případného použití přídavného kovu stejného nebo podobného složení.*“ [44]

Všechny dostupné definice lze ale shrnout v tomto odstavci. Svařování je spojování jednotlivých součástí a dílů v nerozebíratelný celek. Podstatou svařování je vytvoření metalurgického spojení, tzn. spojení založeného na působení meziatomových vazebných sil, které jsou příčinou soudržnosti a pevnosti kovů. K vytvoření svarového spoje je nutno vynaložit určitou energii, která může být mechanická (tzv. metody tlakového svařování), tepelná (tzv. tavné metody svařování) nebo mechanická i tepelná v různých vzájemných poměrech. Základním předpokladem k získání kvalitních spojů požadovaných vlastností je však použití svařitelných materiálů a vhodná volba způsobu a postupu svařování. [44, 45, 46, 47]

Svařitelnost materiálu (schopnost materiálu vytvořit vyhovující spoj) je založena na vzájemném působení tří hlavních faktorů – základní a přídavný materiál, konstrukce svarového spoje a použitá technologie. Pro dosažení vyhovujícího spoje je nutné zvolit jejich správnou kombinaci. Detailnější popis problematiky svařitelnosti je uveden v kapitole 2.4. [45]

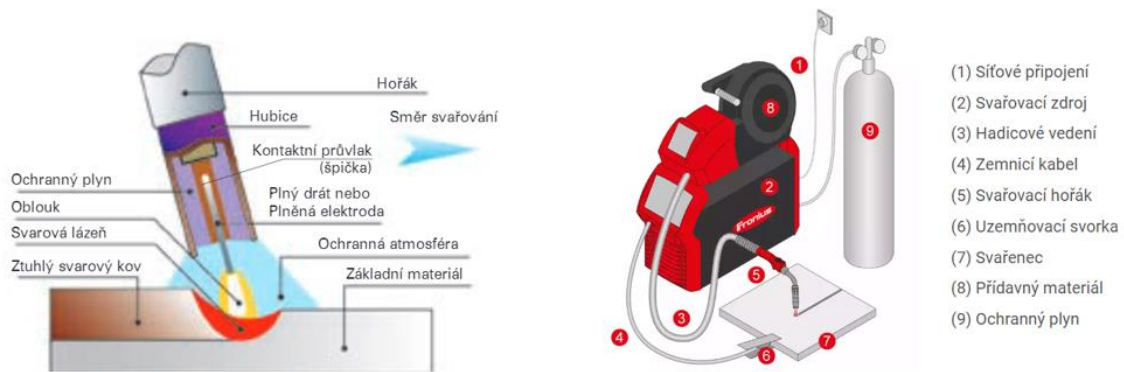
Jak již bylo naznačeno výše v textu, svařování je možné dělit dle způsobu vzniku spoje na svařování působením tlaku (např. svařování tlakem za studena), působením tepla a tlaku (např. svařování elektrickým odporem) a působením tepla (např. svařování elektrickým obloukem). Každá ze zmíněných skupin metod obsahuje řadu zástupců. Detailní rozdělení je uvedeno v normě EN ISO 4063, včetně způsobu značení jednotlivých metod [48].

Další části disertační práce se zaměřují na svařování elektrickým obloukem v aktivní ochranné atmosféře (MAG), neboť se jedná o dnes průmyslově nejrozšířenější metodu a zároveň u této metody dochází k výrazným makroskopickým deformacím.

### 2.2.1. Svařování MAG

Metoda MAG (dle EN ISO 4063 - metoda 135) – svařování elektrickým obloukem odtavující se elektrodou v atmosféře aktivního ochranného plynu je průmyslově nejpoužívanější metodou pro svařování ocelových materiálů. Principem metody je hoření elektrického oblouku mezi základním materiálem a přídavným materiálem, přiváděným do hořáku, ve formě drátu namotaného na cívce, pomocí automatického kladkového podavače. Hoření probíhá v ochranné atmosféře aktivního plynu – nejčastěji směšného plynu Ar + CO<sub>2</sub> v různých poměrech (detailní rozdělení a způsob značení ochranných

atmosféru je uvedeno v normě EN ISO 14175). Schéma hoření el. oblouku mezi hubicí a základním materiálem společně s popisem všech základních komponent pro svařování metodou MAG je uvedeno na obrázku 16. Tato metoda lze modifikovat i jako metodu MIG, kde se ale jako ochranná atmosféra využívají pouze interní plyny a lze ji využít pro svařování neželezných kovů a jejich slitin. Kromě použití jiného typu ochranné atmosféry je princip metody totožný. [49, 50]



Obrázek 16: Svařování metodou MAG [49, 50]

Důvodem, proč je tato metoda široce rozšířená v průmyslu je její jednoduchost, univerzálnost, snadná mechanizace a automatizace, vysoký výkon odtavení a široká možnost použití modifikovaných procesů.

Její výraznou výhodou je možnost použití různých modifikací, pomocí kterých lze hospodárně dosáhnout požadovaných svarových spojů. Tato metoda nabízí modifikace pro omezení množství vneseného tepla (CMT, Cold Arc apod.), pro zvýšení stability procesu pomocí pulzního svařování, modifikace pro získání hlubokého průvaru (ForceArc) nebo modifikace pro maximalizaci výkonu odtavení (vícedrátové svařování - např. tandemové a twin svařování). [51]

Pro disertační práci bude použitý běžný MAG svařovací proces bez modifikací.

### 2.2.2. Zvyšování efektivity výrobních procesů

Zvyšování efektivity výrobních procesů je současným trendem. Ke zvýšení efektivity svařování dochází souběžně v několika rovinách. První rovinnou je zvyšování stupně automatizace v průmyslových podnicích, pomocí mechanice, automatizace a robotizace. Tento způsob je výhodný jak z pohledu efektivity (produktivity), tak z pohledu nákladů a životního prostředí. Dalším směrem je použití jiné metody spojování materiálu než běžného obloukové svařování. Dochází k nárůstu podílu modifikovaného MAG procesu, laserového svařování, svařování třením s promíšením, lepení a MIG pájení. Dále roste využití metod týkající se 3D tisku kovových výrobků. Jedním ze zástupců je metoda WAAM, která používá pro navařování el. oblouk a přídavný materiál ve formě plného drátu. Poslední oblastí, kde dochází k výraznému vývoji a postupnému zavádění do průmyslového sektoru je IoT. Tento vývoj se označuje jako iniciativa Průmysl 4.0 (tzv. 4. průmyslová revoluce [52]). S tím souvisí např. možnost při výrobním procesu sbírat data jak týkající se procesu výroby produktu, tak stavu zařízení. Díky sběru a analýze dat

lze pak lépe řídit výrobní proces, redukovat náklady na plýtvání zdroji (např. množství ochranného plynu), ale stejně tak náklady na údržbu. [53]

Zlatým grálem průmyslové výroby je pružná automatizace, která je schopná se rychle přizpůsobit nově vyrobenému výrobku. Proto vznikají nové metody a technologie ve výrobním procesu, jako například parametrické programování automatických linek, 3D strojní vidění pro automatizované řízení procesu bez zásahu člověka, použití kolaborativních robotů, propojení virtuálního s reálným světem a zapojení umělé inteligence. [54, 55]

Pojmem „efektivita“ není chápán pouze jako zvýšení výkonu odtavení, je to také zvýšení opakovatelnosti a kvality výrobků. Při omezení ručního svařování lze dosáhnout omezení makroskopických deformací, neboť výsledné deformace po svařování jsou ovlivňovány rychlostí svařování, výkonem odtavení apod. Se zvyšujícím se poměrem mechanizovaných, automatizovaných a robotických procesů roste důraz na kvalitní přípravu materiálu a vybavení pracoviště. Je nutné dělit základní materiál ve vysokém stupni přesnosti pomocí metod s vysokou koncentrací energie (plasma, laser), kde přesnost dělení je vzhledem k rozměrům výpalku definována v normě EN ISO 9013 (*Tepelné dělení – Klasifikace tepelných řezů - Geometrické požadavky na výrobky a úchylky jakosti řezu*). Dále frézovat svarové plochy a použít velice tuhé a funkční přípravky společně s polohovadly s vysokou přesností opakovatelnosti polohy. Kvalitní příprava procesu výrazně ovlivňuje výsledné makroskopické deformace. Proto jednou z cest, jak omezit makroskopické deformace svařence je zlepšení přípravy a omezení ručního svařování. [56]

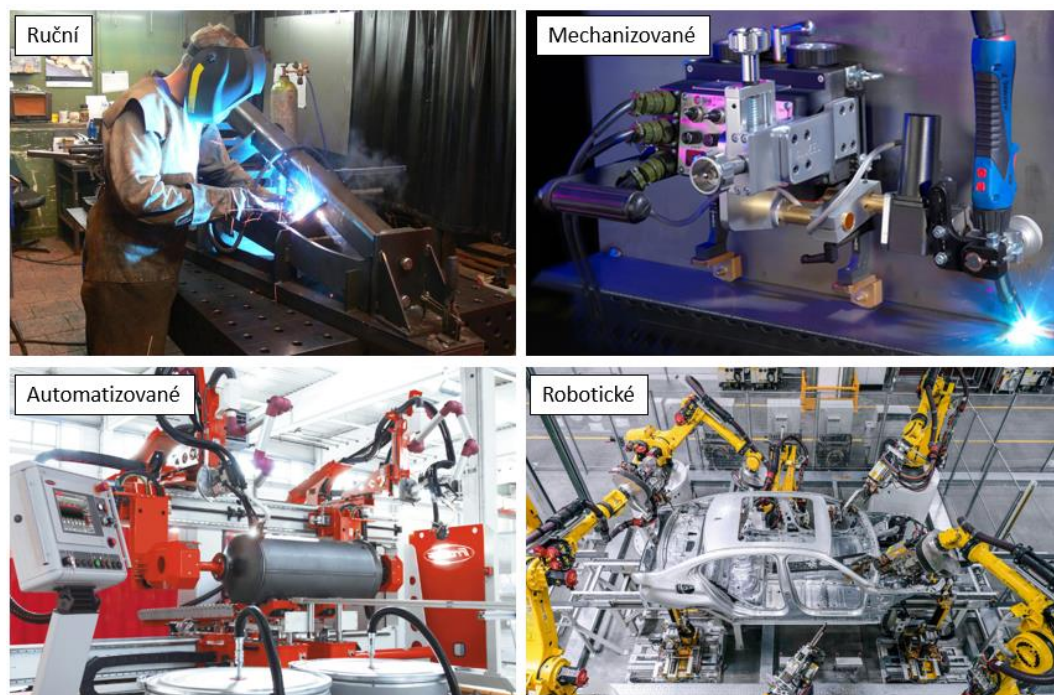
Ruční svařování je velmi univerzální. Jeho největší výhodou je možnost svařovat v rámci kusové výroby ve všech polohách a skoro za všech podmínek. Jeho nevýhodou je nízká opakovatelnost výroby a vysoká závislost výsledku svařování na zkušenosti svářeče.

Prvním krokem pro zvýšení efektivity je použití mechanizovaného svařování. Mechanizace poskytuje zařízení, které usnadňuje práci. Do mechanizovaného svařování se často řadí i svařování MAG, neboť přídavný materiál je mechanizovaně podáván do místa hoření el. oblouku. Pro mechanizaci je také typické použití svařovacích traktorů např. při použití metody svařování pod tavidlem. Tyto traktory jsou použity na mechanickou manipulaci s hořákem a výhradně se používají na dlouhé rovné svary na nosnících nebo na obvodové svary u potrubních systému nebo tlakových nádob. [54]

Dalším stupněm je použití automatizovaných systémů. Automatizace se vyznačuje používáním řídicích systémů, kde automatizace snižuje potřebu přítomnosti člověka při vykonávání činnosti. Tyto systémy jsou často využity pro specifický typ výrobku nebo svarového spoje (např. lineární svary) a často jsou spojeny s tvrdou automatizací. Systémy je složité upravit na jiný typ výroby, často se používají jako jednoúčelové, a proto je jejich využití nejefektivnější pro hromadnou, opakující se výrobu. [54]

Posledním stupněm je využití robotizovaných pracovišť. Robotizace je využití zařízení, které kombinuje manipulační schopnost, automatickou činnost (práce dle programu) a univerzálnost (lze upravit pro jiný typ výrobku). Pracoviště se vyznačují vysokou produktivitou, snadným řízením a možností úprav v případě širšího portfolia výrobků. Tyto systémy jsou ale často spojeny s nejvyššími investičními náklady, neboť celý výrobní proces musí být pro robotizaci upraven – příprava základního materiálu, design přípravků, použití polohovadel a současně bezpečnostní vybavení pracoviště. [55, 56]

Porovnání pracoviště pro ruční, mechanizované, automatizované a robotické svařování, viz obrázek 17.



Obrázek 17: Porovnání metod svařování z pohledu stupně mechanizace [57, 58, 59, 60]

### 2.3. Vysokopevnostní konstrukční oceli

Mezi vysokopevnostní konstrukční oceli se obvykle označují materiály, které vykazují vyšší mez kluzu jak 420 MPa. Detailní rozdělení vysokopevnostních konstrukčních ocelí dle jejich typu, je uvedeno v tabulce 1. [61]

Tabulka 1: Rozdělení vysokopevnostních konstrukčních ocelí [61]

EN 10028 Oceli pro tlakové nádoby <i>Steels for press vessels</i>				EN 10025-3, 4 Oceli pro svařované konstrukce <i>Steels for welded structure</i>			EN 10149-2 Oceli k tažení <i>Steels for deformation</i>			EN 10025-6 Zušlechťené vysokopevné oceli <i>Quenching and tempered steels</i>		
Ocel Steel	N	M	Q	Ocel Steel	N	M	Ocel Steel	M	N	Ocel Steel	Q	QA
P420 <sup>a</sup>	–	M ML1 ML2		S420	N NL	M ML	S420	MC	NC			
P460	N NH NL1 NL2	M ML1 ML2	Q QH QL2	S420 S460	N NL	M ML	S460	MC		S460	Q QL QL1	
P500	–	–	Q QH QL2				S500	MC		S500	Q QL QL1	A AL
							S600	MC	–			
										S620	Q QL QL1	A AL
							S650	MC	–			
P690			Q QH QL2							S690	Q QL QL1	A AL
							S700	MC				
							S740	MC				
							S890	MC		S890	Q QL QL1	
							S960	MC		S960	Q QL	
										S1100	Q QL	v normě CSN EN 10025-6 ještě není uvedena

<sup>a</sup> –  $R_e$  N/mm<sup>2</sup> (MPa), N – normalizované jemnozrnné oceli, A – precipitačně vytvrzené jemnozrnné oceli,  
H – oceli pro namáhání za vyšších teplot, L – oceli pro namáhání za nižších teplot

Vysokopevnostní konstrukční oceli využívají kombinaci metod pro zvýšení pevnosti. Jednotlivými opatřeními jsou: zpevnění intersticiálním roztokem uhlíku v železe, zpevnění substitučními prvky, zpevnění tvorbou Cottrellových atmosfér uhlíku, zpevnění fázovou transformací, zpevnění hranicemi zrn, zpevnění dislokační strukturou a zpevnění vyvolané přítomností precipitátů. [61, 62]

U vysokopevnostních konstrukčních ocelí se na celkové pevnosti a výsledných vlastnostech výrazně podílí hlavně mechanismus zpevnění hranicemi zrn, který je popsán Hall-Patchovým vztahem (2, 3). Tyto vztahy popisují vliv střední velikosti zrna na pevnost a houževnatost (Přechodovou teplotu). V případě redukce středního průměru zrna dojde ke zvýšení meze kluzu materiálu a současně k poklesu přechodové teploty. Tato kombinace je skvělou kombinací pro konstrukční oceli. [62, 63]

$$R_e = \sigma_0 + K_z d_z^{-\frac{1}{2}} \quad (2) \quad [63]$$

Kde

- $R_e$  = mez kluzu [ $Nmm^{-2}$ ]
- $\sigma_0$  = třecí napětí mřížky [ $Nmm^{-\frac{3}{2}}$ ]
- $K_z$  = konstanta [ $Nmm^{-\frac{3}{2}}$ ]
- $d_z$  = střední velikost zrna [mm]



$$T_p = T_0 - kd_z^{-\frac{1}{2}} \quad (3) \quad [63]$$

Kde:

- $T_p$  = přechodová teplota polykrystalu [°C]
- $T_0$  = přechodová teplota [°C]
- $k$  = konstanta [ $^{\circ}\text{Cmm}^{\frac{3}{2}}$ ]
- $d_z$  = střední velikost zrna [mm]

Tento typ konstrukčních ocelí je někdy nazýván také jako mikrolegované konstrukční oceli z důvodu malého obsahu legur zjemňující zrna (Nb, Ti, V, Al) v obsahu kolem 0,15 %. Legury pomáhají tvořit zrna na začátku při heterogenní krystalizaci a také v průběhu svařování zamezují růstu austenitického zrna. Teplota tavení stabilních karbidů překračuje 1250 °C. [45, 64]

Vysokopevnostní oceli se dodávají ve třech různých stavech (označovaných doplňkovými značkami N, M (TM), Q), kde každý z nich má své specifické vlastnosti.

Stav „N“ představuje „Normalizačně žíhané/válcované“ oceli. Tento typ dosahuje nejnižších pevností, protože svoje vlastnosti získává skoro výhradně díky jemnozrnné struktuře. Oceli se vyskytují v jakostech S235N – S460NL. Díky normalizaci po řízeném válcování dosahuje materiál nejvyšších hodnot rázové houževnatosti a tažnosti ze všech popisovaných stavů. Dodání těchto ocelí je řízeno normou EN 10025-3 (*Výrobky válcované za tepla z konstrukčních ocelí – Část 3: Technické dodací podmínky pro normalizačně žíhané/normalizačně válcované svařitelné jemnozrnné konstrukční oceli*). Díky použití řízeného válcování a normalizačního žíhání vstupuje materiál do výrobního procesu s nejnižší úrovní zbytkových napětí. Proto tyto oceli lze svařovat bez předeřevu až do kombinované tloušťky 50 mm. [45, 64]

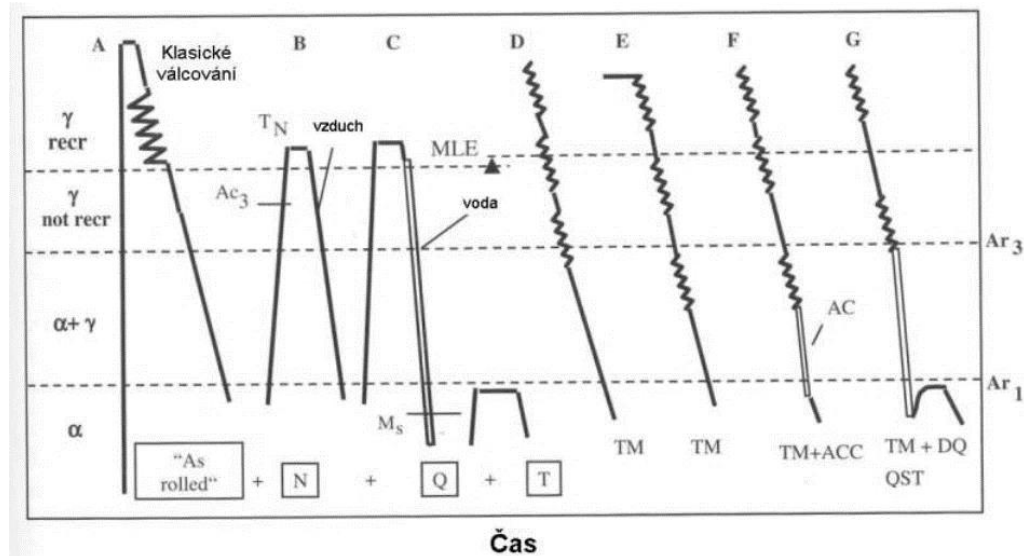
Stav „M“ (TM) představuje termomechanicky zpracované oceli. Oceli se vyskytují v jakostech od S420MC – S960MC. U těchto ocelí dochází po řízeném válcování k termomechanickému zpracování, kde dochází ke tváření nestabilního austenitu či martenzitu při chlazení oceli. Ocel tedy získává své vlastnosti hlavně díky jemnozrnné struktuře v kombinaci s deformačním zpevněním. Dodání těchto druhů ocelí specifikuje norma EN 10025-4 (*Výrobky válcované za tepla z konstrukčních ocelí – Část 4: Technické dodací podmínky pro termomechanicky válcované svařitelné jemnozrnné konstrukční oceli*). Pro tento typ oceli je typické, že při dosažení stejných mechanických vlastností jako u stavu „Q“, má nižší uhlíkový ekvivalent. Díky tomu lze svařovat větší tloušťky bez předeřevu, avšak v průběhu svařování dochází k výraznějšímu poklesu pevnostních vlastností (zvýšená náchylnost na působení teploty) v tepelně ovlivněné oblasti v důsledků vyžíhání (rekrytalizace a zotavení). [61, 62, 65]

Vysokopevnostní konstrukční oceli s označením „Q“ jsou v zušlechťeném stavu (konstrukční oceli s vyšší mezí kluzu v zušlechťeném stavu). Jedná se o zaručeně svařitelný typ oceli, kde chemické složení a mechanické vlastnosti specifikuje norma EN

ISO 10025-6 (*Výrobky válcované za tepla z konstrukčních ocelí - Část 6: Technické dodací podmínky pro ploché výrobky z ocelí s vyšší mezí kluzu v zušlechtěném stavu*). Oceli se vyskytují v jakostech od S460Q až do S1300QL. Oceli typu Q se vyskytují ještě ve variantě QL, kde L ve značce materiálu předepisuje, že hodnota nárazové práce při teplotě  $-40\text{ °C}$  musí být alespoň 27 J. Ocel obsahuje omezené množství uhlíku ( $\leq 0,25\%$ ) a legujících prvků. Svých vlastností dosahuje hlavně pomocí jemnozrnné materiálové struktury a fázové transformace získané po procesu řízeného válcování. Zušlechtění je typ tepelného zpracování, které se skládá z kalení a následného popouštění. Při kalení dochází vlivem ochlazení nadkritickou rychlostí ke vzniku nerovnovážné struktury (bainit, martenzit). Touto fází materiálová struktura výrazně zvyšuje svoji pevnost, avšak s nízkou houževnatostí. Při následném popouštění (žihání) dochází k přeměně zbytkového austenitu společně se snížením zbytkového napětí ve struktuře, které vyvolalo kalení. Tím dochází k nárůstu houževnatosti struktury, takže výsledkem kalení je struktura s výrazně vyššími pevnostními vlastnostmi při ideálně minimálním ovlivnění houževnatosti. [45, 61, 62]

Při popouštění dochází k výraznému ovlivnění struktury. Strukturální změny v materiálu jsou silně závislé na použité teplotě popouštění. Při teplotě  $100\text{ °C} - 250\text{ °C}$  dochází k rozpadu martenzitu na  $\epsilon$ -karbid a nízkouhlíkový martenzit. Následně při teplotě mezi  $230\text{ °C}$  a  $280\text{ °C}$  dochází k rozpadu zbytkového austenitu. Při vyšších teplotách popouštění  $300\text{ °C} - 400\text{ °C}$  dochází k precipitaci, vzniku cementitu a výše popouštěného martenzitu. Použití nejvyšší teploty popouštění (větší jak  $600\text{ °C}$ ) snižuje dislokační zpevnění oceli a proto se využívá velmi omezeně. [61]

Znázornění postupu výroby jemnozrnných vysokopevnostních konstrukčních ocelí (N, Q, M), viz obrázek 18. Ocel A představuje ocel pouze válcovanou, bez následného tepelného zpracování. Ocel A + B představuje válcovanou ocel s následnou normalizací. Ocel A+C představuje ocel válcovanou s následným zušlechtěním (kalení + popouštění). Dalšími typy ocelí v obrázku 18 jsou oceli D a E, kde u obou dochází k řízenému válcování již mimo oblast stabilního austenitu. Ocel F představuje termomechanicky zpracovanou ocel, kde po tváření nestabilní struktury dochází navíc ke zrychlenému ochlazování. Poslední ocel G je stejná jako ocel F, avšak po rychlém ochlazování došlo ještě k popouštění.



Obrázek 18: Výroba vysokopevnostních konstrukčních ocelí [45]

Disertační práce je zaměřena na použití vysokopevnostních konstrukčních ocelí v zušlechťeném stavu, proto v další části práce budou uvedeny hodnoty chemického složení a mechanických vlastností pouze pro tento typ ocelí (QL – viz předchozí text).

Příklad mechanických vlastností a chemického složení pro S960QL je uveden v tabulce 2 a v tabulce 3.

Tabulka 2: Mechanické vlastnosti S960QL [65]

Mechanické vlastnosti S960QL				
Materiál	Mez kluzu Rp0,2 [MPa]	Mez pevnosti Rm [MPa]	Tažnost A [%]	Rázová houževnatost KV -40°C [J]
S960QL	> 960	980-1150	> 10	> 27

Tabulka 3: Chemické složení S960QL [65]

Prvek	Chemické složení [% hm.]								
	C	Si	Mn	P	S	Al	Nb	Ti	V
S960QL	≤ 0,22	≤ 0,86	≤ 1,80	≤ 0,025	≤ 0,012	≤ 0,013	≤ 0,07	≤ 0,07	≤ 0,14

## 2.4. Svařitelnost vysokopevnostních konstrukčních ocelí

Jak bylo zmíněno v předchozí kapitole, vysokopevnostní konstrukční oceli dosahují svých vlastností pomocí kombinace jednotlivých metod pro zvýšení pevnosti, hlavně ale zušlechťení a jemnozrnnosti oceli. Z důvodu této kombinace je nutná zvýšená technologická kázeň při svařování.

Při navrhování svařovacího procesu je nutné omezit negativní účinky teplotních cyklů při svařování na základní materiál.

### 2.4.1. Uhlíkový ekvivalent

Obsah uhlíku v základním materiálu ovlivňuje schopnost materiálu vytvářet základný stav. S rostoucím obsahem uhlíku v základním materiálu se zvyšuje pravděpodobnost vzniku křehké základné struktury (martenzitické fáze) a tím i křehkost a citlivost na vznik trhlin za studena (vodíkové praskání) svarových spojů. Jinými slovy, uhlík zvyšuje prokalitelnost a tím zhoršuje svařitelnost. Účinným nástrojem pro zamezení vzniku trhlin je správné řízení teplotního cyklu pomocí vhodně zvoleného tepelného příkonu a použitím předehřevu základního materiálu před svařováním. [45, 62]

Uhlíkový ekvivalent je číselné vyjádření vlivu chemického složení základního materiálu v porovnání s ekvivalentním obsahem uhlíku. Pro vyjádření uhlíkového ekvivalentu se využívá řada empiricky stanovených výpočtových vzorců (např. CE a CET) vhodných pro určité skupiny materiálů. Vzorce a jejich limity jsou uvedeny v normě EN 1011-2. V EN 1011-2 jsou uvedeny výpočtové vztahy, které se dnes nejvíce používají (CEV CET) = ty, které se dnes používají do tzv. atestů (dokumentů kontroly podle EN 10 204). Existují ovšem i další vztahy pro výpočet uhlíkového ekvivalentu. [67]

Obě verze výše zmíněných uhlíkových ekvivalentů CEV a CE jsou v normě EN 1011-2 navrženy pro určení teploty předehřevu pro eliminaci vodíkového praskání (trhliny za studena). V normě je popsáno, že metoda AC.2 pro eliminaci vodíkového praskání u nelegovaných, jemnozrnných a nízkolegovaných ocelí platí převážně, nikoli však výhradně pro uhlíkovo-manganové typy ocelí. Pro metodu A se využívání uhlíkový ekvivalent CE. Pro vyjádření ekvivalentu  $CE = CE1 = CEV$  se využívá výpočtového vzorce (4). [43]

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} \quad (4) [67]$$

Metoda výpočtu uhlíkového ekvivalentu AC.2. zvýrazňuje obsah slitinových prvků nelegovaných jemnozrnných a nízkolegovaných ocelí, obsah difúzního vodíku a kombinovanou tloušťku. Z mikrolegujících prvků je uveden pouze vanad (V). Výpočet je vhodný pro oceli vyrobené pomocí ingotové výroby oceli.

Metoda BC.3 pro eliminaci vodíkového praskání u nelegovaných, jemnozrnných a nízkolegovaných ocelí platí převážně, nikoli však výhradně pro nízkolegované vysokopevnostní oceli. Tato metoda využívá uhlíkového ekvivalentu CET. Pro výpočet hodnoty ekvivalentu CET se využívá vzorce (5). [68]

$$CET = C + \frac{Mn+Mo}{10} + \frac{Cr+Cu}{20} + \frac{Ni}{40} \quad (5) [67]$$

Výpočet uhlíkového ekvivalentu BC.3 je založen na vlivu chemického složení spojeného s tvorbou trhlin indukovaných vodíkem za studena, včetně vlivu mikrolegujících prvků, reálné tloušťky plechu, difúzního vodíku a tepelného příkonu. Teplotou předehřevu se řídí také ochlazovací doba  $t_{8/5}$ , která určuje strukturu tepelně ovlivněné oblasti svarového spoje. Metoda je vhodná pro oceli mikrolegované jemnozrnné, vyrobené pánvovou metalurgií.

Výpočtové vzorce uhlíkových ekvivalentů jsou omezeny chemickým složením materiálů. V normě EN 1011-2 jsou pro jednotlivé typy ocelí uvedeny limity, kdy je možné svařovat bez předehřevu.

Porovnání uhlíkových ekvivalentů pro vybrané pevnostní třídy konstrukčních ocelí viz tabulka 4.

Tabulka 4: Porovnání CET a CE (CEV) vybraných ocelí [68]

		S355J2		S460ML		S460QL		S690QL	
		Limit ČSN 10025-2	Typické složení	Limit ČSN 10025-2	Typické složení	Limit ČSN 10025-2	Typické složení	Limit ČSN 10025-2	Typické složení
Chemické prvky [hm. %]	C	≤ 0,22	0,17	≤ 0,16	0,08	≤ 0,20	0,15	≤ 0,20	0,16
	Si	≤ 0,55	0,45	≤ 0,60	0,45	≤ 0,80	0,45	≤ 0,80	0,3
	Mn	≤ 1,60	1,5	≤ 1,70	1,65	≤ 1,70	1,5	≤ 1,70	1,3
	P	≤ 0,025	0,018	≤ 0,025	0,011	≤ 0,020	0,012	≤ 0,020	0,012
	S	≤ 0,025	0,015	≤ 0,020	0,002	≤ 0,010	0,05	≤ 0,010	0,005
	Nb	-		≤ 0,05	≤ 0,04	≤ 0,06	0,017	≤ 0,06	≤ 0,04
	V	-		≤ 0,12	-	≤ 0,12	-	≤ 0,12	-
	Ti	-		≤ 0,05	-	≤ 0,05	-	≤ 0,05	-
	Mo	-		≤ 0,20	-	≤ 0,70	0,115	≤ 0,70	0,37
	Ni	-		≤ 0,80	0,19	≤ 2,0	-	≤ 2,0	0,15
	Cu	≤ 0,55		≤ 0,55	0,17	≤ 0,50	-	≤ 0,50	0,08
	Cr	-		≤ 0,30		≤ 1,50	-	≤ 1,50	0,4
B	-		-		≤ 0,005	-	≤ 0,005	≤ 0,003	
CE	-	<b>0,42</b>	-	<b>0,39</b>	-	<b>0,39</b>	-	<b>0,54</b>	
CET	-	<b>0,32</b>	-	<b>0,26</b>	-	<b>0,26</b>	-	<b>0,35</b>	

S rostoucí pevností základního materiálu roste jeho obsah uhlíku, obsah legujících prvků a tím i uhlíkový ekvivalent. Vliv uhlíkového ekvivalentu na svařitelnost je patrný z tabulky 5.

Tabulka 5: Vliv CE na svařitelnost [69]

Uhlíkový ekvivalent (CE)	Svařitelnost	Předehřev
do 0,35	Vynikající	Není nutný
0,36 - 0,40	Velmi dobrá	Doporučený
0,41 - 0,45	Dobrá	Nutný
0,46 - 0,50	Dostatečná	Nutný
přes 0,50	Špatná	Nutný

Detailní popis volby teploty předehřevu podle uhlíkového ekvivalentu stanoveného Metodou AC.2 a Metodou BC.3 je uveden v kapitole 2.4.5. 1.1.1. Eliminace vodíkového praskání – volba předehřevu.

## 2.4.2. Tepelný příkon

Tepelný příkon  $Q$  [ $\text{kJ}\cdot\text{mm}^{-1}$ ] vyjadřuje tepelnou energii vnesenou na jednotkovou délku svarového spoje.

Výpočet vneseného tepla (tepelného příkonu) pro obloukové způsoby svařování, se provádí dle vzorce (6) uvedeného v EN 1011-2.

$$Q = k \cdot \frac{U \cdot I}{v} \cdot 10^{-3} \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{mm}} \right] \quad (6) [67]$$

Kde :

- Q - tepelný příkon [kJ/mm]
- k – koeficient účinnosti metody svařování [/]
- U – napětí na oblouku, měřené co možno nejbliže oblouku [V]
- I – svařovací proud [I]
- v – rychlost svařování [mm/s]

Tepelný příkon je základní technologický ukazatel, pomocí kterého lze hodnotit tepelné ovlivnění základního materiálu při svařování. Tepelný příkon je funkcí zvolené metody svařování (resp. tepelné činnosti metody) a parametrů použitých pro svařování. Chemické složení a mechanické vlastnosti základního a přídavného materiálu neovlivňují jeho výslednou hodnotu.

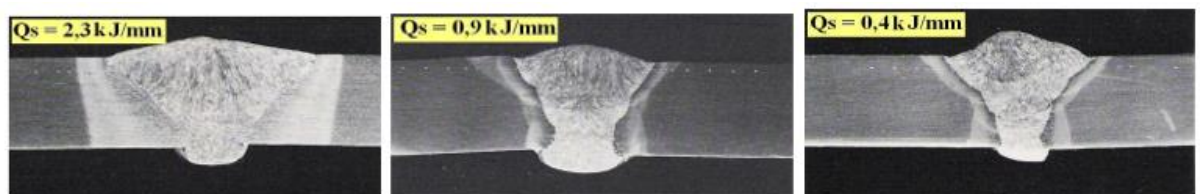
Při navrhování svařovacího procesu je znalost tepelného příkonu, stejně jako znalost uhlíkového ekvivalentu, kritická pro zajištění vyhovujícího svarového spoje.

Přehled koeficientů tepelných účinností jednotlivých metod svařování viz tabulka 6.

*Tabulka 6: Přehled koeficientů účinností jednotlivých metod svařování [67]*

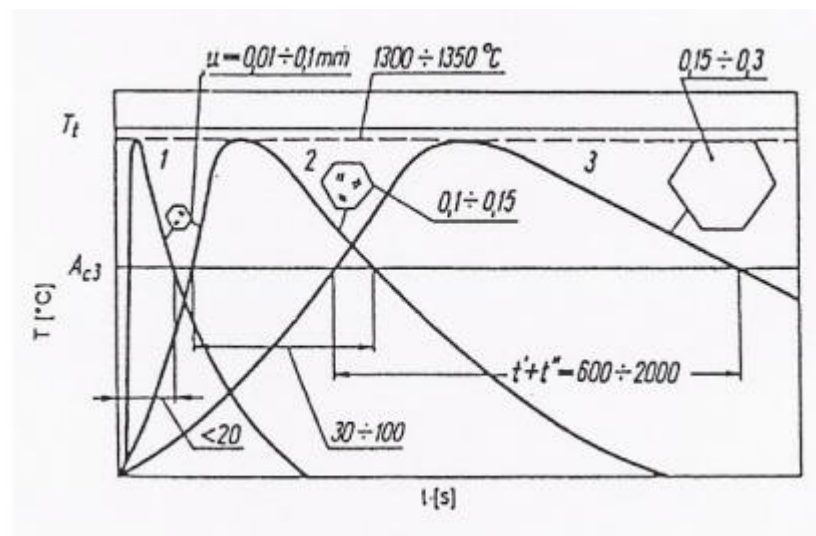
Číslo metody	Metoda svařování	k
12	svařování pod tavidlem	1,0
111	ruční obloukové svařování obalenou elektrodou	0,8
131	obloukové svařování tavící se elektrodou v inertním plynu; MIG svařování	0,8
135	obloukové svařování tavící se elektrodou v aktivním plynu; MAG svařování	0,8
114	obloukové svařování plněnou elektrodou bez ochranného plynu	0,8
136	obloukové svařování tavidlem plněnou elektrodou v aktivním plynu	0,8
137	obloukové svařování tavidlem plněnou elektrodou v inertním plynu	0,8
141	obloukové svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu; TIG svařování	0,6
15	plazmové svařování	0,6

Použitý tepelný příkon výrazně ovlivňuje velikost tepelně ovlivněné oblasti (TOO) základního materiálu. S rostoucím tepelným příkonem dochází k rozšíření TOO a k většímu tepelnému ovlivnění základního materiálu. Znázornění vlivu tepelného příkonu na rozměry TOO, viz obrázek 19.



*Obrázek 19: Vliv tepelného příkonu na rozměry TOO [70]*

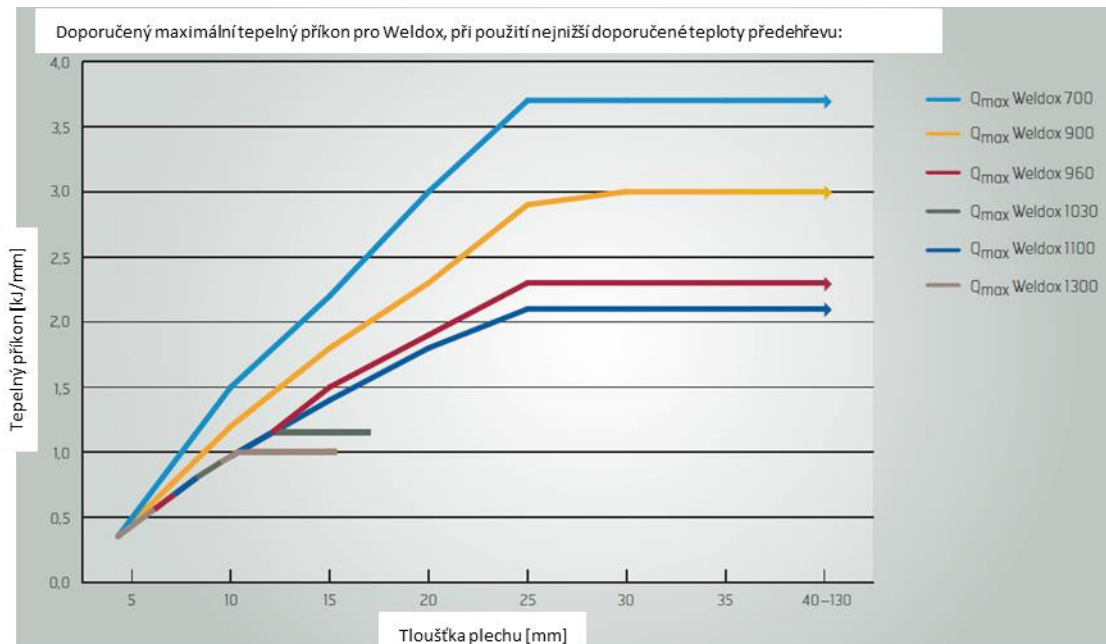
Jednotliví zástupci svařovacích technologií jsou spojeni s různými tepelnými příkony. Vlivem použitého zdroje svařovacího proudu, požadovaného přenosu kovu a rozměrům přídavných materiálů, dosahují různé technologie různých tepelných příkonů, a tím i různých tepelných cyklů a tím i tepelného ovlivnění základního materiálu. Na obrázku 20 je znázorněn teplotní cyklus jednotlivých metod svařování: MMA - 111 (1), SAW – 121 (2), ESW – 72 (3). Na obrázku 20 jsou znázorněny teplotní cykly jmenovaných metod (závislost teploty  $T$  [°C] na čase  $t$  [s]) a přibližné velikosti zrn při chladnutí základního materiálu, jejichž rozdílný nárůst je způsobený zvolenou metodou svařování a jejím teplotním cyklem. [45]



Obrázek 20: Vliv použité technologie na tepelný příkon a tepelné ovlivnění materiálu [45]

Použití vhodného tepelného příkonu je základní podmínkou pro vytvoření vyhovujícího svarového spoje. V případě správně zvoleného tepelného příkonu lze vytvořit vyhovující svarový spoj bez vad, o požadovaných vlastnostech a s minimálními náklady.

Dodavatelé základního materiálu předepisují pro dodávané třídy materiálů maximální tepelný příkon, který lze pro svařování využít bez nadměrného negativního ovlivnění. Příklad předpisu maximálního tepelného příkonu pro ocelí Weldox (StrenX) od společnosti SSAB viz obrázek 21. Číselná hodnota za označením Weldox představuje zaokrouhlenou hodnotu meze kluzu materiálu, tzn Weldox 700 dosahuje meze kluzu 700 MPa a Weldox 1300 meze kluzu 1300 MPa.



Obrázek 21: Maximální dovolené vnesené teplo doporučené výrobcem, u ocelí typu Weldom [66]

Z obrázku 21 lze vyčíst, že se zvyšující se pevností základního materiálu dochází k omezení maximálního doporučeného vneseného tepla.

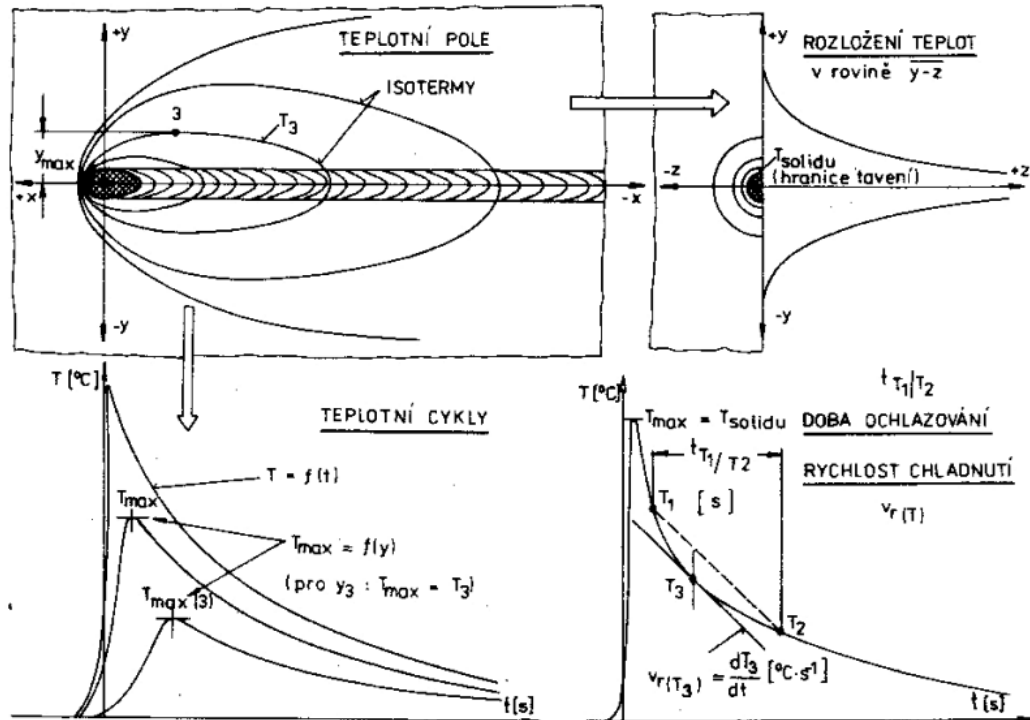
### 2.4.3. Hodnocení teplotních cyklů – $t_{8/5}$

#### Teplotní pole

Vlivem svařování dochází k ohřevu svarového kovu a vzniku tepelně ovlivněné oblasti. Při ohřevu a následném chlazení dochází k šíření tepla v materiálu. Toto teplotní ovlivnění svařovaného materiálu se nazývá teplotní pole, viz obrázek 22.

V případě, že se pro libovolný bod na svařenci vytvoří zobrazení závislosti teploty na čase, vznikne záznam tzv. teplotního cyklu.





Obrázek 22: Teplotní pole, teplotní cyklus [55]

Rozměr a tvar teplotního pole je závislý jak na podmínkách zdroje tepla (rozměr, mohutnost, rychlost pohybu atd.), tak na podmínkách odvodu tepla (teplota okolí, typ materiálu, koeficient tepelné vodivosti materiálu atd). [55]

Matematický popis teplot kolem zdroje tepla popisuje Fourierova diferenciální rovnice šíření tepla (7). Pro výpočet je nutné předpokládat mnoho okrajových podmínek, jako např. materiál je homogenní, izotropní a v tuhém stavu.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{c \cdot \rho}{\lambda} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (7)$$

Kde:

$T$  = teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$x, y, z$  = souřadnice polohy [cm]

$c$  = měrná tepelná kapacita [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]

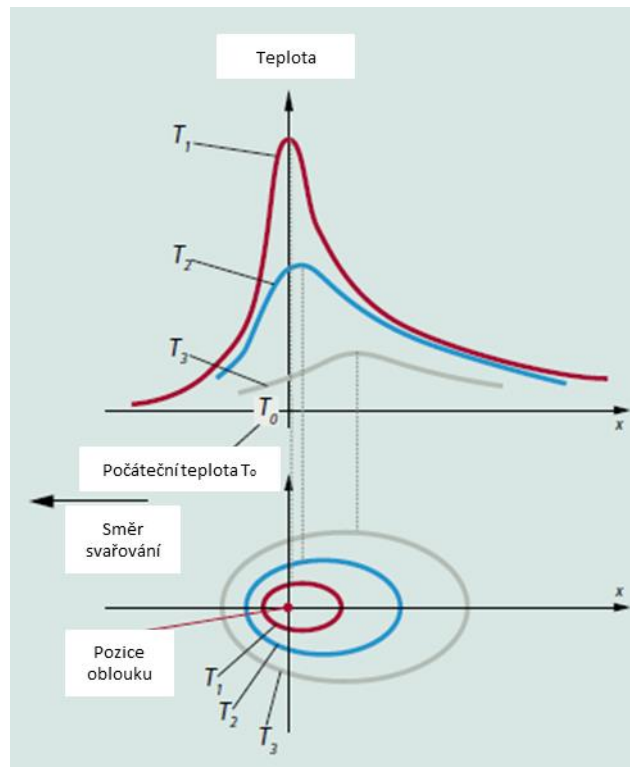
$\rho$  = hustota (měrná hmotnost) [ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ]

$\lambda$  = součinitel tepelné vodivosti [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]

$t$  = čas [s]

### Parametr $t_{8/5}$

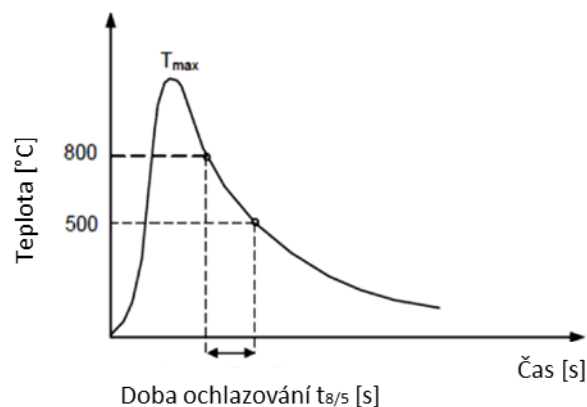
Při svařování dochází k lokálnímu ovlivnění materiálu intenzivním pohybujícím se zdrojem tepelné energie. K ovlivnění dochází pomocí teplotního cyklu, kterým prochází všechny tepelně ovlivněné části svarového spoje, viz obrázek 23.



Obrázek 23: Teplotní cykly oblastí svarového spoje [66]

K nejintenzivnější změně teploty v rámci teplotního cyklu dochází v místě hoření elektrického oblouku – v ose svarového spoje. Pokud se místo měření vzdaluje od osy svaru, dochází ke změně tvaru teplotního cyklu. Čím je místo měření dále, dochází ke snížení rychlosti ohřevu, snížení maximální teploty cyklu a také ke snížení rychlosti ochlazování. Proto při hodnocení teplotních cyklů je nutné počítat s těmito změnami, způsobenými polohou měření.

Pro hodnocení teplotních cyklů u vysokopevnostních konstrukčních ocelí je využíván parametr  $t_{8/5}$  [s]. Tento parametr znázorňuje kritickou dobu ochlazování, tj. čas, za který se materiál ochladí v kritickém pásmu největších strukturálních změn, tzn. z teploty  $800^{\circ}\text{C}$  na teplotu  $500^{\circ}\text{C}$ , viz obrázek 24.

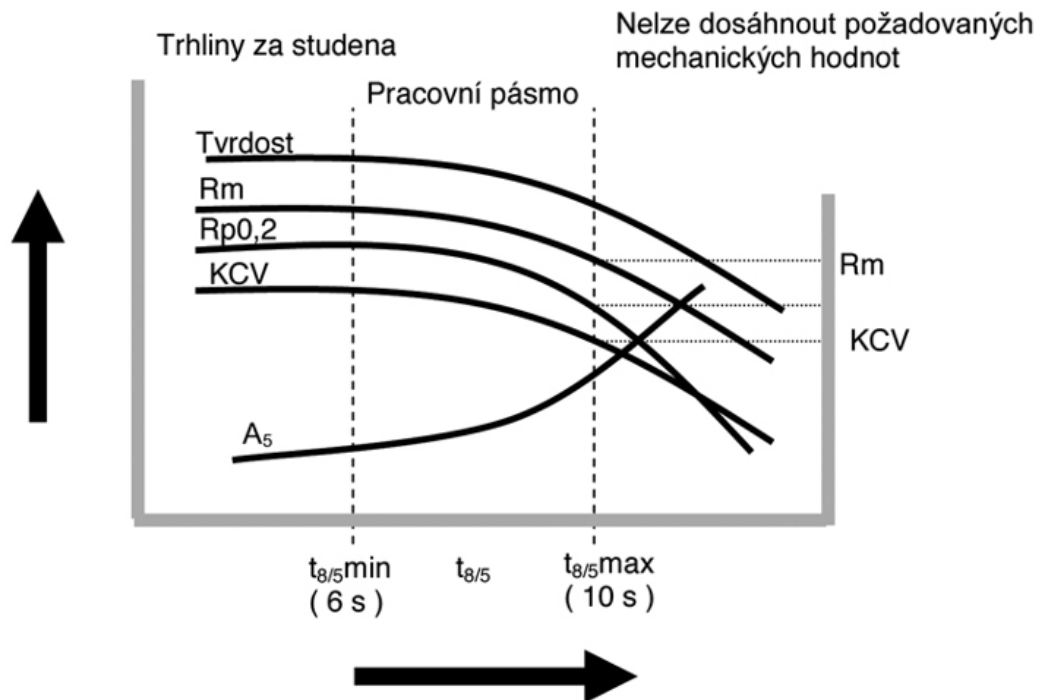


Obrázek 24: Znázornění parametru  $t_{8/5}$  [71]

Dodržení předepsaného intervalu parametru  $t_{8/5}$  je velmi kritické pro vytvoření svarového spoje o požadovaných vlastnostech.

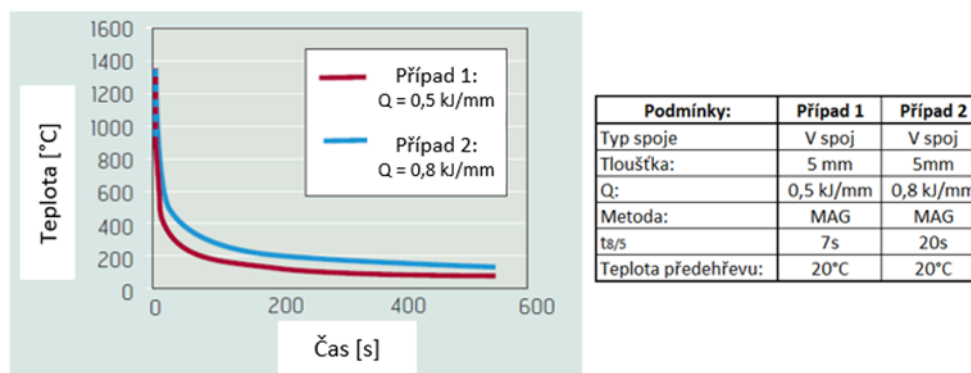
V případě krátkého času (např.  $t_{8/5} = 3$  s) dochází vlivem velmi rychlého ochlazení ke vzniku křehké zakalené struktury. Díky této křehké a velmi tvrdé struktuře se výrazně zvyšuje citlivost na praskání za studena. Naopak při pomalém ochlazování dochází k růstu zrna a tím i ke ztrátě pevnostních vlastností jemnozrnných ocelí. [62, 66]

Znázornění vlivu doby  $t_{8/5}$  na vlastnosti svarového spoje viz obrázek 25.



Obrázek 25: Vliv  $t_{8/5}$  na mechanické vlastnosti svarového spoje [72]

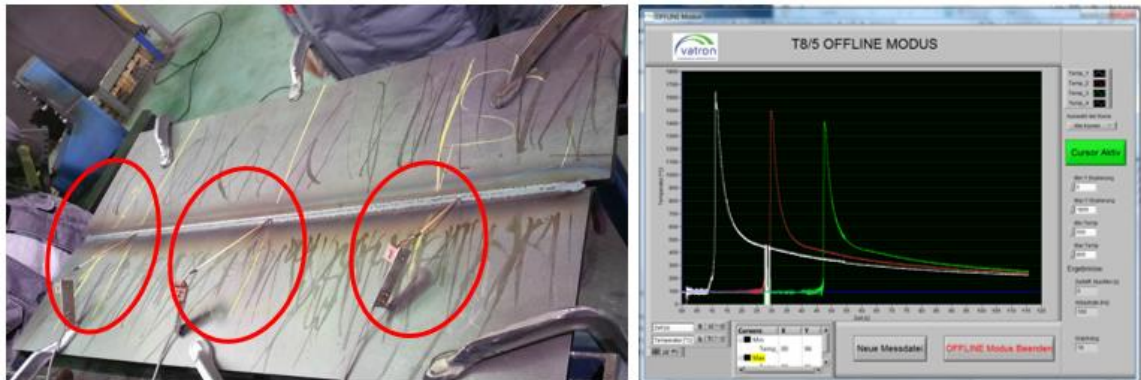
Parametr  $t_{8/5}$  je výrazně ovlivňován použitým tepelným příkonem a tím tedy i použitou metodou svařování, resp. použitými procesními parametry, viz obrázek 26.



Obrázek 26: Vliv tepelného příkonu ( $Q$ ) na dobu ochlazení  $t_{8/5}$  [66]

Parametr  $t_{8/5}$  lze určit dvěma způsoby – přímým měřením a výpočtem. Přímé měření se provádí umístěním termočlánků do svarové lázně a získání teplotního cyklu, viz obrázek 27. Z teplotního cyklu lze následně odečíst hodnotu  $t_{8/5}$ . Tato metoda je nákladná, pracná a nelze jí použít pro navrhování procesu, spíše se hodí pro ověřování v rámci

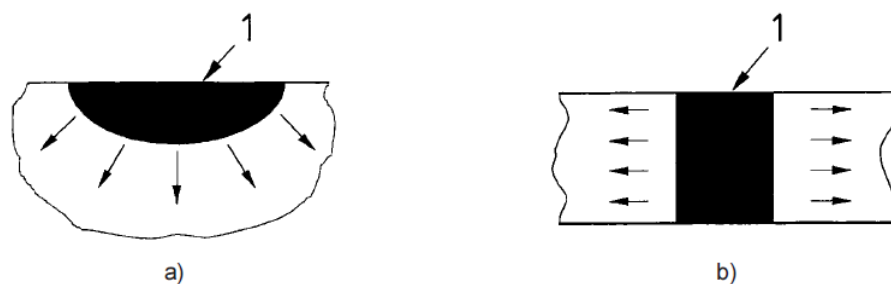
tvorby WPQR. Náklady spojené s touto metodou měření jsou dány vysokou cenou termočlánků, protože pro přímé měření z tavné lázně je potřeba použít speciální termočlánky s keramickým obalem, které navíc při každém měření přicházejí o značnou část své délky. Pracnost je ovlivněna velikostí tavné lázně. Tento typ termočlánku je nutné umístit za hořák přímo do tavné lázně. Svařovací parametry a rychlost pohybu robota tedy výrazně ovlivňují proveditelnost metody.



Obrázek 27: Přímé měření  $t_{8/5}$  pomocí termočlánků

Výpočtem lze  $t_{8/5}$  určit několika způsoby. Základem je výpočtový vztah uvedený v EN1011-2 (viz rovnice 8 a 9 uvedené dále v textu této kapitoly).

Při výpočtu doby ochlazování  $t_{8/5}$  je důležité určit, zda se u zvoleného svařového spoje vyskytuje při svařování dvojrozměrný nebo trojrozměrný tepelný tok. Dvojrozměrný tepelný tok představuje takový typ svařového spoje, kde se jedná o plech relativně malé tloušťky, tzn. kde tloušťka plechu má rozhodující vliv na dobu ochlazování. Naopak třírozměrný tepelný tok se vyskytuje u plechů relativně velké tloušťky, tzn. kde tloušťka již neovlivňuje dobu ochlazování, neboť teplo se šíří i ve směru tloušťky, tzn. směrem do materiálu. Znázornění typů tepelných toků je uvedeno na obrázku 28. [67]



Legenda

1 Svařová housenka

a) Trojrozměrný tepelný tok

Relativně tlustý plech; tloušťka plechu neovlivňuje dobu ochlazování

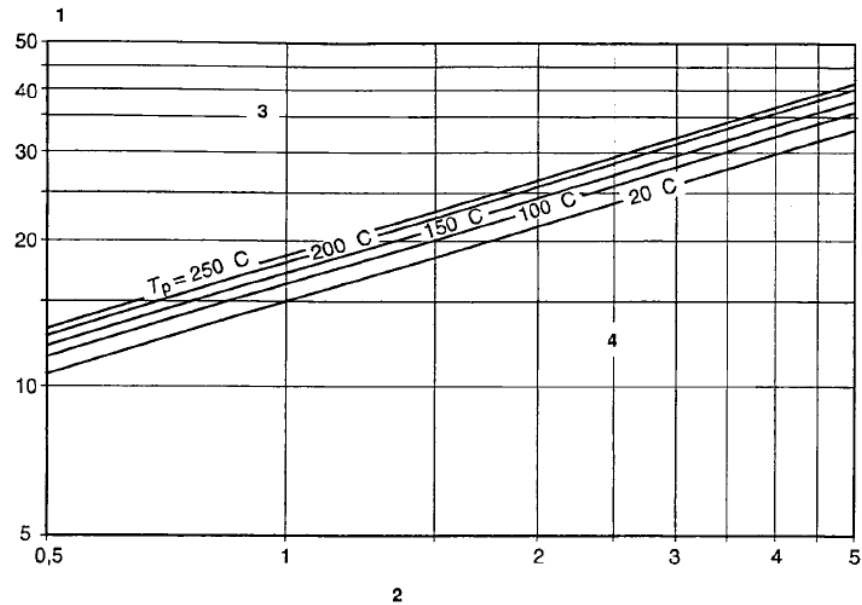
b) Dvojrozměrný tepelný tok

Relativně tenký plech; tloušťka plechu má rozhodující vliv na dobu ochlazování

Obrázek 28: Druh tepelného toku při svařování [67]

Pro určení typu tepelného toku lze využít graf, který je součástí normy EN 1011-2. Graf zobrazuje oblasti, ve kterých je vyskytují zmíněné typy toků. Volba typu teplotního

toku je závislá na tloušťce použitého základního materiálu a použitým tepelném příkonu. Graf je uveden na obrázku 29.





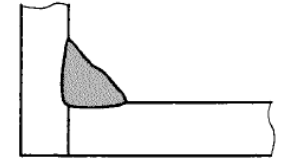
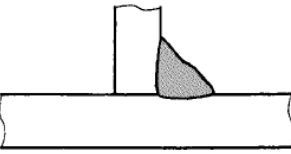
Legenda

- 1 Přechodová tloušťka  $d_t$  (mm)
- 2 Tepelný příkon (kJ/mm)
- 3 Trojrozměrný tepelný tok
- 4 Dvojměrný tepelný tok

Obrázek 29: Graf pro volbu typu teplotního toku [67]

Další podmínkou, pro správný výpočet  $t_{8/5}$  je volba součinitele tvaru svarového spoje. Tento součinitel znázorňuje vliv typu svarového spoje na tepelnou bilanci a odvod tepla. Tabulka se součiniteli tvaru je uvedena v tabulce 7.

Tabulka 7: Součinitele tvaru dle typu svaru [67]

Tvar svaru		Součinitel tvaru	
		$F_2$ dvojměrný tepelný tok	$F_3$ trojměrný tepelný tok
Svarová housenka na plechu		1,0	1,0
Mezi housenkami u tupých svarů		0,9	0,9
Jednovrstvý koutový svar na koutovém spoji		0,9 až 0,67	0,67
Jednovrstvý koutový svar na T-spoji		0,45 až 0,67	0,67

Po volbě typu teplotního toku a definování součinitele tvaru pro zvolený typ svarového spoje lze přistoupit k samotnému výpočtu doby  $t_{8/5}$ . Výpočet se provádí dle níže uvedených výpočtových vztahů (8, 9).

a) Dvojměrný tepelný tok

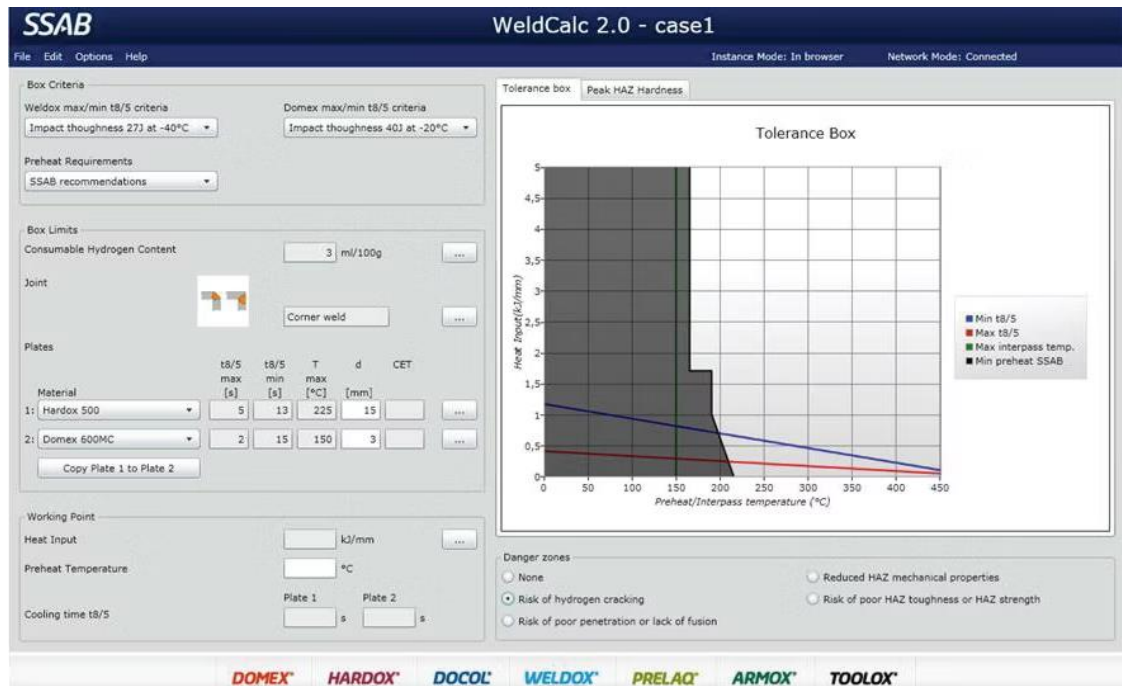
$$t_{8/5} = (4300 - 4,3 \cdot T_0) \cdot 10^2 \cdot \frac{Q^2}{d^2} \cdot \left( \frac{1}{500 - T_0} - \frac{1}{800 - T_0} \right) \cdot F_2 \quad (8) [67]$$

b) Trojměrný tepelný tok

$$t_{8/5} = (6700 - 5 \cdot T_0) \cdot Q \cdot \left( \frac{1}{500 - T_0} - \frac{1}{800 - T_0} \right) \cdot F_3 \quad (9) [67]$$

V uvedených vzorcích proměnné  $F_2$ ,  $F_3$  jsou součinitele tvaru z tabulky 7,  $Q$  vnesené teplo použité při svařování,  $T_0$  počáteční teplota materiálu a  $d$  přechodová tloušťka základního materiálu.

Pro zjednodušení a rychlé ověření nabízí dodavatelé základních materiálů „kalkulačku“, pomocí které lze snadno ověřit vhodnost navržených svařovacích parametrů již před začátkem svařování. Příkladem této kalkulačky je např. software WeldCalc od společnosti SSAB, viz obrázek 30.



Obrázek 30: Weldcalc od společnosti SSAB

Pro vysokopevnostní jemnozrnnou ocel S960QL by parametr  $t_{8/5}$  měl dosahovat hodnot v rozmezí 5-15 s. [69]. Při dodržení předepsaného intervalu doby ochlazování  $t_{8/5}$  lze získat svarový spoj s vyhovujícími vlastnostmi – svar dosáhne správné materiálové struktury a dojde k minimalizaci růstu zrna. Současně bude ve svarovém kovu tolik vneseného tepla, že difúzní vodík bude mít dostatek času pro vydifundování ze základního materiálu pryč a tím je i omezena praskavost za studena, která je blíže popsána v následující kapitole 2.4.4.

#### 2.4.4. Praskavost za studena – vodíkové praskání

Při výrobě svarovým spojů mohou v důsledku výrobních a následných operací vzniknout trhliny. Trhliny rozdělujeme dle mechanismu vzniku na trhliny za horka, za studena, lamelární a žíhací.

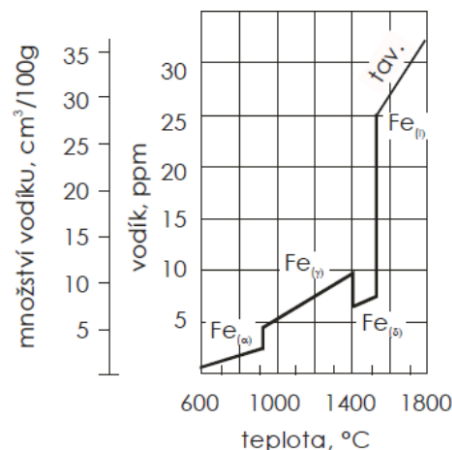
Pro vysokopevnostní konstrukční oceli je typické praskání za studena (vznik trhlín za studena – vodíkové praskání), které vzniká při teplotách pod 200°C. Pro vznik tohoto typu trhliny je nutné „splnit několik podmínek“ – vysoký obsah atomárního vodíku ve struktuře, působící tahové napětí a struktura materiálu citlivá na působení vodíku (např. martenzit). Výše popisovaný typ oceli obsahuje při nevhodném zacházení všechny tři faktory, které mohou vznik trhlín za studena způsobit. [73]

Přítomnost materiálové struktury citlivé na působení vodíku se nelze vyhnout, protože právě díky nerovnovázné základní struktuře oceli dosahují svých pevnostních vlastností. U některých typů ocelí lze však snížit množství martenzitu, které se po svařování bude ve struktuře vyskytovat, a to především správným nastavením teplotního cyklu svařovacího procesu. Působící tahové napětí lze omezit, ale vždy se podél svarového kovu bude vyskytovat zbytkové napětí, které dosahuje až úrovně meze kluzu. Mezi zdroje

atomárního vodíku patří hlavně vlhkost okolí a základního, přídavného a spotřebního materiálu. Při špatné technologické kázni – svařování vlhkého materiálu, použití vlhkých tavidel či obalů elektrod, svařování příliš nízkým tepelným příkonem či nedodržení předpisu na předehřev materiálu lze negativně ovlivnit množství atomárního vodíku, který při své rekombinaci způsobí vznik trhlin. Kvalita provedení svarového spoje může také negativně ovlivnit praskavost za studena, neboť v místě vrubů dochází ke koncentraci napětí, které v superpozici s napětím vyvolaným vodíkem může vést až ke vzniku lomu. [73]

### Mechanismus vzniku trhlin za studena

Vlivem působení okolního prostředí, nevysušených svařovacích PM: drátů, tavidel či obalů elektrod, dochází k nasycení základního materiálu vodíkem. Celkový obsah vodíku je součtem difuzního vodíku a zbytkového vodíku. Pro vznik trhlin je kritický celkový obsah difuzního vodíku. Rozpustnost vodíku ve svarovém kovu je silně závislá na teplotě a materiálové struktuře, viz obrázek 31. Vodík se dostává do struktury v atomárním stavu, následně se při zvýšených teplotách disociuje - tzn. původní molekula  $H_2$  se rozštěpí na jednotlivé atomy  $H^+$ , které se potom snazším způsobem dostávají do struktury, zejména do míst mřížkových poruch (vměstky, dislokace, póry, poruchy mřížky atd.). Tam se atomární vodík opětovně (rekombinací) slučuje do původních molekul, čímž narůstá napětí v mřížce, které vyvolává porušení vznikem transkrystalických trhlin. Z obrázku 31 lze vyčíst, že rozpustnost vodíku v železe pod teplotou  $200^\circ C$  je výrazně nižší, ve srovnání s rozpustností při teplotách v okolí likvidu, což je hnací silou výše zmíněné kontaminace svarového kovu vodíkem. Pokud se vodík nestihne při ochlazování z materiálu odstranit bude také příčinou vzniku porezity. [50]



Obrázek 31: Rozpustnost vodíku v oceli v závislosti na teplotě [74]

### Hodnocení náchylnosti na vznik praskání za studena

Pro hodnocení náchylnosti základního materiálu na vznik trhlin za studena je nutné hodnotit všechny podmínky, které vstupují do problematiky – obsah difuzního vodíku ve svarovém kovu, mikrostrukturu spoje dle hodnocení chemického složení a působících tahových napětí.



Obsah vodíku je vyjadřován v ml.100g<sup>-1</sup> (= ppm). Jeho úroveň je vyjadřována ve stupních A-E dle normy EN 1011-2 (viz tabulka 8 v kapitole 2.4.5.). Jako vyhovující pro svařování je běžně skupina D a E, což odpovídá hodnotě obsahu vodíku pod 5 ml.100g<sup>-1</sup>. Úroveň difuzního vodíku H<sub>D</sub> lze stanovit např. glycerinovou zkouškou. Princip glycerinové zkoušky je jednoduchý. Měřený materiál je ponořen do měrného válce naplněného glycerinem a po uplynutí předem definované doby se měří, kolik plynu (objem) bylo uvolněno z materiálu a vystoupalo do horní části měřicího zařízení. [68]

Nejčastějším a nejjednodušším kritériem hodnocení náchylnosti na vznik trhlin za studena je standardní výpočet uhlíkového ekvivalentu. Další možností je hodnocení mikrostruktury spoje pomocí parametru praskavosti P<sub>w</sub> (10), kde ve výpočetním vztahu je zahrnuta úroveň působícího zbytkového napětí ve formě faktoru intenzity tuhosti K (11), který je závislý na konstrukci a kombinované tloušťce spoje.

$$P_w = P_{CM} + \frac{H_{D(GI)}}{60} + \frac{K}{40 \cdot 10^4} \quad (10)[73]$$

$$K = K_0 \cdot h \quad (11)[73]$$

Kde P<sub>CM</sub> je uhlíkový ekvivalent, K je faktor intenzity tuhosti, K<sub>0</sub> je měrná tuhost, H<sub>D(GI)</sub> je obsah vodíku stanovený glycerinovou zkouškou a h je tloušťka svařovaného materiálu.

Pokud je koeficient praskavost P<sub>w</sub> > 0,3, tak je ocel náchylná ke vzniku trhlin za studena.

Kromě numerických hodnocení náchylnosti, existují technologické zkoušky, pomocí kterých lze ověřit svařitelnost a náchylnost ke vzniku trhlin za studena. Technologické zkoušky vhodné pro toto testování jsou např.: zkouška Tekken, Lehigh, zkouška praskavosti CTS (Controlled thermal severity), zkouška praskavosti RD (Research department) a zkouška Implant. Detailní popis principu a provádění technologických zkoušek je uveden v normě EN ISO 17642-1.

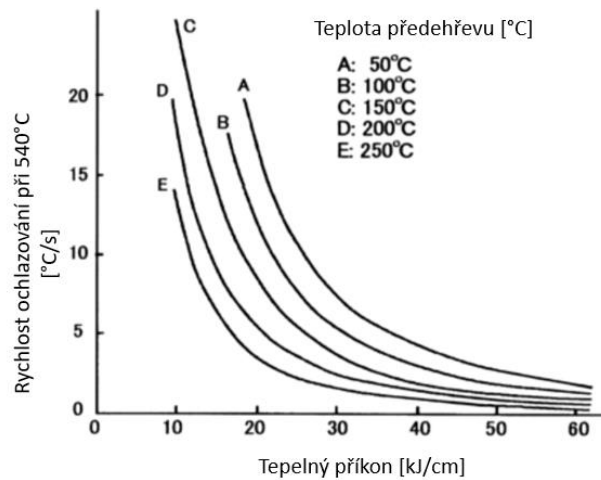
### **Opatření proti vzniku trhlin za studena**

Opatření souvisí s omezením tří hlavních faktorů způsobujících vznik trhlin. Nejdůležitějším opatřením, je maximální snaha o minimalizaci zdrojů vodíku: tzn. omezení používání vlhkých materiálů pro svařování – přídavný, základní materiál, obaly elektrod, tavidla apod. Druhým, velmi účinným opatřením je používání předehřevu základního materiálu. Dalšími možnostmi jsou: využití nízkovodíkových metod svařování (MIG, MAG, TIG, MMA při použití nízkovodíkových elektrod vysušených dle doporučení výrobce apod.), svařování bez použití vodíku v ochranné atmosféře, minimalizace velikosti takových napětí vlivem volby technologie svařování a omezení vrubů na svarových spojích. [50]

### **2.4.5. Eliminace vodíkového praskání – volba předehřevu**

Předehřev materiálu je kritický pro dosažení svarového spoje o požadované kvalitě, zejména u materiálů větších tlouštěk, nebo materiálů, které jsou náchylné na vznik trhlin za studena. Při použití předehřevu dojde k ovlivnění teplotního cyklu. Teplota předehřevu

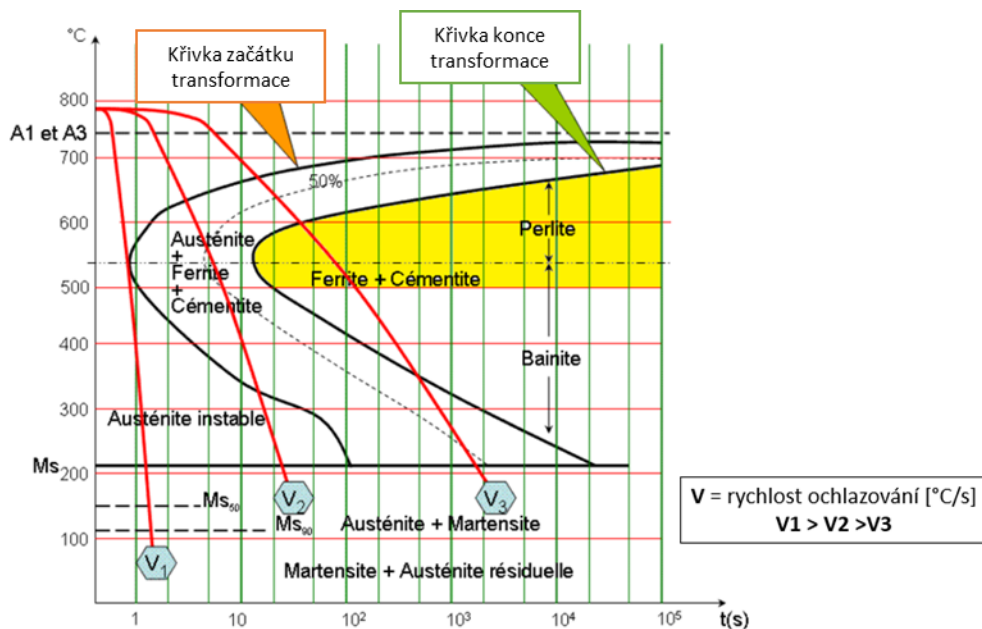
snižuje rychlost chlazení svarového kovu a TOO, prodlužuje čas výdrže nad 200 °C a tím snižuje teplotní gradienty a velikost působícího napětí. Znázornění vlivu teploty předehřevu na rychlost ochlazování je uvedeno na obrázku 32. [45, 62, 66]



7

Obrázek 32: Vliv teploty předehřevu na rychlost ochlazování [75]

Rychlost ochlazování je kritická pro dosažení požadovaných vlastností. Vlivem různé rychlosti ochlazování může ve svarovém kovu a TOO vzniknout buď tvrdá a křehká struktura při rychlém ochlazení nebo měkká a tvárná při pomalém ochlazení. Znázornění vlivu rychlosti ochlazování na výslednou strukturu u kalitelné oceli je uveden na obrázku 33.



Obrázek 33: Vliv rychlosti ochlazování na výslednou strukturu [76]

S rostoucí pevností, a s tím souvisejícím nárůstem legur, dochází k posunu hranice pro nutné použití předehřevu směrem k nižším tloušťkám. Pro určení teploty předehřevu lze u vysokopevnostních konstrukčních ocelí použít více dostupných metod. Pro zjednodušení budou v dalším textu disertační práce uvedeny pouze tři základní způsoby určení: dle CE, dle CET a dle doporučení výrobce. Výpočet pomocí Séfériana nebude

zmiňován, neboť není doporučen v normě EN 1011-2. Výpočet přehřevu dle Séfériana je obecný vztah, použitelný spíše pro běžné pevnostní třídy ocelí a lze ho dohledat v jeho knize (Nauka o kovech ve svařování ocelí [77]). U VPO je důležité po volbě teploty přehřevu a volbě použitého teplotního příkonu ověřit vhodnost pomocí parametru  $t_{8/5}$ , který byl popisován v předchozí kapitole 2.4.1.

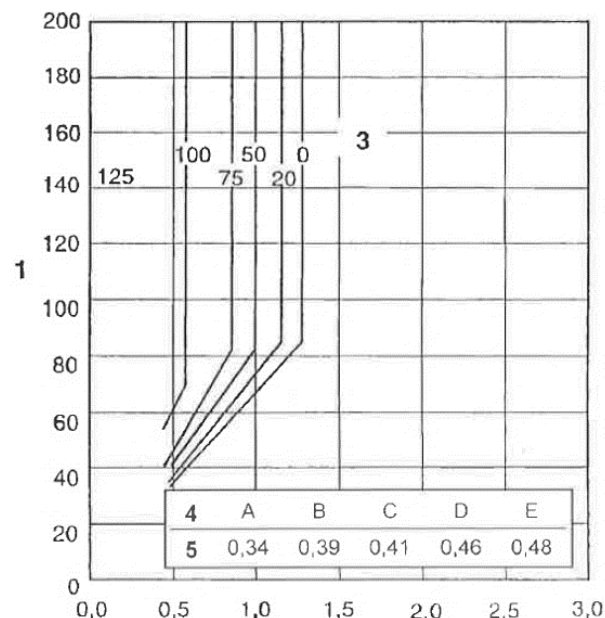
### Volba přehřevu pomocí CE

Tato metoda je popsána v normě EN 1011-2 a je založena na výpočtu uhlíkového ekvivalentu CE a určení stupně obsahu vodíku. Limitní hodnoty vodíku pro jednotlivé stupně jsou uvedeny v tabulce 8.

Tabulka 8: Stupně obsahu vodíku

Obsah difúzního vodíku (ml/100 g svarového kovu)	Stupně obsahu vodíku
> 15	A
10 ≤ 15	B
5 ≤ 10	C
3 ≤ 5	D
≤ 3	E

Po výpočtu CE a určení stupně vodíku lze pomocí dostupných grafů v normě EN 1011-2 určit doporučenou teplotu přehřevu před svařováním pro zvolenou konstrukci spoje (kombinovaná tloušťka) a zvolený tepelný příkon (procesní parametry) při svařování. Grafy jsou v normě uvedeny různé, vždy pro jinou kombinaci CE a stupně obsahu vodíku. Příklad takového grafu je uveden na obrázku 34.



Obrázek 34: Volba teploty přehřevu dle CE a stupně vodíku [67]

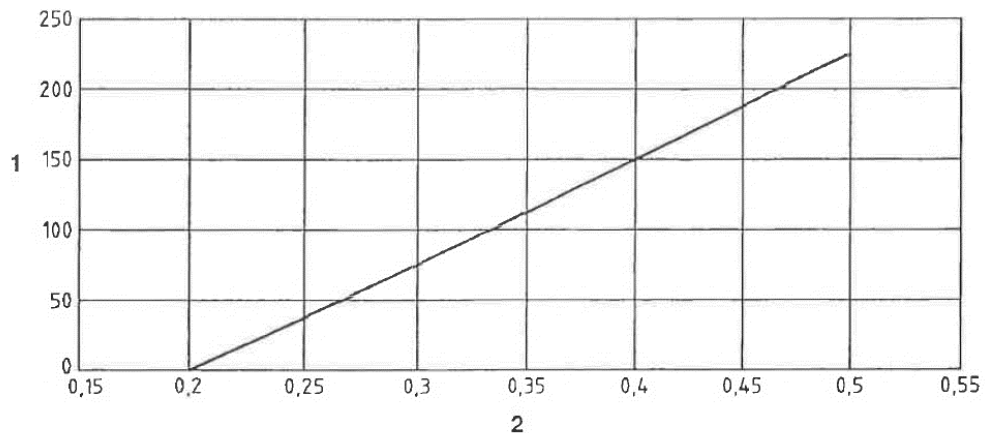
### Volba předehřevu podle CET

Druhá metoda má při výpočtu teploty předehřevu také za cíl omezit praskavost za studena. Je rozdílná oproti předchozí variantě, neboť teplotu předehřevu  $T_p$  [°C] lze vypočítat pomocí empirického výpočetního vztahu. Výpočtový vztah (12) zahrnuje vliv chemického složení CET ( $T_{pCET}$ ), vliv tloušťky plechu ( $T_{pd}$ ), vliv obsahu vodíku ( $T_{pHD}$ ) a vliv použitého teplotního příkonu ( $T_{pQ}$ ). [67]

$$T_p = T_{pCET} + T_{pd} + T_{pHD} + T_{pQ} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (12) [67]$$

Vliv chemického složení  $T_{pCET}$  na výši teploty předehřevu je určen výpočtovým vztahem (13) založeným na výpočtu uhlíkového ekvivalentu CET [%]. Rovnice pro výpočet CET je uvedena v kapitole 2.5.1 ve vztahu (5). Ze vztahu (13) vzniká grafická závislost, viz obrázek 35, ze které lze odečíst, že zvýšení uhlíkového ekvivalentu o 0,01°C zvýší teplotu předehřevu o 7,5°C.

$$T_{pCET} = 750 \cdot CET - 150 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (13) [67]$$



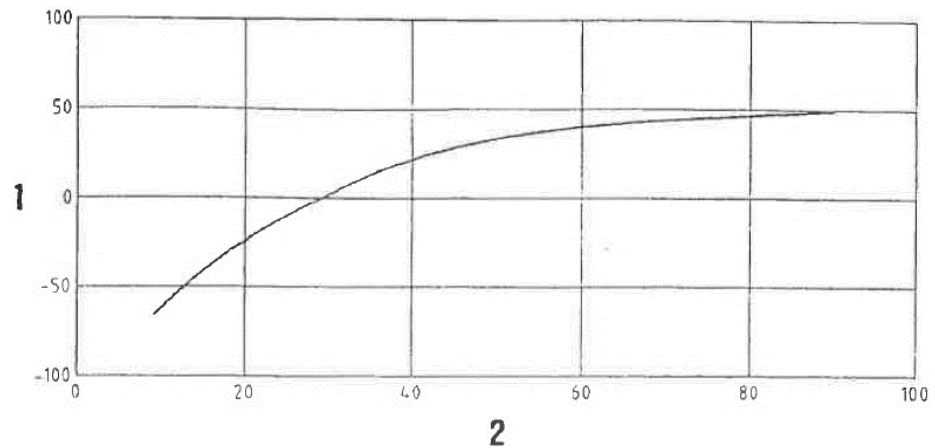
Legenda

1  $T_{pCET}$  (°C)    2 Uhlíkový ekvivalent CET (%)

Obrázek 35: Vliv CET na teplotu předehřevu [67]

Vliv tloušťky plechu  $T_{pd}$  určuje výpočtový vztah (14). Závislost teploty předehřevu na tloušťce plechu  $d$  [mm] je hyperbolicky tangenciální, takže nárůst teploty předehřevu je nejvyšší u změny malých tlouštěk, s rostoucí použitou tloušťkou základního materiálu vliv klesá, viz obrázek 36.

$$T_{pd} = 160 \cdot \tanh \frac{d}{35} - 110 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (14) [67]$$



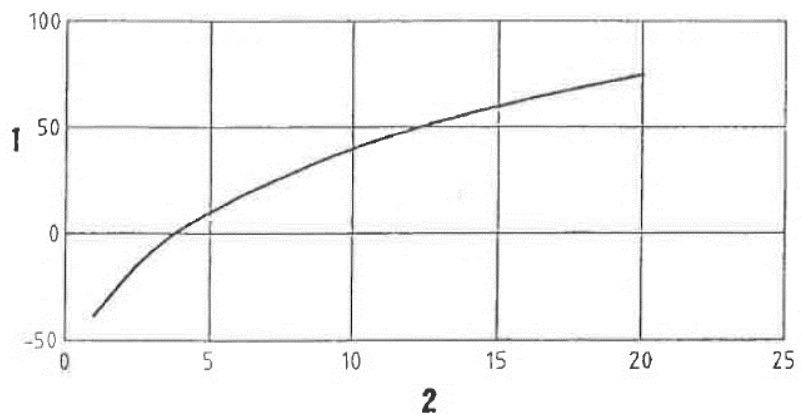
Legenda

1  $T_{pd}$  (°C)      2 Tloušťka plechu  $d$  (mm)

Obrázek 36: Vliv tloušťky plechu  $d$  na teplotu předehřevu [67]

Vliv obsahu difuzního vodíku  $T_{pHD}$  určuje výpočtový vztah (14), hlavní proměnou je obsah difuzního vodíku  $HD$  [ml/100g]. Závislost je parabolická, viz obrázek 37.

$$T_{pHD} = 62 \cdot HD^{0,35} - 100 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (15) [67]$$



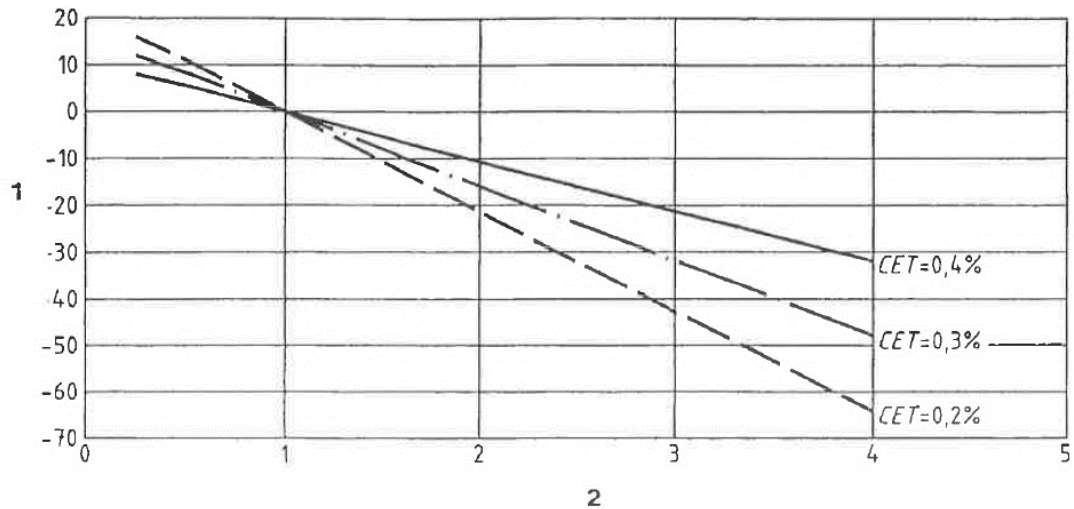
Legenda

1  $T_{pHD}$  (°C)      2 Obsah vodíku  $HD$  (ml/100 g)

Obrázek 37: Vliv obsahu difuzního vodíku  $HD$  na teplotu předehřevu [67]

Vliv tepelného příkonu definuje rovnice (16). Výsledná hodnota je závislá na hodnotě CET a na velikosti tepelného příkonu  $Q$  [kJ/mm]. Výsledný vztah je znázorněn graficky na obrázku 38. Z obrázku lze určit, že při použití vyššího tepelného příkonu pro svařování lze redukovat teplotu předehřevu. Což dokládá fakt, že teoreticky lze snížit (částečně nahradit) teplotu předehřevu vyšším tepelným příkonem při svařování.

$$T_{pQ} = (52 \cdot CET - 32) \cdot Q - 53 \cdot CET + 32 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (16) [67]$$



Legenda

1  $T_{pQ}$  (°C)      2 Tepelný příkon  $Q$  (kJ/mm)

Obrázek 38: Vliv tepelného příkonu na teplotu předehřevu [67]

Po dosazení všech dílčích rovnic (13-16) do rovnice (12) a následné úpravě se získá kompletní vztah (17) pro výpočet teploty předehřevu založený na CET a dalších popisovaných faktorech.

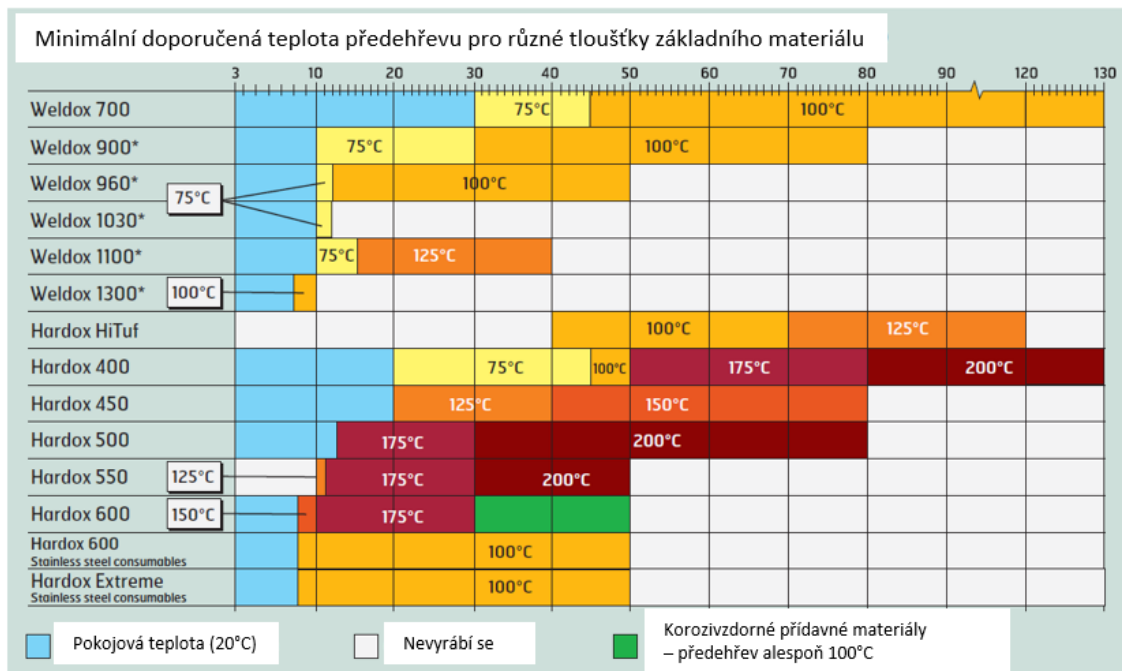
$$T_p = 697 \cdot CET + 160 \cdot \tanh\left(\frac{d}{35}\right) + 62 \cdot HD^{0,35} + (53 \cdot CET - 32) \cdot Q - 328 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (17)[67]$$

### Volba předehřevu dle doporučení výrobce

Nejjednodušší metoda pro volbu teploty předehřevu je použití doporučení výrobce. Pro běžně dostupné vysokopevnostní konstrukční oceli je k dispozici přehledná tabulka, kde dodavatel základního materiálu doporučuje na základě typu oceli a svařované tloušťky, jaká by měla být teplota předehřevu.

Zmiňovanou tabulku má k dispozici např. výrobce základního materiálu, firma SSAB, viz tabulka 9, kde uvádí teploty předehřevu pro vysokopevnostní konstrukční oceli až do meze kluzu 1300 MPa (Weldox 1300).

Tabulka 9: Doporučená teplota předehřevu [66]

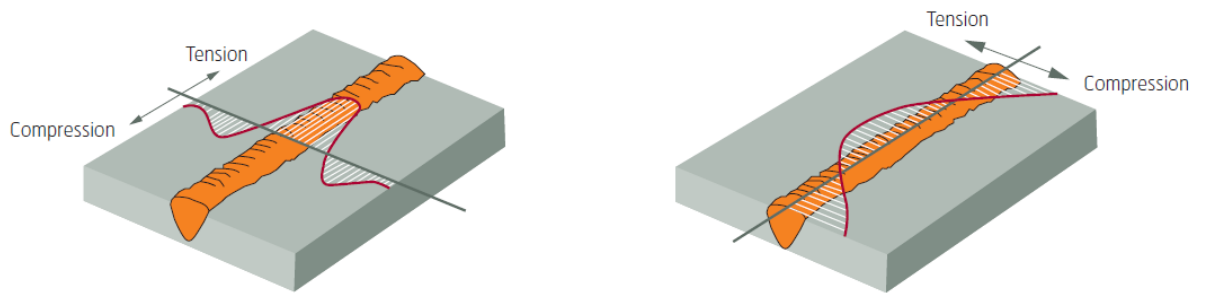


## 2.5. Deformace a napětí svarových spojů

Deformace a napětí jsou průvodním jevem tavného svařování a jsou nežádoucí. V důsledku deformací může dojít ke špatné funkčnosti vyráběného dílu nebo nedodržení rozměrových tolerancí svařovaných dílů. Oba negativní důsledky deformací jsou nežádoucí a v průběhu výrobního procesu je snaha je eliminovat. V důsledku působení napětí mohou vznikat vady svaru – trhliny, které jsou na výsledném produktu naprosto nepřijatelné. Dle normy EN ISO 5817 jsou trhliny nepřijatelnou vadou pro všechny stupně kvality svarových spojů. Detailní popis mechanismu vzniku deformačně-napěťového účinku ve svarových spojkách bude popsán v kapitole 2.5.1. [78, 79, 80]

Deformace a napětí úzce souvisí se svařitelností. V případě, že vznikající napětí dosahuje takové úrovně, že převyšuje pevnost materiálu, dojde ke vzniku trhlin. Na výslednou úroveň deformací a napětí ve svařenci mají vliv všechny faktory ovlivňující svařitelnost – konstrukce svařence, použitý základní a přídavný materiál a použitá technologie svařování. [78, 79]

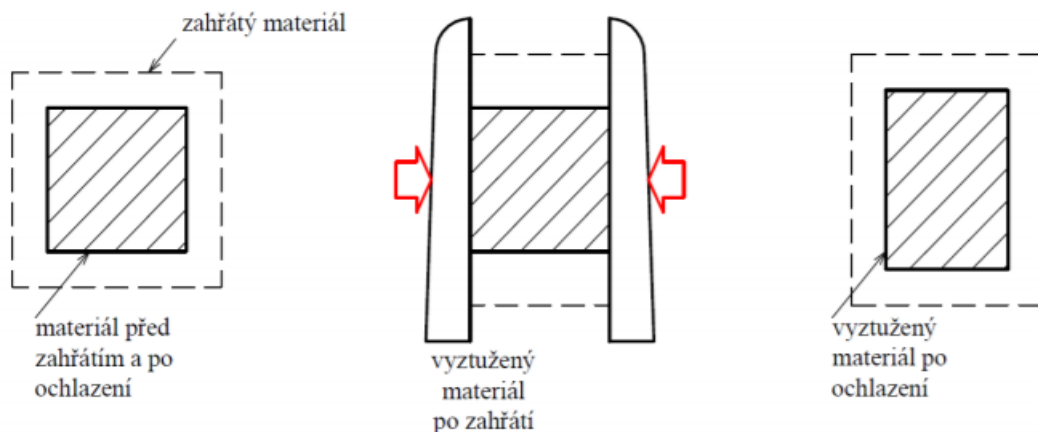
Při svařování vznikají tři typy napětí – podélné napětí, příčné napětí a napětí ve směru tloušťky. Rozložení napětí ve svařenci není konstantní, se změnou tuhosti svařence dochází ke změně napětí. Výsledná napětí musí být v rovnováze, a proto se ve svařenci vyskytují jak tahová, tak tlaková napětí. Znázornění průběhu napětí pro tupý spoj viz obrázek 39. [78, 79]



Obrázek 39: Rozložení napětí ve svařenci [66]

### 2.5.1. Podstata vzniku deformací a napětí při svařování

Vlivem ohřevu materiálu dochází k jeho tepelnému rozpínání, toto rozpínání je zdrojem sil vyvolávající napětí a deformace. V případě tavného procesu svařování, dochází pouze k lokálnímu ohřevu materiálu a ohřátý objem je pěchován tuhým neohřátým, tepelně neovlivněným materiálem. V důsledku zvýšené teploty klesají mechanické vlastnosti pěchovaného materiálu a pro plastickou deformaci je potřeba nižší působící napětí než při deformaci za pokojových teplot. V následném smrštění při chladnutí materiálu dochází ke vzniku lokálních napět'ových stavů, které vyvolají buď trvalou plastickou deformaci, či zůstanou v materiálu jako zbytková napětí. Princip pěchování a vznik deformací a napětí po svařování je znázorněn na obrázku 40. [81, 82]



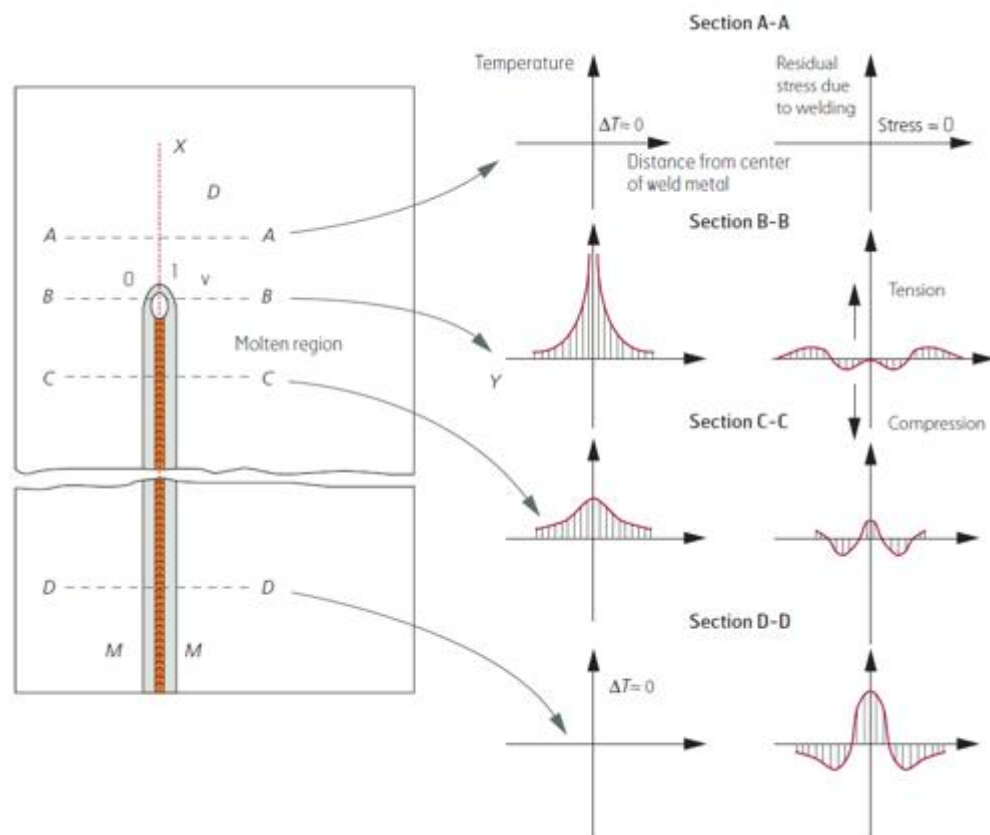
Obrázek 40: Princip vzniku napětí a deformací při svařování [81]

Napět'ová bilance je proměnná v průběhu procesu svařování. Změna napět'ových stavů je ovlivněna změnou teploty a mechanických vlastností materiálu. Na výsledné deformace svařence mohou mít vliv také fázové transformace, při přeměně austenitu na kombinaci feritu a perlitu, zároveň dochází také k objemovým změnám.

Detailní popis průběhu teploty a napětí ve svařenci v průběhu svařování viz obrázek 41. Jednotlivé řezy (A-A až D-D) znázorňují časový vývoj teploty a napětí vznikajícího při svařování. V řezu A-A je vidět, že před tepelným zdrojem a jeho tepelným ovlivněním je teplota blízko nule (pokojová teplota) a současně vlastní napětí je také nulové. Následně v řezu B-B, který je přímo v místě hoření elektrického oblouku je teplota



maximální a vlivem teplotní roztažnosti materiálu dochází ke vzniku tlakového napětí jak ve svarovém kovu, tak v přilehlém materiálu. V této fázi dochází k tváření ohřátého materiálu. V řezu C-C, který znázorňuje oblast za tepelným zdrojem, po začátku chladnutí oblasti. V tomto řezu dochází ke chladnutí materiálu a tím i k jeho smrštění. Díky této objemové změně dochází ke změně směru napětí a z tlakového se stává tahové. V poslední fázi, v řezu D-D, je již znázorněný vychladnutý základní materiál opět na nízkou teplotu. V této fázi je materiál ovlivněn procesem svařování a v materiálu zůstává vlastní napětí, jehož vznik byl indukovan pohybujícím se tepelným zdrojem. Úroveň vlastního napětí je maximálně na úrovni meze kluzu, napětí nad touto mezí vyvolalo plastickou deformaci. [66, 81]



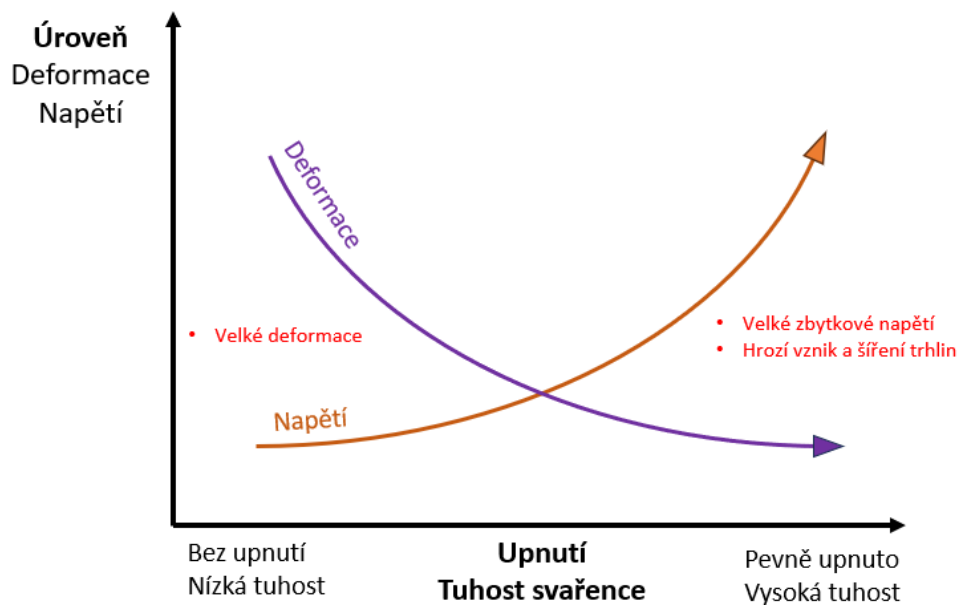
Obrázek 41: Změny napěťových vztahů v průběhu procesu svařování [66]

### 2.5.2. Faktory ovlivňující napětí a deformace

Jak již bylo zmíněno, napěťové pole při svařování závisí na stejných faktorech, jako svařitelnost (konstrukce, technologie, materiál).

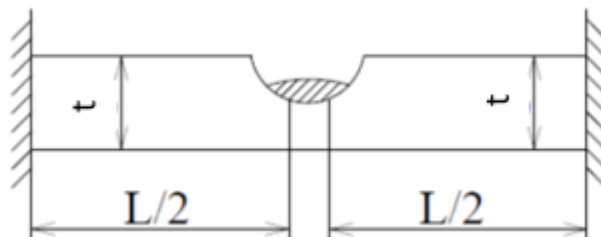
#### Vliv konstrukce svařence na napěťové pole:

Poměr mezi deformacemi a zbytkovým napětím po procesu svařování závisí na tuhosti svařence. S rostoucí tuhostí (pevností upnutí, tuhostí materiálu) klesá poměr makroskopických deformací a roste úroveň zbytkového napětí, viz obrázek 42. [78]



Obrázek 42: Vliv upnutí a tuhosti na poměr mezi deformacemi a zbytkovým napětím  
Tuhost svařence je vyjádřena dle vztahu (18) viz obrázek 43.

$$K = \frac{E \cdot t}{L} [I] \quad (18) [78]$$



Obrázek 43: Znázornění proměnných pro vztah (18) [78]

Uvedený vztah se odkazuje na tloušťku materiálu ( $t$ ) a délku vyložení ramene ( $L$ ), avšak tuhost svařence může být ovlivněna také jeho přípravou. V případě, že celý svařenec bude sestehován, jeho výsledná tuhost bude vyšší než tuhost jednotlivých podsestav. [78]

Úroveň zbytkového napětí výrazně ovlivňuje mechanické vlastnosti svařence při využití. V případě vysoké úrovně zbytkového napětí dochází k poklesu únavových vlastností. V případě, že svařovaný základní materiál vykazuje dostatečnou zásobu plasticity, lze úroveň zbytkových napětí snížit pomocí několika metod. Všechny metody mají za následek uvolnění zbytkových napětí ve formě makroskopické deformace. [81, 82]

Zmiňované metody jsou: [81, 82]

- Zatížení vnější silou

Při zatížení vnější silou dojde ke zvýšení zbytkového napětí nad úroveň meze kluzu, tím dojde k vyvolání plastické deformace, pomocí které dojde ke snížení úrovně zbytkového napětí.

- Pomocí tepelného zpracování – žihání na snížení napětí

Při žihání na snížení napětí dochází vlivem ohřevu základního materiálu ke snížení hodnoty meze kluzu a tím i k uvolnění zbytkových napětí ve formě plastické deformace

- Přeskupení vnitřního napětí – vibrace

Metoda je vhodná pro použití na rozměrných svařencích, kde by žihání bylo nákladově extrémně nevýhodné nebo neproveditelné (např. z rozměrových důvodů). Vlivem vibrací konstrukce dochází při rezonančních stavech k omezení úrovně napětí pomocí plastické deformace. K uvolnění napětí dochází v mikroskopických objemech materiálu tzv. mikronapětí, které ale tvoří výraznou část celkového napětí.

- Vnesení tlakového napětí

Metoda se často nazývá jako prokování (temování) svarového kovu. Vlivem prokování svarových housenek na začátku ochlazování lze vnést do spoje tlakové napětí, které snižuje úroveň zbytkového napětí a současně zvyšuje únavovou pevnost spoje.

- Přetížení – stress test

Vlivem přetížení dojde u vlastního napětí k překonání meze kluzu a vyvolání lokálních plastických deformací. Lokální deformace snižují úroveň vlastního napětí po odlehčení.

Úroveň zbytkového napětí a deformací je nejvýhodnější ovlivnit ve fázi přípravy procesu a v průběhu procesu. Metody pro minimalizaci napětí a deformací budou detailněji popsány v následující kapitole č. 2.5.4.

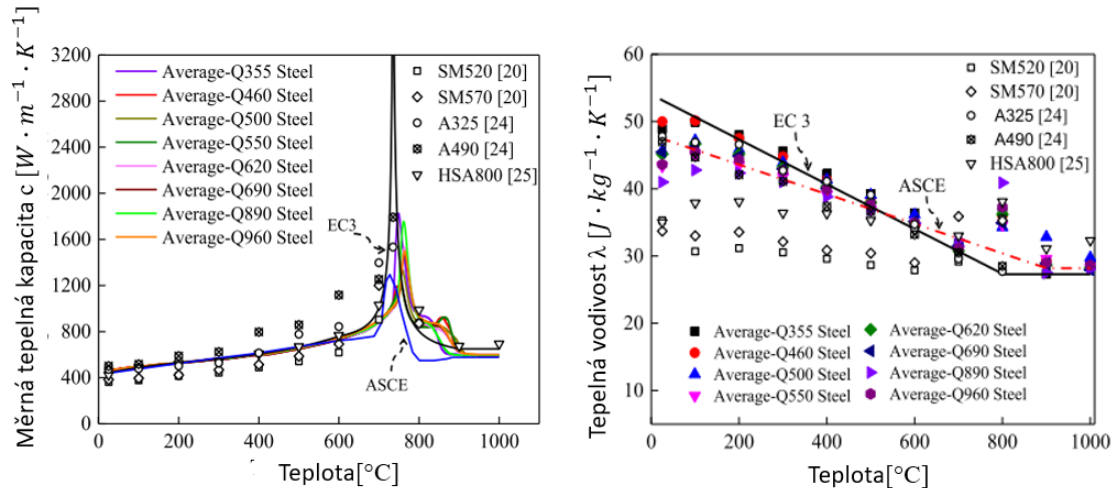
#### **Vliv materiálových vlastností svařence na napět'ové pole:**

Výsledné deformace svařence ovlivňují jak mechanické, tak fyzikální vlastnosti. Mechanické vlastnosti (modul pružnosti  $E$  [MPa], mez kluzu  $R_e$  ( $R_{p0,2}$ ) [MPa], tažnost  $A$  [%]) výrazně ovlivňují úroveň makroskopických deformací. S vyšší pevností materiálu dojde k redukci deformací, neboť napětí pro vyvolání trvalé deformace je vyšší. V případě velmi nízké tažnosti materiálu může dojít při procesu svařování ke vzniku trhlin, které jsou nepřipustné. [79, 82]

Fyzikální vlastnosti ovlivňující deformace souvisí s tepelnou bilancí svaru. Důležitými vlastnostmi jsou zejména: tepelná vodivost  $\lambda$  [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ], součinitel teplotní délkové roztažnosti  $\alpha$  [ $K^{-1}$ ] a měrná tepelná kapacita  $c$  [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ].

Tepelná vodivost a tepelná kapacita ovlivňují množství působícího tepla ve svarovém kovu a tepelně ovlivněné oblasti. Tyto hodnoty jsou závislé na teplotě a na použitém základním materiálu. Jako příklad jsou uvedeny grafy závislosti tepelné vodivosti  $\lambda$  a

měrné tepelné kapacity  $c$  na teplotě pro třídy ocelí Q355-Q936 na obrázku 44. Zmiňované oceli Q355-Q936 jsou čínským ekvivalentem evropských konstrukčních ocelí (Q znamená konstrukční ocel a číslo za Q představuje hodnotu meze kluzu v MPa). Proto ocel Q355 = S355 apod. [83]



Obrázek 44: Závislost měrné tepelné kapacity a tepelné vodivosti na druhu oceli a teplotě [83]

Tepelná roztažnost je hlavním zdrojem vzniku napětí při svařování. Tepelná roztažnost je také závislá na teplotě a typu základního materiálu. Základní přehled hodnot součinitele teplotní délkové roztažnosti při pokojové teplotě pro vybrané oceli je uveden v tabulce 10.

Tabulka 10: Součinitel teplotní délkové roztažnosti pro vybrané typy ocelí [84]

Třída oceli	Součinitel $\alpha$ [ $10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$ ]
S235JR	11,7
C22E	11,7
C40E	11,3
42CrMo4	12,3
40CrNiMo	12,3
X5CrNi18-10	17,2
X3CrNiMo17-13-3	15,9
X10CrAlSi13	10,8

### Vliv použité technologie na napěťové pole:

Technologie má nejvýraznější vliv na výsledné deformace. Technologie v procesu svařování je velmi široký pojem. Do této kategorie lze zařadit metodu (včetně procesních parametrů), postup svařování, volbu svarových úkosů a periferní vybavení pracoviště. [81, 82]

S napěťovým stavem svařence souvisí množství vneseného tepla a objem taveniny ve svarové lázni. Vnesené teplo  $Q$  [ $\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$ ] může pro obloukové metody být vypočítáno pomocí vzorce (6).

Vliv metody svařování na deformace je dán použitými parametry (vneseným teplem). Postup svařování souvisí s rovnoměrností působení napěťových polí vzniklých v průběhu svařování. Volba svarových úkosů ovlivňuje množství potřebného přídavného materiálu a tím i množství taveniny ovlivňující rozměrovou přesnost svařence. Pod pojmem periferní vybavení pracoviště si lze představit veškeré vybavení potřebné pro profesionální výrobu svařenců, jako např. polohovadla, upínací prvky, přípravky apod. [81, 82]

### 2.5.3. Rozdělení deformací

Pro rozdělení typů deformací může být použito několik hledisek:

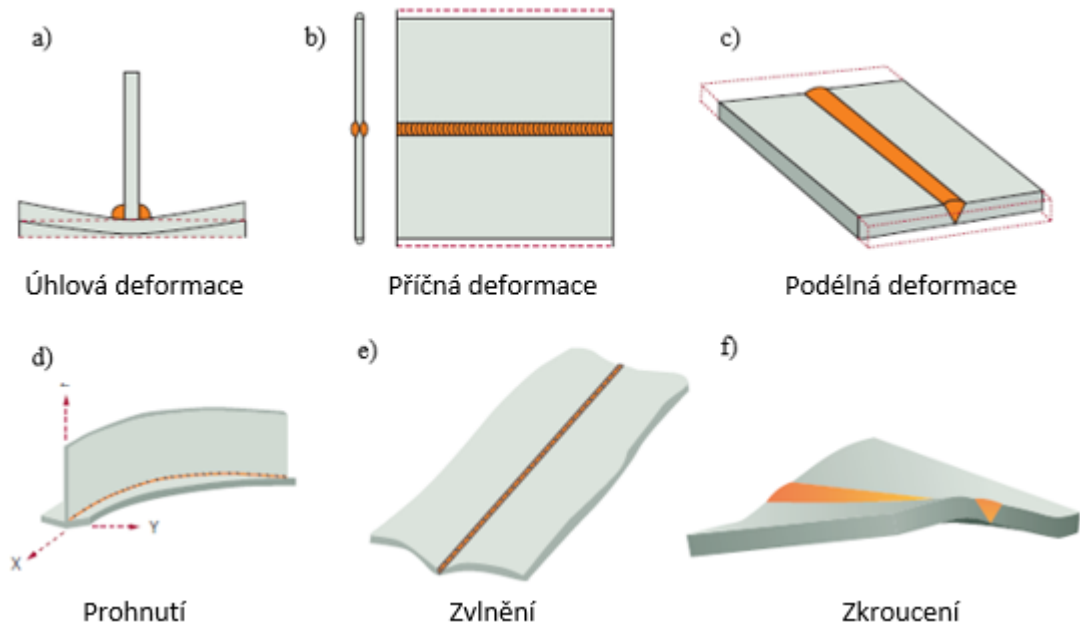
#### Podle časové existence

- Dočasná – vznikají a zanikají v průběhu procesu svařování, jsou ovlivňovány změnou teploty a vnějším zatížením
- Trvalá – zůstávají zachovány i po vychladnutí svařence na teplotu okolí tzn. po odeznění působících sil. Tyto deformace jsou závažnější, protože je nutné řešit jejich následky dalšími více operacemi.

#### Podle orientace

- Příčná – orientována kolmo na osu svaru – viz obrázek 45 b)
- Podélná – orientována rovnoběžně s osou svaru – viz obrázek 45 c)
- Ve směru tloušťky
- Úhlová deformace – druh příčné deformace, je způsoben změnou průřezu svaru s tloušťkou – viz obrázek 45 a)
- Kombinovaná – kombinací uvedených typů deformací vznikají další typy – viz obrázek 45 d), e), f)

Napětí ve směru tloušťky je nejmenší a na makroskopické deformace má nejmenší vliv. Podélná a příčná napětí dosahují vysokých hodnot, které přesahují mez kluzu svařovaného materiálu. Zobrazení zástupců jednotlivých typů deformací je uvedeno na obrázku 45.



Obrázek 45: Typy deformací [66]

#### Podle stálosti

- Pružná (elastická) – pod mezí kluzu svařovaného materiálu, po odlehčení vymizí
- Plastická – nad mezí kluzu, trvalá deformace
- Pružně-plastická – kombinace, typické pro svarové spoje

#### Podle rozsahu

- I. Druhu (Makroskopická) – celkové deformace svařence
- II. Druhu (Mikroskopická) – na úrovni zrn materiálu, tzv. strukturální napětí
- III. Druhu (Submikroskopická) – působí na rozsahu krystalické mřížky

### 2.5.4. Opatření pro redukci deformací

Opatření pro redukci deformací lze rozdělit z časového pohledu, kdy jsou v rámci výrobního procesu opatření implementována. Velikost výsledných deformací lze ovlivnit:

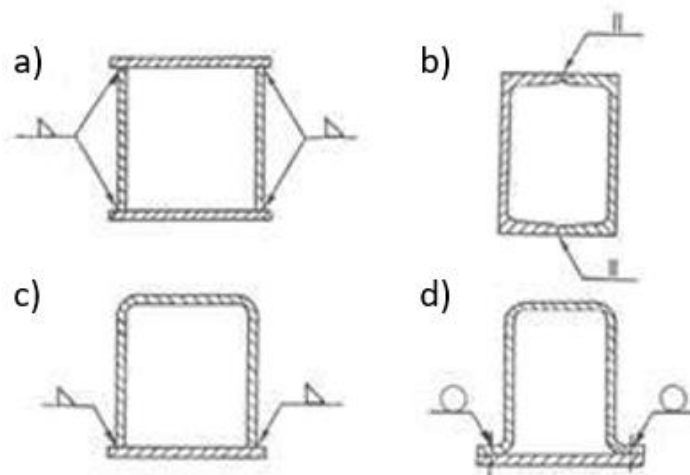
- Před procesem svařování
- V průběhu svařování
- Po procesu svařování.

Každá z těchto metod je spojena s rozdílnou nákladovostí. Vždy záleží na výrobci svařované konstrukce, jaká z metod je pro daný případ, příp. průmyslový podnik nejvýhodnější. [81, 82]

### Ovlivnění deformací před procesem svařování

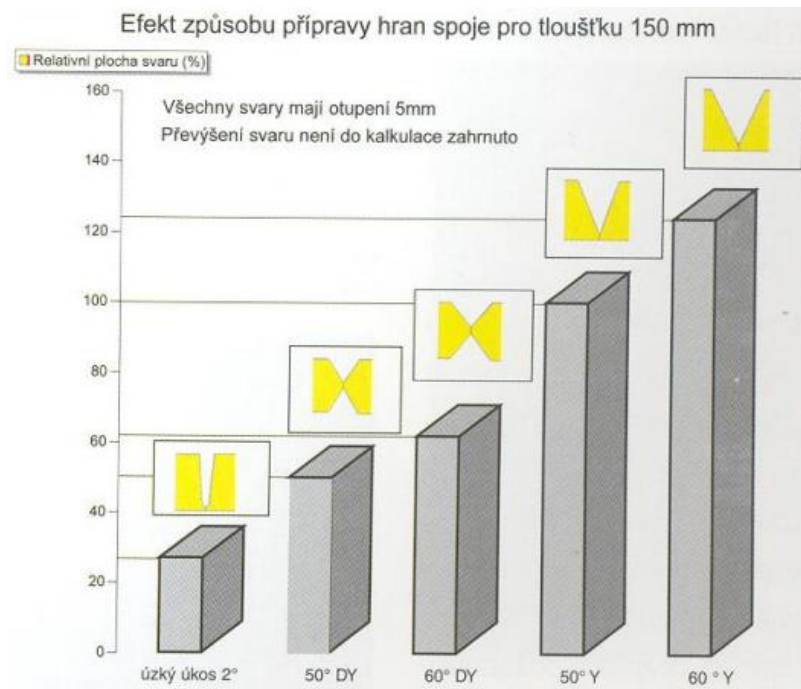
Deformace jsou závislé na množství nataveného základního a přídavného materiálu. Tento objem je výrazně ovlivněn konstrukcí svařence a přípravou svarové plochy svarového spoje.

Při konstrukci svařence je výhodné omezit celkový počet svarů a využívat válcované profily, či ohýbané díly, viz obrázek 46. Na uvedeném obrázku jsou různé možnosti návrhu stejné skříňové konstrukce. Varianta a) je z pohledu deformací nejhorší, neboť je nutné svařit čtyři koutové svary v rozích konstrukce. Varianta b) naopak použila válcované profily, pomocí kterých došlo k omezení počtu svarů a navíc se podařilo svarové spoje umístit do osy těžiště, což je pro omezení deformací pozitivní změna. Varianta c) a d) používá jeden ohýbaný díl v kombinaci s pásovým plechem. Díky tomu také došlo k omezení počtu nutných svarů. U varianty d) navíc došlo k výrazné změně specifikace typu spoje, došlo k vynechání tavného svařování a díly konstrukce jsou svařeny el. odporem. Tato úprava bude mít výrazný dopad na výsledné deformace, avšak tato změna konstrukce je v rámci podniku velmi často těžko proveditelná.[85]



Obrázek 46: Omezení počtu svarů [85]

Konstrukcí přípravy svarových ploch lze výrazně omezit plochu svaru a tím i celkové deformace, viz obrázek 47. Pokud jde o tupé svary, pro omezení deformací je nejvýhodnější využití svaru typu I nebo použití úzkého úkosu  $2^\circ$  (tento typ svaru je limitován tloušťkou svařovaného dílu nebo použitou metodou svařování), u této konstrukce je plocha svaru minimální. Konstrukce přípravy musí být založena na výrobních možnostech podniku. Doporučenou přípravu svarových ploch tupých a koutových svarů pro jednotlivé metody a materiály specifikuje norma EN ISO 9692. [82]



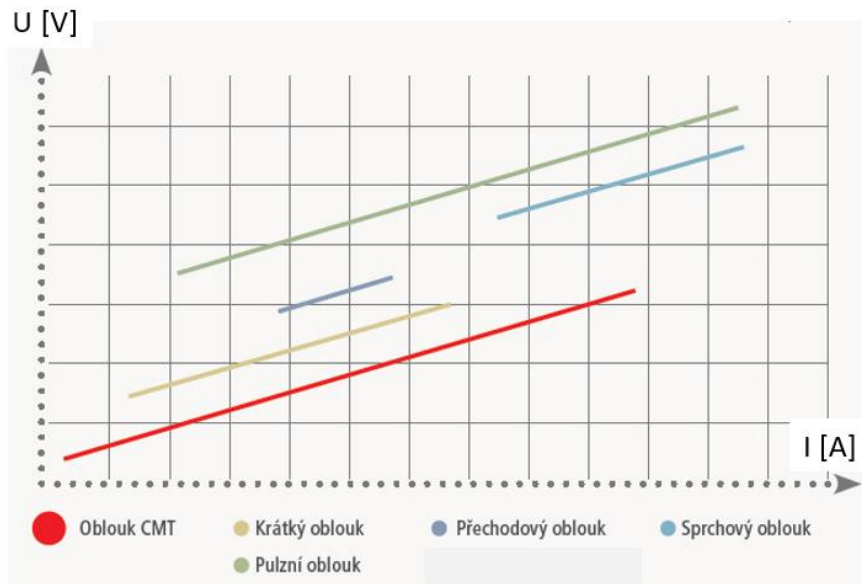
Obrázek 47: Vliv svarového úkosu na relativní plochu svaru [55]

### Ovlivnění deformací v průběhu svařování

V průběhu svařování lze ovlivnit více faktorů, které mají vliv na výsledné makroskopické deformace jako např. celkové vnesené teplo, intenzitu vneseného tepla, trajektorii zdroje tepla a použití přípravků.

*Celkové vnesené teplo* lze ovlivnit například použitím předehřevu nebo za pomoci speciálních modifikovaných procesů obloukového svařování jako např. Force Arc, RapidWeld a CMT. Tyto modifikace jsou primárně určeny buď pro efektivní svařování větších tlouštěk (Force Arc), nebo naopak pro svařování malých tlouštěk (CMT – Cold Metal Transfer). Jejich použití může mít také pozitivní vliv na výsledné deformace. Stejně jako modifikované procesy, tak i zvolený způsob přenosu nataveného přídavného materiálu do svarové lázně má vliv na celkové vnesené teplo. Na obrázku 48 jsou vyznačeny oblasti, typické pro jednotlivé typy přenosů svarového kovu. Z obrázku lze vyčíst, že nejnižší oblast stabilního hoření oblouku vykazuje metoda CMT a naopak nejvyšší pulzní oblouk. V grafu na obrázku 48 nejsou zobrazeny vysokovýkonné metody přenosu svarového kovu (např. přenos rotujícím obloukem), které pro svařování vysokopevnostních ocelí nejsou vhodné z důvodu velkého vneseného tepla do materiálu.





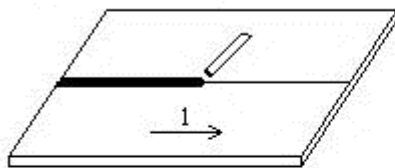
Obrázek 48: Tepelná bilance metod [86]

Intenzita vneseného tepla je dána použitými parametry v průběhu svařování. Pro omezení deformace se doporučuje svařovat svarový spoj s menším vneseným teplem na více vrstev. Toto doporučení je shodné s doporučením pro svařování vysokopevnostních jemnozrnných ocelí. Omezené vnesené teplo také podporuje zachování materiálové struktury a tím i zachování mechanických vlastností. [81, 82]

Trajektorie zdroje tepla jsou definovány postupem svařování. Postup svařování může také výrazně ovlivnit rozložení napětí a tepla v průběhu procesu a tím i výsledné deformace. Postup svařování je výrazně ovlivněn výrobními možnostmi a konstrukcí svařence. Různé varianty postupu vytváření svarového spoje a jejich vliv na velikost napětí a vznik deformací viz obrázek 49. [81, 82]

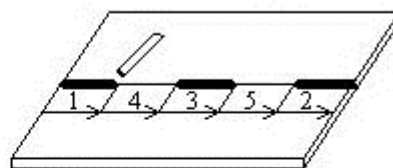
#### Svařování jedním tahem

- prnutí velmi malé, deformace velké



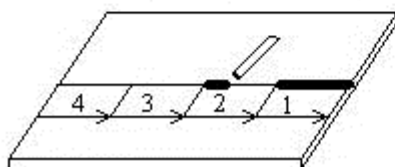
#### Svařování střídavě

- prnutí střední, deformace střední



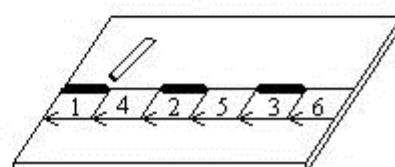
#### Svařování vratným krokem

- prnutí střední, deformace malé



#### Svařování střídavým vratným krokem

- prnutí velké, deformace velmi malé



Obrázek 49: Různé varianty postupu a jejich vliv na napětí a deformace [87]

*Použití přípravků*, viz obrázek 50, je nejběžnější metodou pro dosažení rozměrových a geometrických požadavků v průběhu procesu svařování. Přípravky zjednodušují montáž svařence a podporují zachování rozměrů v průběhu procesu výroby svarových spojů. Vlivem tuhého upnutí však zvyšují úroveň vlastního napětí a proto jejich využití není vhodné u ocelí s malou zásobou plasticity. Konstrukce přípravku je u komplikovaných svařenců složitá a jejich přínos lze vyhodnotit až po využití na reálném svařenci. Kontrola funkčnosti přípravků by mohla být také jedna z možných aplikací simulačních softwarů.

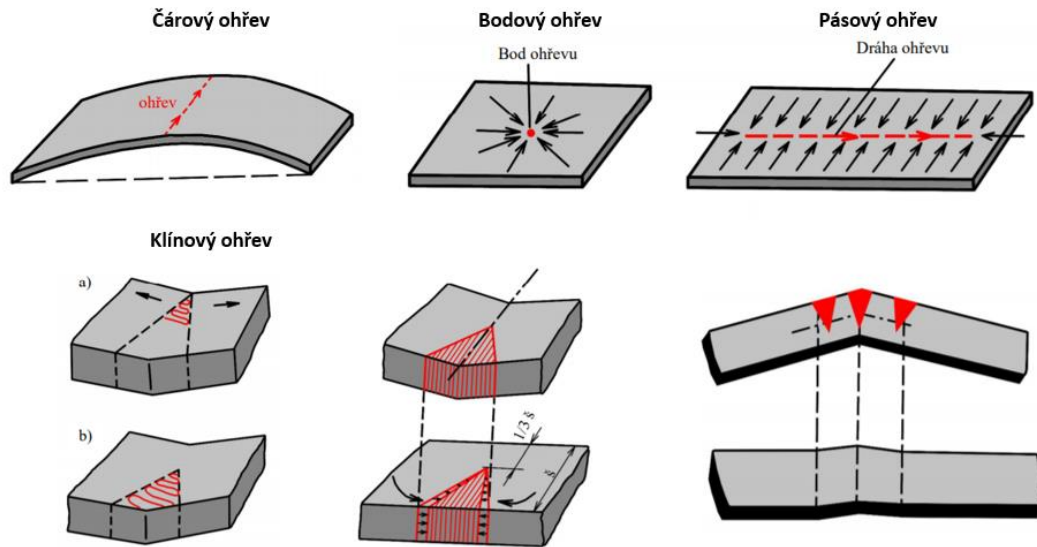


*Obrázek 50: Využití přípravků při svařování [88]*

### **Ovlivnění deformací po procesu svařování**

Typickou nejjednodušší metodou je rovnání na konci výrobního procesu, kde svařenec lze rovnat mechanicky nebo za pomoci řízeného přívodu tepla. Mechanické rovnání (použití lisu) je nepřesné, časově náročné, lze jím poškodit výrobek a u ocelí vysokých pevností je obtížné. Rovnání pomocí přívodu tepla (např. rovnání plamenem, indukční rovnání) vyžaduje velké zkušenosti pracovníků. Při neopatrném zacházení se zdrojem tepla může pracovník nenávratně zničit pevnost základního materiálu a tím i ohrozit budoucí funkčnost svařence. Rovnání na konci procesu je velmi neefektivní, řadí se mezi ztráty ve výrobě a negativně ovlivňuje výslednou cenu produktu a zisk společnosti. Při optimalizaci výrobního procesu je značné úsilí zaměřeno na omezení rovnání po procesu svařování. [89]

Rovnění pomocí přívodu tepla využívá pro rovnání stejný princip, který způsobuje deformace svarových spojů. Pomocí lokálního ohřevu dochází s natváření ohřátého objemu a při chladnutí dochází ke stažení. Toto stažení se úspěšně využívá pro rovnání ocelových konstrukcí. Plyne z toho jasné pravidlo – vždy je nutné nahřívát delší stranu, rovnáním pomocí přívodu tepla mohou vždy pouze zkracovat. Pro různé deformace se využívá více typů ohřevů např. čárový, bodový, pásový nebo klínový, viz obrázek 51. [89]



Obrázek 51: Typy ohřevů při rovnání pomocí přívodu tepla [89]

### 3. Cíl disertační práce

Z předchozí teoretické a rešeršní části vyplývá, že problém vzniku deformací je velmi závažný, a proto je potřeba hlubšího poznání zejména v oblasti simulací svařování vysokopevnostních ocelí nejpoužívanější průmyslovou metodou – tzn. MAG svařováním.

Při řešení problematiky deformací se práce bude věnovat mikrolegované jemnozrné oceli S960QL. Pro tyto materiály však v dostupných simulačních softwarech chybí materiálová vstupní data, a proto je v současnosti realizace těchto simulací velmi obtížná. Současně lze konstatovat, že uvedený materiál začíná být v průmyslové praxi čím dál více používán ve spojení s vícevrstevným svařováním (středních a větších tloušťek materiálů). Jeho další studium a prohloubení znalostí týkající se simulací svařování s účelem omezit výsledné deformace bude proto prospěšné jak pro všeobecnou znalost, tak současně pro průmyslový sektor.

**Hlavním cílem DP tedy bude: „Výzkum možnosti využití numerických simulací svařovacího procesu pro mikrolegovanou jemnozrnou vysokopevnostní konstrukční ocel S960QL při svařování vícevrstevných tupých spojů“.**

Hlavního stanoveného cíle bude dosaženo prostřednictvím řešení dílčích cílů, které lze definovat následovně:

- a) Vytipování vhodného simulačního softwaru a ověření vhodnosti jeho použití pro predikci deformací v procesu svařování.
- b) Návrh materiálového modelu pro simulaci procesu svařování základního materiálu S960QL.
- c) Validace vstupních dat navrženého materiálového modelu pro vybraný případ svařovacího spoje.
- d) Analýza vlivu procesu svařování na vznik deformací a ověření, zda zvolený software je schopen tyto vlivy identifikovat.

Získané a publikované výsledky disertační práce pomohou průmyslové praxi s návrhem a optimalizací procesu. S rostoucí cenou lidské práce a základních materiálů začíná být neověřená změna procesu velmi nákladná a pro „průmyslový podnik“ nepřijatelná, proto autor předpokládá i velký aplikační potenciál získaných poznatků do průmyslové praxe.

## 4. Experimentální část

Experimentální část disertační práce (DP) obsahuje jednotlivé dílčí úkoly, které korespondují se stanovenými cíli DP – viz kapitola 3.

### 4.1. Vytipování vhodného simulačního softwaru a ověření vhodnosti jeho použití pro predikci deformací

DP se zabývá procesem svařování a MKP simulační software bude využit jako nástroj pro predikci deformací pro předem zvolené modifikace svařovacího procesu. Disertační práce se však nezabývá problematikou tvorby MKP programu nebo porovnáním výsledků rozdílných softwarů (sw).

Před provedením většího počtu experimentů v rámci DP je nutné vybrat jeden určitý MKP software vhodný pro použití. Jak již bylo zmíněno v předchozích částech práce, mezi dva nejrozšířenější zástupce specializovaných MKP softwarů pro simulaci procesu svařování patří: ESI Sysweld a Hexagon Simufact Welding. Jako další zástupce lze uvést např. software: SWANTEC SOPRAS nebo FabWeld, viz kapitola 2.1.4.

#### 4.1.1. Vytipování vhodného simulačního softwaru

Vzhledem k zaměření DP a stanoveným cílům bylo rozhodnuto, že pro potřeby nebudou využívány obecně použitelné MKP simulační sw, ale specializované sw, určené přímo pro technologické operace svařování.

Pro plánovaný experiment byl na základě dostupnosti, aplikovatelnosti, jednoduchosti využití a specializaci vytipován simulační software Hexagon Simufact Welding ve verzi 2021.1. Tento software se využívá v průmyslu pro optimalizaci svařovacích procesů. Oblast aplikace zvoleného softwaru je od automobilového průmyslu až po všeobecné strojírenství. Software využívají např. společnosti: Audi, Volkswagen, ZF, Bosch, Siemens apod. [77]

Zvolený sw není v akademické sféře významně zastoupen, z důvodu pozdějšího uvedení na trh než konkurenční software Sysweld. Jeho akademické využití je tedy zatím poměrně limitované, což je další důvod pro použití v DP. Dále byl software ve výběrovém řízení investičního projektu OP VVV ERDF na ČVUT v Praze vybrán pro nákup univerzitní licence na FS pro účely výuky a výsledky této disertační práce mohou posloužit také k ověření možností sw.

Velkou výhodou sw Simufact Welding je jeho spojení s další strojírenskou technologií – tvářením. Po provedení experimentu v disertační práci může další výzkum navázat propojením simulací tváření a svařování.

#### 4.1.2. Ověření vhodnosti použití vybraného softwaru pro predikci deformací

Před začátkem výzkumu přesnosti predikce vybraných vlivů svařovacího procesu na výsledné deformace vysokopevnostních konstrukčních ocelí pomocí simulačního softwaru, byl navržen jednoduchý experiment pro ověření vhodnosti použití sw pro predikci deformací. Pro experiment byl navržen jednovrstvý koutový spoj za využití základního materiálu dostupného v materiálové databázi vybraného sw (Simufact Material).

Účelem ověření vhodnosti výběru sw je porovnání výsledků simulace s výsledky dosaženými na reálném svařenci. V průběhu experimentu byla měřena teplota při svařování vzorku (pomocí termočlánků typu K) a naměřené tepelné cykly byly vzájemně porovnány s tepelnými cykly získanými pomocí simulace. Teplota je hnací silou deformací, proto hodnocení teplotního cyklu je i jednou z možností ověření přesnosti simulace. Při návrhu experimentu bylo v plánu měřit i deformace svařence. Pro měření deformací byly použity magnetické úchylkoměry, které byly přiloženy na svařenec před a po svaření. Tato metoda vykazovala velkou chybovost ( $\pm 10^\circ$ ) a navíc software Simufact Welding nedokáže přímo vyhodnotit změnu úhlu. Proto naměřené hodnoty deformací nebudou v tomto experimentu vyhodnoceny a pro další experimenty bude zvolena jiná metoda hodnocení deformací, kde bude možné přímo porovnat naměřené hodnoty a výstupy ze simulace. V dalších kapitolách úvodního experimentu bude věnována pozornost pouze porovnání teplotních cyklů.

##### **Volba základního materiálu**

Materiálová databáze softwaru Simufact Material obsahuje knihovnu materiálů se specifikovanými hodnotami fyzikálních a mechanických vlastností, které slouží jako vstupní data pro simulaci. Tyto hodnoty jsou uvedeny v požadovaném rozsahu teplot (od 25 °C až po 1300 °C). Materiálová knihovna zatím obsahuje omezené množství materiálů. U každého typu materiálu (konstrukční ocel, nástrojová ocel, korozivzdorná ocel, neželezné kovy a jejich slitiny...) je vždy uvedeno pouze několik nejčastěji používaných zástupců, viz tabulka 11. Veškeré uvedené charakteristiky (fyzikální, materiálové) je možné v případě nutnosti upravit dle konkrétních požadavků. Materiálová databáze však neobsahuje specifikaci oceli S960QL, která je hlavním předmětem zájmu disertační práce.

Tabulka 11: Oceli pro svařování v materiálové databázi Simufact Material [90]

Material	Minimum temperature [°C]	Maximum temperature [°C]	DIN	JIS	AISI	AWS
16MnCr5-SPM_sw	19.85	1500	1.7131	SCR...	5115	
20MnCr5-MPM_sw	20	1500	1.7147	SCR4...	5120	
22MnB5-JMP-MPM_sw	25	1400	1.5528			
DC04-JMT-SPM_sw	25	1500	1.0338			
S235-JMP-MPM_sw	25	1400	1.0116	SN4...	1311	
S235-SPM_sw	20	1300	1.0037	SN4...	1311	
S355J2G3-MPM_sw	20	1300	1.0570	SM5...	2133	
S355J2G3-SPM_sw	20	1300	1.0570	SM5...	2133	
S690QL-JMP-MPM_sw	25	1400	1.8928	SMA...	2625	
S690QL-SPM_sw	25	1300	1.8928	SMA...	2625	
SG1-JMP-MPM_sw	25	1400	1.5112			ER70-S
SGH440-SPM_sw	20	1300				
SHGA370-SPM_sw	20	1300				
STKM13A-SPM_sw	20	1300		G3445		
X10CrMoVNb9-1-SPM_sw	20	1500	1.4903		P91	
X10CrMoVNb9-1-w_sw	20	1500	1.4903		P91	

Pro první ověření výsledků simulace byla zvolena jemnozrnná ocel S355J2G3. Tato ocel byla zvolena z důvodu její podobnosti v jemnozrnné struktuře oceli S960QL, a zejména z pohledu jejího velmi širokého zastoupení v průmyslu, bezproblémové svařitelnosti a minimálnímu vlivu fázové transformace (zákalných struktur) na výsledky svařování. V navrženém experimentu bylo cílem validovat software na jednoduchém experimentu, kde vliv fázových transformací bude minimální. Po validaci na jednoduché úloze lze přistoupit k náročnějším aplikacím.

Jako základní materiál pro výrobu reálného ověřovacího vzorku byla tedy zvolena konstrukční ocel o tloušťce 8 mm a jakosti S355J2+N. Jakost S355J2G3 se již nedodává (nevyrábí), její materiálový ekvivalent používaný v průmyslu je nyní S355J2+N.

Svarový spoj byl svařovaný robotizovanou metodou MAG (tzn. metoda 135 podle EN ISO 4063). Jako přídatný materiál byl použitý svařovací drát plného průřezu G 46 4 M21 4Si1 (podle EN ISO 14341-A (*Svařovací materiály - Drátové elektrody pro obloukové svařování nelegovaných a jemnozrnných ocelí v ochranném plynu a jejich svarové kovy – Klasifikace*)). Tato kombinace je nejrozšířenější kombinací v oblasti průmyslových svařovaných konstrukcí.

Mechanické vlastnosti obou zvolených materiálů (základního i přídatného) jsou uvedeny v tabulce 12, chemické složení je uvedeno v tabulce 13.

Tabulka 12: Mechanické vlastnosti použitých materiálů [91, 92]

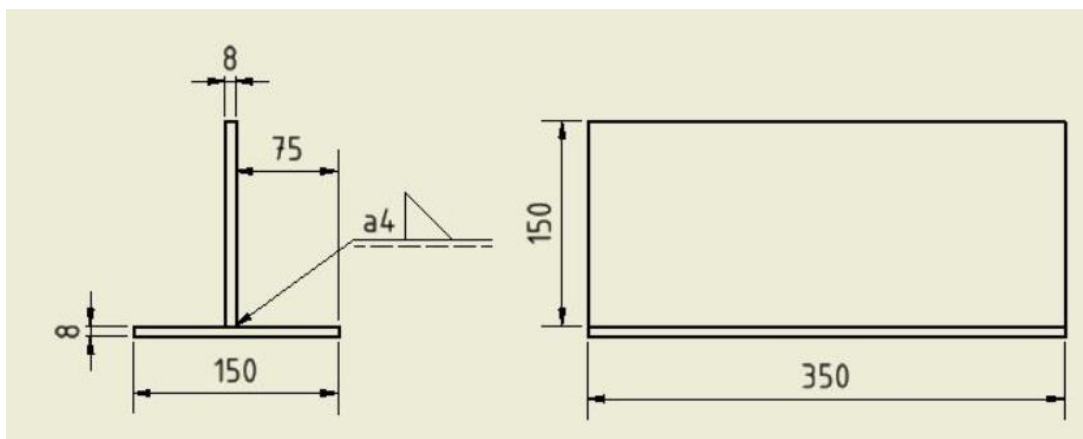
Mechanické vlastnosti				
Materiál	Mez kluzu Rp0,2 [MPa]	Mez pevnosti Rm [MPa]	Tažnost A [%]	Rázová houževnatost KV -40°C [J]
S355J2+N	355	510-680	22	27
G 46 4 M21 4Si1	460	530-680	20	47

Tabulka 13: Chemické složení použitých materiálů [91, 92]

Prvek	Chemické složení [% hm.]					
	C	Si	Mn	P	S	Cu
S355J2+N	≤ 0,23	≤ 0,60	≤ 1,70	≤ 0,035	≤ 0,035	≤ 0,6
G 46 4 M21 4Si1	0,06 - 0,14	0,80 - 1,20	1,60 - 1,90	≤ 0,025	< 0,025	≤ 0,35

### Volba konstrukce svarového spoje

Z důvodu omezení možnosti vzniku chyb při specifikaci okrajových podmínek byl zvolen nejjednodušší typ svaru pro specifikaci, a to koutový svar typu T o jmenovité velikosti svaru a4 ( $a = 4$  mm). Detailní specifikace konstrukce svarového spoje je uvedena na obrázku 52.



Obrázek 52: Specifikace konstrukce svarového spoje pro validaci sw

### Specifikace procesu svařování

Svařování vzorku bylo realizováno na Ústavu strojírenské technologie, Fakulty strojní, ČVUT v Praze v Laboratoři výuky svářečských technologií. Pro svařování bylo použito robotické svařovací pracoviště s průmyslovým robotem Fanuc Arc Mate 100iC s řídicí jednotkou R-30iA a se svařovacím zdrojem pro metodu MAG - Fronius Trans Puls Synergic 3200 CMT. Parametry použité pro svařování jsou uvedeny v tabulce 14. Parametry byly voleny dle zkušeností autora, s cílem dosáhnout přesné velikosti koutového svaru a4. [J1]

Pro výpočet tepelného příkonu byl použit koeficient účinnosti svařovacího procesu zjednodušený dle EN 1011 ( $k=0,8$  [1]) viz výpočtový vztah (5). Jako ochranná atmosféra byl použitý směsný ochranný plyn skupiny M21 (82% Ar + 18% CO<sub>2</sub>) dle EN ISO 14175 (*Svařovací materiály - Plyny a jejich směsi pro tavné svařování a příbuzné procesy*).

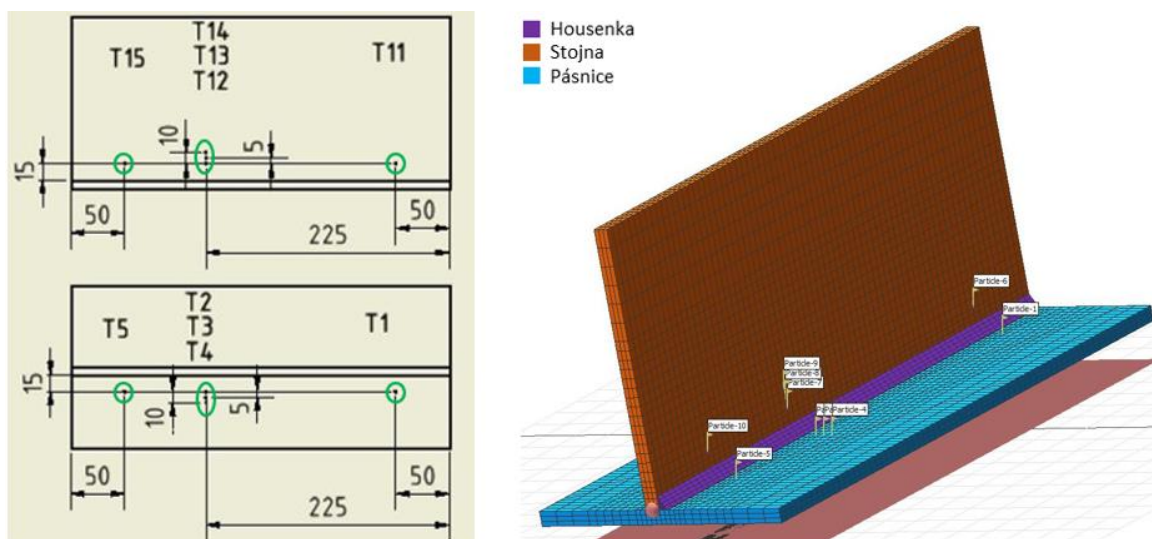
Tabulka 14: Svařovací parametry použité pro validaci sw



Svařovací parametry					
Vrstva svaru	I [A]	U [V]	$V_{sv}$ [cm·min <sup>-1</sup> ]	k [l]	Q [kJ·mm <sup>-1</sup> ]
Kořen	206	21,7	40	0,8	0,54

### Hodnocení teplotního pole

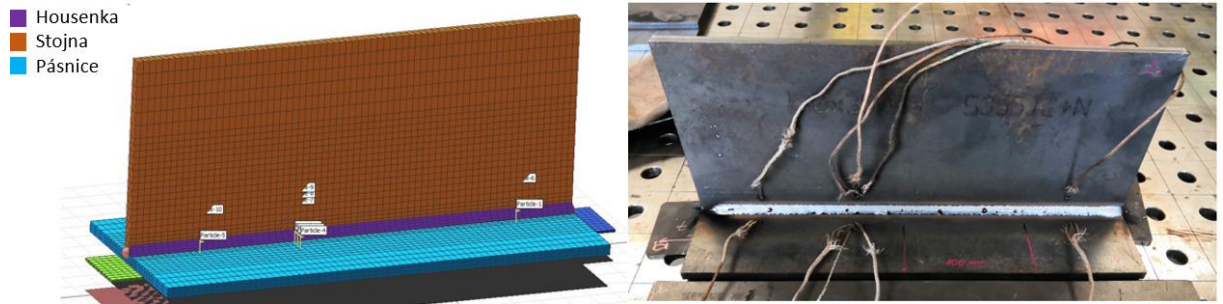
Hodnocení teplotního pole probíhalo pomocí porovnání teplotních cyklů z reálného svařování a simulace. Pro ověření teplotního pole byly na svařenec umístěny termočlánky, na definované pozice, jak v modelu pro simulaci, tak na reálný svařenec. Termočlánky byly umístěny symetricky na oba svařované díly (stojina i pásnice) svarového spoje, viz obrázek 53. Termočlánky  $T_n$  byly umístěny na pásnici a termočlánky  $TIn$  byly umístěny na stojině. Pro měření byly použity termočlánky typu K (NiCr-NiAl) a použita měřicí stanice Alhorn Almemo 5690-2. Detailní specifikace umístění termočlánků a jejich rozmístění na MKP modelu je znázorněna na obrázku 53 vlevo.



Obrázek 53: Specifikace pozice termočlánků (vlevo) a umístění na MKP modelu (vpravo)

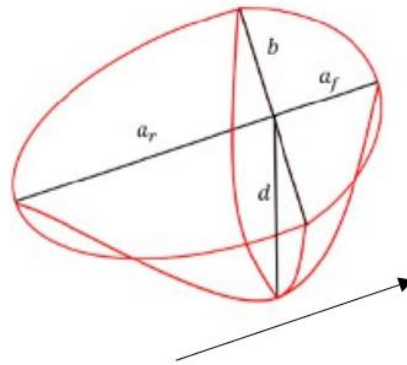
### Specifikace vstupů simulace

Geometrický 3D model svarového spoje byl převeden pomocí softwaru MSC Apex na síť hexa elementů vhodných pro výpočet v MKP softwaru. Velikost elementů byla volena jako kompromis mezi vysokou přesností výsledků a výpočetním časem. MKP síť obsahovala elementy s nízkým mřížkovým parametrem (3 mm) v okolí svarového spoje. S rostoucí vzdáleností od osy svaru došlo ke změně velikosti mřížkového parametru elementu na 5 mm a následně 10 mm. Ve směru šířky byly vždy použity 3 elementární prvky. Na obrázku 54 je vidět porovnání geometrického vstupu (MKP model) do simulace (vlevo) porovnaný s reálným svařencem (vpravo).



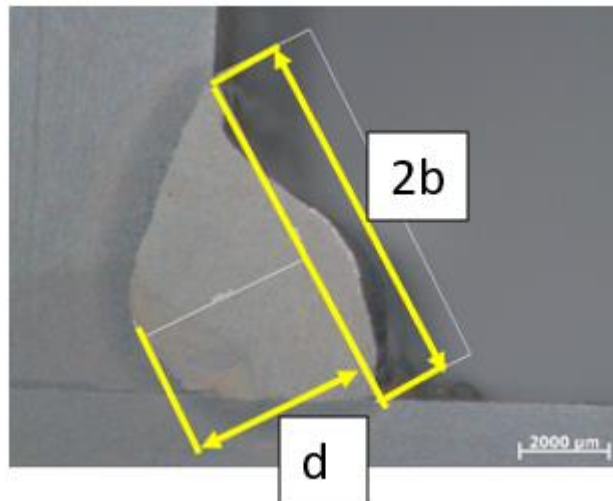
Obrázek 54: Porovnání MKP modelu (vlevo) s reálným svařencem (vpravo)

Přesná specifikace rozměrů tavné lázně je důležitým parametrem nastavení sw, ovlivňující přesnost výsledků simulace. Rozměry tavné lázně u obloukových metod pro potřeby simulace jsou znázorněny na obrázku 55.



Obrázek 55: Specifikace rozměrů tavné lázně [24]

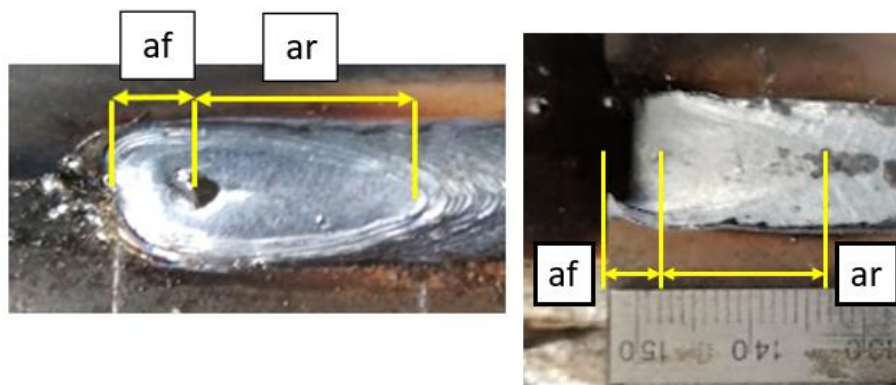
Pro zajištění vysoké přesnosti vstupních podmínek byla z příčného průřezu vzorku svarového spoje odečtena reálná šířka ( $2b$ ) a hloubka ( $d$ ) tavné lázně, viz obrázek 56. Rozměr  $d$  v této úloze odpovídá jmenovité velikosti koutového svaru  $a$ . Rozměry byly odečteny z metalografického makrovýbrusu pomocí optického mikroskopu C. Zeiss Axio Observer D1m. Pro změření rozměrů byl použit sw AxioVision. Rozměr  $a_f$  představuje délku tavné lázně před osou zdroje tepla a  $a_r$  délku tavné lázně za osou zdroje tepla (viz obrázek 55).



Obrázek 56: Reálné rozměry tavné lázně na příčném řezu makrovýbrusu

Délka tavné lázně ( $a_f + a_r$ ) byla před simulací zjišťována několika postupy – Přímým měřením koncového kráteru, měřením kamerou, a výpočtem dle doporučení v manuálu pro software Simufact Welding. [90]

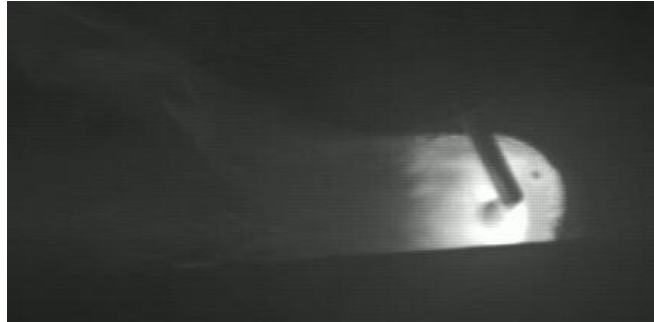
První metoda (přímým měřením) je založena na měření rozměrů tavné lázně na konci svařování. Zde lze na rozměrech koncového kráteru naměřit jak hodnota  $a_f$ , tak hodnota  $a_r$ . Toto měření je ale velice subjektivní a každý výzkumník může vyhodnotit okraj tavné lázně v jiné pozici. Pro zajištění co nejpřesnějších výsledků je nutné nastavit výrobní proces tak, že k ukončení hoření oblouku dojde okamžitě se zastavením pohybu hořáku – maximální omezení doplnění koncového kráteru o svarový kov. Navíc tato metoda vyžaduje vytvoření koncového kráteru, čemuž se v reálném svařovacím procesu je snaha zabránit (správným nastavením svařovacích parametrů), protože vznik koncového kráteru může vyvolat rovněž vznik kráterových trhlin, a proto lze použít pouze u zkušebních těles. Při dalších experimentech v rámci DP docházelo u vícevrstvých svarů k propadu přední části tavné lázně ( $a_f$ ) z důvodu drobných rozdílů v ukončení svarových housenek. Propad znemožnil získání přesných hodnot. Porovnání měření pro experiment validace a u vícevrstevného svařování je uveden na obrázku 57.



Obrázek 57: Přímé měření rozměrů tavné lázně ( $a_f + a_r$ )

Jako druhá metoda pro měření rozměrů tavné lázně byla zvolena metoda měření kamerou Xiris XVC 750. Při měření tavné lázně kamerou se nepodařilo získat žádné

relevantní výsledky. Při snímání tavné lázně nešlo přesně rozlišit okraj tavné lázně, viz obrázek 58, a proto naměřené hodnoty nejsou v textu publikovány. Pro získání vyhovujících výsledků by bylo potřeba použít speciálně upravenou kameru, která funguje i jako termokamera (např. Xiris XIR-1800).



Obrázek 58: Zobrazení tavné lázně při měření kamerou

Poslední metodou je výpočet rozměrů délky tavné lázně ( $a_f + a_r$ ) pomocí vztahů doporučených výrobcem sw Simufact Welding (19) a (20). Tyto výpočty jsou založeny na známém rozměru  $b$  zjištěného z makrovýbrusu.

$$a_f = 0,6 \cdot b \text{ [mm]} \quad (19) \text{ [24]}$$

$$a_r = 2,2 \cdot b \text{ [mm]} \quad (20) \text{ [24]}$$

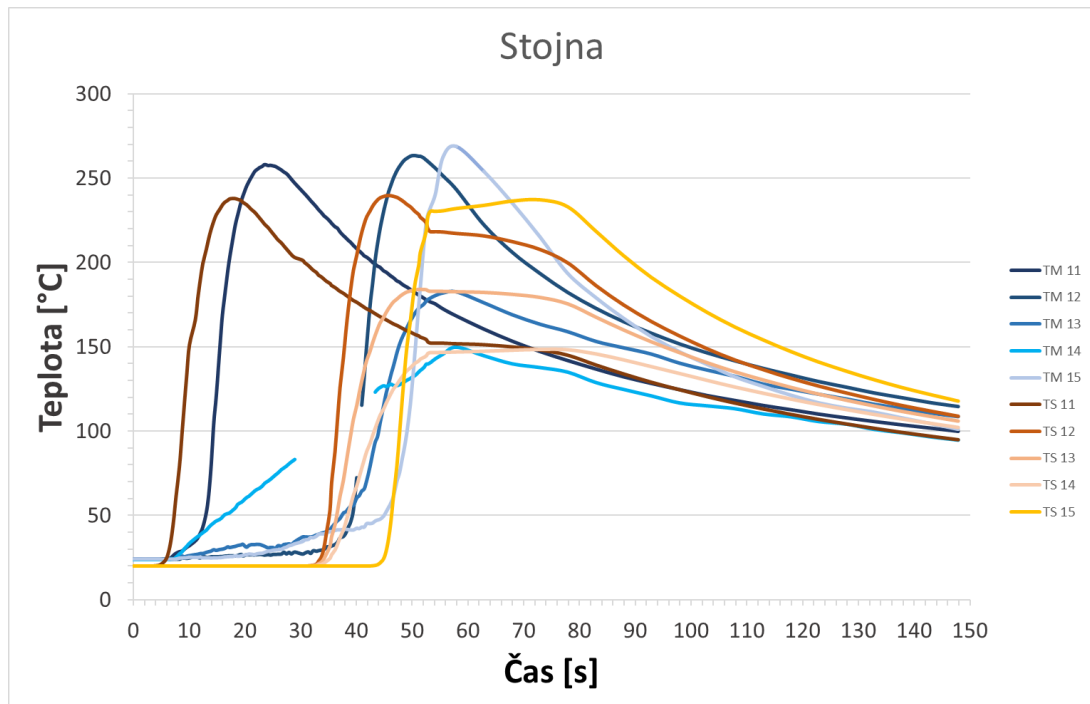
Veškeré naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 15, hodnoty využitě pro simulaci jsou zvýrazněny zeleně. Jako vstup do simulace týkající se validace sw byly zvoleny hodnoty naměřené z koncového kráteru ( $a_f$ ,  $a_r$ ) v kombinaci s hodnotami z makrovýbrusu ( $b$ ,  $d$ ).

Tabulka 15: Rozměry tavné lázně využitě pro simulaci

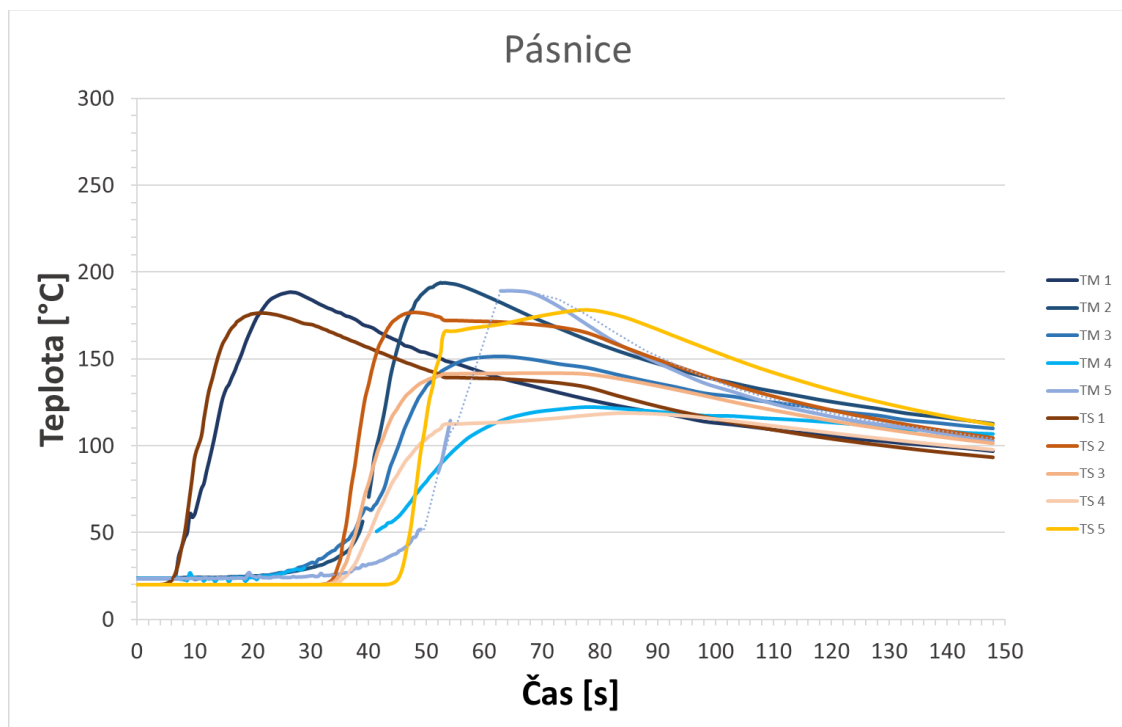
Rozměry tavné lázně								
Vrstva	Makrovýbrus		Měření koncového kráteru			Výpočet dle doporučení výrobce		
	b [mm]	d [mm]	$a_f$ [mm]	$a_r$ [mm]	$a_f + a_r$ [mm]	$a_f$ [mm]	$a_r$ [mm]	$a_f + a_r$ [mm]
Kořen	4,0	4,0	4,5	9,8	14,3	2,4	8,8	11,2

### Porovnání výsledků měření teplotních cyklů

Křivky teplotních cyklů získané měřením při svařování reálných vzorků a ze simulace jsou zobrazeny na obrázku 59 a obrázku 60. Na obrázku 59 jsou prezentována data naměřená na stojině a na obrázku 60 data naměřená na pásnici. TS (teplota simulace) značí křivky získané ze simulací a TM (teplota měření) křivky z měření na reálném svařenci. V grafech jsou vždy od sebe v čase posunuté křivky ze simulace a z měření, toto posunutí bylo provedeno pro větší přehlednost a jednodušší porovnání výsledných dat.



Obrázek 59: Porovnání teplotních cyklů na stojně



Obrázek 60: Porovnání teplotních cyklů na pásnici

Pro přehlednost jsou maximální hodnoty každého cyklu uvedeny v tabulce 16. Tabulka obsahuje maximální teplotu změřenou pomocí termočlánku a predikovanou pomocí sw Hexagon Simufact Welding. Dále je v tabulce uveden absolutní rozdíl a podíl mezi maximální teplotou naměřenou a predikovanou. Výpočtové vzorce viz (21, 22)

$$\text{Rozdíl (Tn)} = \text{Měření (Tn)} - \text{Simulace (Tn)} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (21)$$

$$\text{Podíl (Tn)} = \left(1 - \frac{\text{Měření (Tn)}}{\text{Simulace (Tn)}}\right) \cdot 100 \text{ [%]} \quad (22)$$

Tabulka 16: Porovnání výsledků měření (max. teplot) teplotních cyklů pro validaci

Výsledky verifikace										
Termočlánek	T1	T2	T3	T4	T5	T11	T12	T13	T14	T15
Měření [°C]	188,5	193,9	151,5	122,3	189,2	258,1	263,4	182,6	149,8	268,8
Simulace [°C]	175,6	173,9	140,6	118	173,8	237,1	239,5	183,4	147,9	237,3
Rozdíl [°C]	12,9	20	10,9	4,3	15,4	21	23,9	-0,8	1,9	31,5
Podíl [%]	6,8	10,3	7,2	3,5	8,1	8,1	9,1	-0,4	1,3	11,7

### Hodnocení výsledků měření

Rozdíl mezi naměřenými maximálními teplotami a predikovanými teplotami je okolo 10 %, pouze na dvou termočláncích T2 (10,3 %) a T15 (11,7 %) byl rozdíl větší než 10%. Takováto přesnost je v porovnání s publikovanými výsledky jiných autorů vyhovující. [15, 17, 18]

Na základě výsledků experimentu byla potvrzena správná funkčnost simulačního softwaru pro jednoduchý svarový spoj s materiálem vybraným z materiálové databáze. Jako důsledek pozitivního výsledku potvrzení lze přistoupit k dalšímu kroku při řešení zkoumané problematiky.

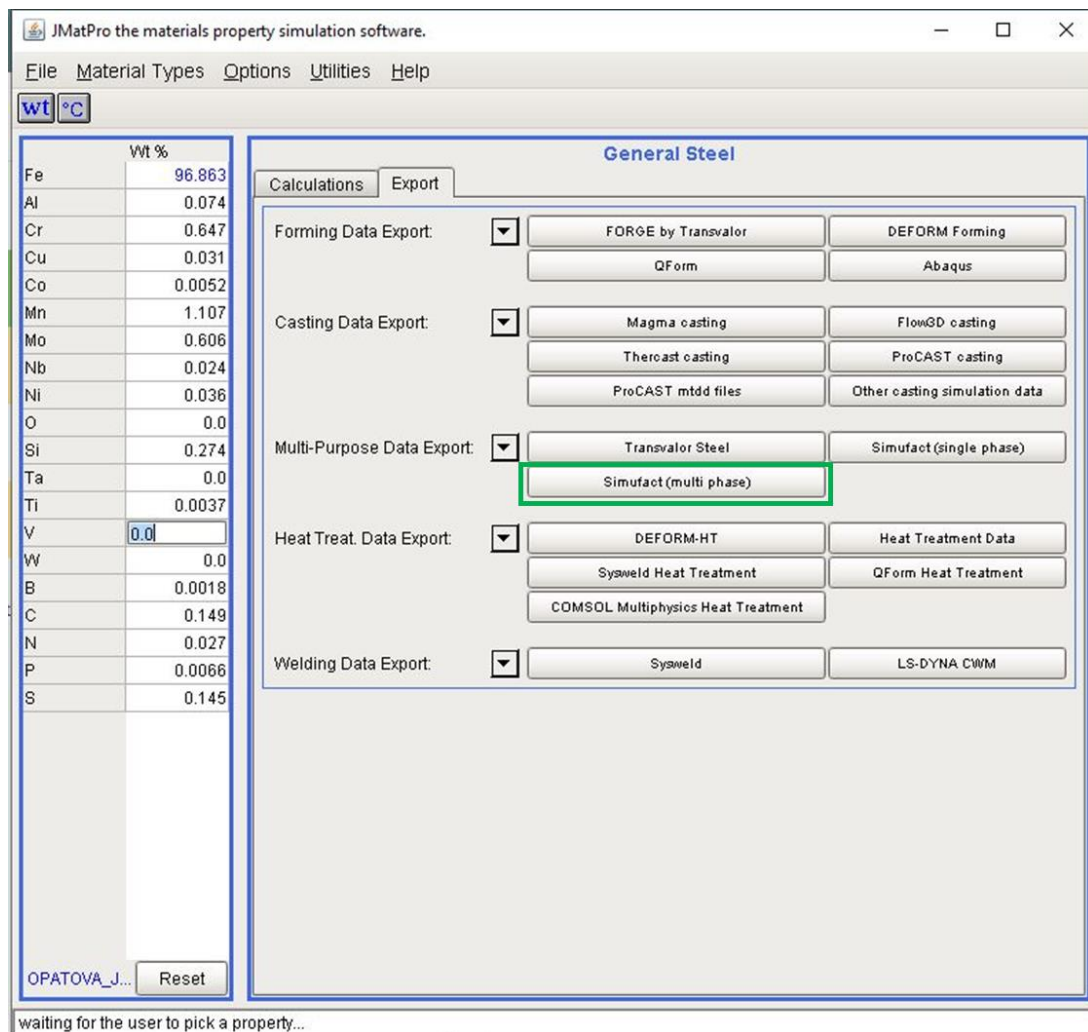
V následujících experimentech týkajících se ověření vstupních dat pro materiál S960QL budou hodnoceny jak teplotní cykly, tak makrodeformace způsobené procesem svařování.

## 4.2. Návrh materiálového modelu pro simulaci procesu svařování materiálu S960QL

Protože materiálová data pro zvolenou vysokopevnostní ocel S960QL chyběla v materiálové databázi Simufact Material, bylo nutné přistoupit k návržení nového materiálového modelu.

Pro vytvoření nového materiálového modelu doporučuje výrobce Simufact Welding použití softwaru JmatPro od společnosti Sente Software Ltd. Tento software je schopný na základě chemického složení určit fyzikální a strukturní vlastnosti oceli v závislosti na teplotě pro všechny alotropické fáze – ferit, perlit, austenit, bainit a martenzit. Výpočet materiálového modelu byl proveden ve spolupráci s pracovníky z Regionálního technologického institutu fakulty strojní, Západočeské univerzity v Plzni.

Vypočtený materiálový model ze sw JmatPro byl následně exportován (viz obrázek 61) do materiálového modelu (soubor a koncovkou \*.jmat). Tento soubor lze následně nahrát do materiálové databáze programu Simufact Material.



Obrázek 61: Export materiálového modelu ze sw JmatPro.

Pro výpočet materiálového modelu byly k dispozici dva zdroje chemického složení základního materiálu. První informace o chemickém složení byly převzaty z inspekčního certifikátu 3.1 dle EN 10204 (*Kovové výrobky – Druhy dokumentů kontroly*), druhé byly založeny na měření chemického složení pomocí spektrální analýzy, provedené na Ústavu strojírenské technologie FS ČVUT v Praze. Hodnoty chemického složení obou variant jsou uvedeny v tabulce 17.

Spektrální analýza byla provedena na stolním jiskrovém optickém emisním spektrometru Q4 TASMAN od společnosti BAS Rudice.

Tabulka 17: Porovnání chemického složení

Prvek	Chemické složení [% hm.]															
	C	Si	Mn	P	S	Al	B	Cr	Cu	Mo	N	Nb	Ni	Ti	V	Zr
Insp. certifikát 3.1	0,173	0,254	1,12	0,01	0,008	0,076	0,0024	0,636	0,026	0,603	0,0044	0,029	0,036	0,004	0,003	0,001
Spektrální analýza	0,149	0,274	1,107	0,0066	<0,15	0,074	0,0018	0,647	0,031	0,606	0,027	0,024	0,036	0,0037	<0,005	0,0021
Rozdíl	0,024	-0,02	0,013	0,0034		0,002	0,0006	-0,011	-0,005	-0,003	-0,023	0,005	0	0,0003		-0,001

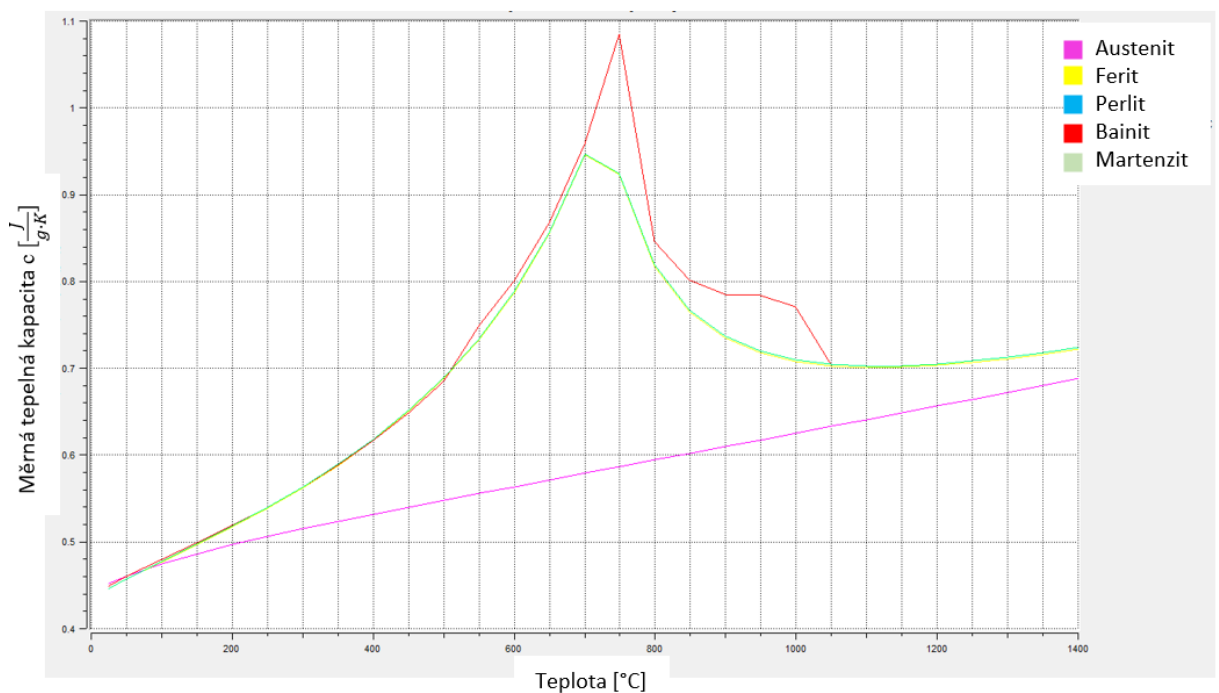
Na základě dat uvedených v tabulce 17 je viditelný rozdíl chemického složení doložený Inspekčním certifikátem 3.1 a výsledkem spektrální analýzy. Rozdíl v chemickém složení lze vyjádřit rozdílem v uhlíkovém ekvivalentu CE, viz tabulka 18. Při použití chemického složení založeného na spektrální analýze dosahuje v tomto případě uhlíkový ekvivalent CE menších hodnot. Uhlíkový ekvivalent CE byl vypočítán podle vzorce (3).

Tabulka 18: Porovnání uhlíkového ekvivalentu CE.

Prvek	Uhlíkový ekvivalent CE [%]							CE
	C	Mn	Cr	Cu	Mo	Ni	V	
Insp. certifikát 3.1	0,173	1,12	0,636	0,026	0,603	0,036	0,003	0,6122
Spektrální analýza	0,149	1,107	0,647	0,031	0,606	0,036	0,005	0,5896
Rozdíl	0,024	0,013	-0,011	-0,005	-0,003	0	-0,002	0,0226

Pro obě varianty chemického složení ZM byly vytvořeny materiálové modely a následně porovnány v dalších částech disertační práce.

Jako příklad získaných tepelných dat je uvedena závislost měrné tepelné kapacity  $c$  [ $\frac{J}{g \cdot K}$ ] na teplotě - viz obrázek 62.



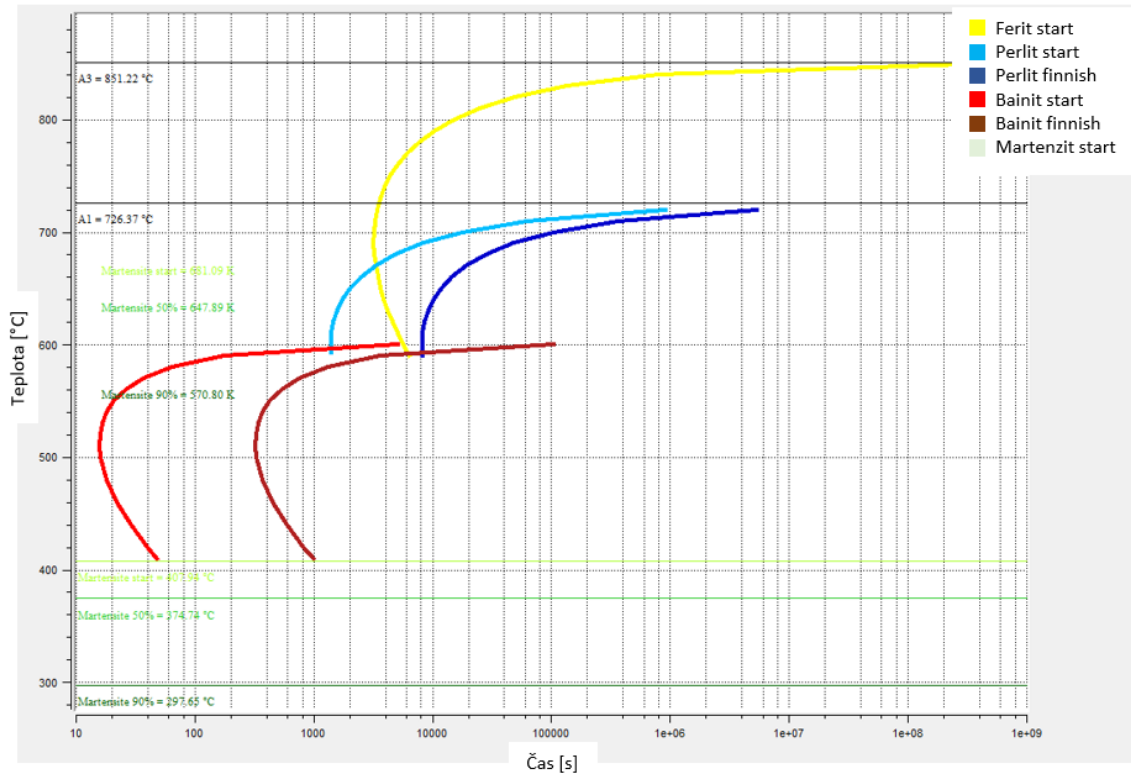
Obrázek 62: Měrná tepelná kapacita pro data získaná spektrální analýzou

Při vytváření nového materiálového modelu z oceli doporučuje výrobce sw zadat do materiálové databáze hodnotu skupenského tepla tání oceli 264 000 J/kg. Tato hodnota byla zadána dle doporučení výrobce sw.

Pro dosažení co nejpřesnějších výsledků je nutné při simulaci procesu svařování materiálu S960QL provádět termomechanickou simulaci se zahrnutím fázových přeměn. Ocel S960QL dosahuje svých vlastností významně díky fázové transformaci při chladnutí. Proto byl za pomoci sw JmatPro sestaven také ARA diagram, který byl dále

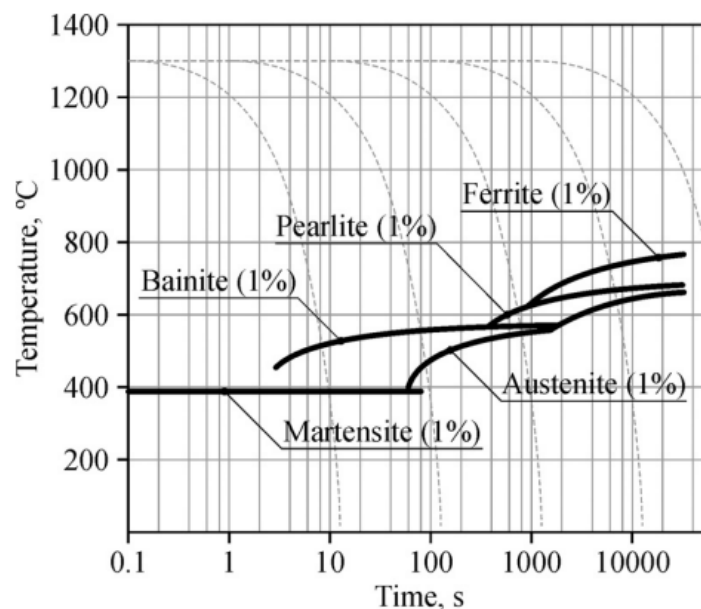


použitý jako zdroj dat pro simulaci při chladnutí. Vypočítaný ARA diagram pro ocel S960QL je uveden na obrázku 63.

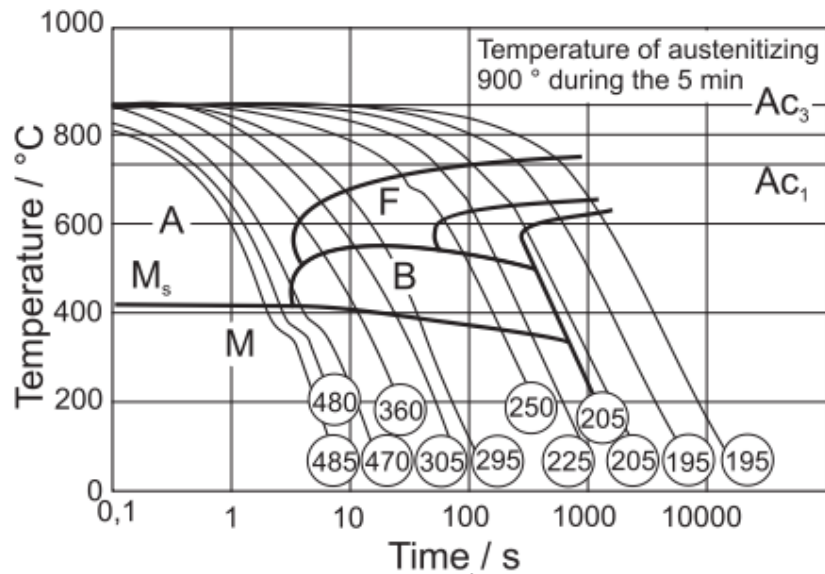


Obrázek 63: ARA digram S960QL

Získaný ARA digram byl porovnaný s dostupnými ARA diagramy pro ocel S960QL uvedenými na obrázku 64 a obrázku 65.



Obrázek 64: ARA diagram S960QL [93]



Obrázek 65: ARA diagram S960QL [94]

Oba uvedené ARA diagramy [93, 94] se liší v oblasti ferit start. Oba zdroje ale uvádí teplotu Martenzit start okolo 400°C a tvarově jsou křivky bainit start také podobné ARA diagramu oceli S960QL, získaného pomocí sw JmatPro. Proto získaný ARA diagram byl použit jako zdroj pro simulaci svařování v oblasti chladnutí a vlivu fázových transformací.

Pro materiálový model potřebný na simulaci procesu svařování je nutné specifikovat mez kluzu  $R_{p0,2}$  a mez pevnosti  $R_m$ . Na základním materiálu byla opakovaně (7x) provedena tahová zkouška jednoosým tahem při pokojové teplotě dle EN ISO 6892-1 (*Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*) a také zkouška rázem v ohybu při -40°C dle EN 10045-1 (*Kovové materiály - Zkouška rázem v ohybu podle Charpyho - Část 1: Zkušební metoda (V a U vruby)*). Výsledné průměrné hodnoty mechanických vlastností jsou uvedeny v tabulce 19.

Tabulka 19: Mechanické vlastnosti S960QL

Mechanické vlastnosti S960QL				
Materiál	Mez kluzu Rp0,2 [MPa]	Mez pevnosti Rm [MPa]	Tažnost A [%]	Rázová houževnatost KV -40°C [J]
S960QL	1020	1054	13	110

Po vytvoření materiálového modelu v softwaru JMatPro následovalo jeho nahrání a úprava v softwaru Simufact Material. Po těchto finálních úpravách bylo přistoupeno k validaci vstupních dat pomocí porovnání výsledků simulací s reálným svarovým spojem.

### 4.3. Validace vstupních dat navrženého materiálového modelu pro vybraný případ svarového spoje

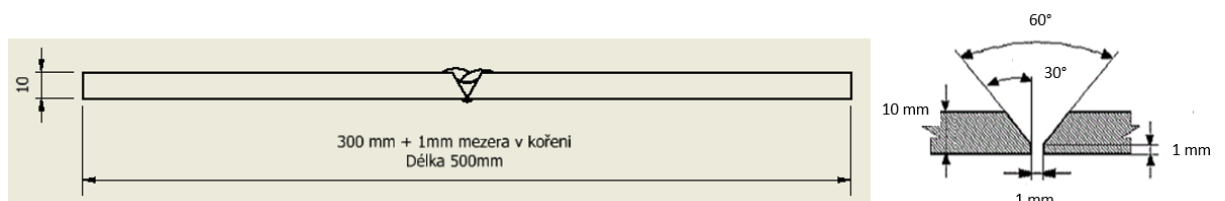
Validace navrženého materiálového modelu S960QL byla provedena pomocí porovnání s reálným svařencem ze stejné oceli popsáno v následující kapitole 4.3.1.

Porovnání bylo založeno na porovnání teplotních cyklů a makroskopických deformací po vychladnutí svařence.

### 4.3.1. Návrh svarového spoje

#### Konstrukce svarového spoje

Pro validaci materiálového modelu byl zvolen vícevrstvý tupý V svar z oceli S960QL o tloušťce 10 mm. Byl zvolený svarový spoj o délce 500 mm a šířce 300 mm. Příprava svarových ploch byla zvolena dle doporučení normy EN ISO 9692-1 (*Svařování a příbuzné procesy – Doporučení pro přípravu svarových spojů – Část 1: Svařování ocelí ručně obloukovým svařováním obalenou elektrodou, tavící se elektrodou v ochranném plynu, plamenovým svařováním, svařováním wolframovou elektrodou v ochranné atmosféře*). Úhel rozevření byl zvolen maximální doporučený pro tupý V svar zvolené tloušťky, tzn. 60°. Svarová mezera mezi svařovanými díly a velikost otupení byly shodně 1 mm. Znázornění konstrukčního návrhu svarového spoje viz obrázek 66. Zvolená konstrukce svarového spoje reprezentuje běžný svarový spoj používaný v technické praxi.

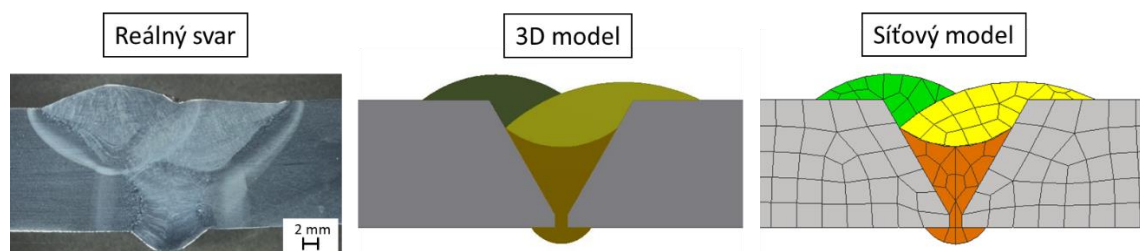


Obrázek 66: Konstrukce svarového spoje

Pro reálný svařenec byl použitý stejný základní materiál, jako pro návrh materiálového modelu (konstrukční ocel S960QL).

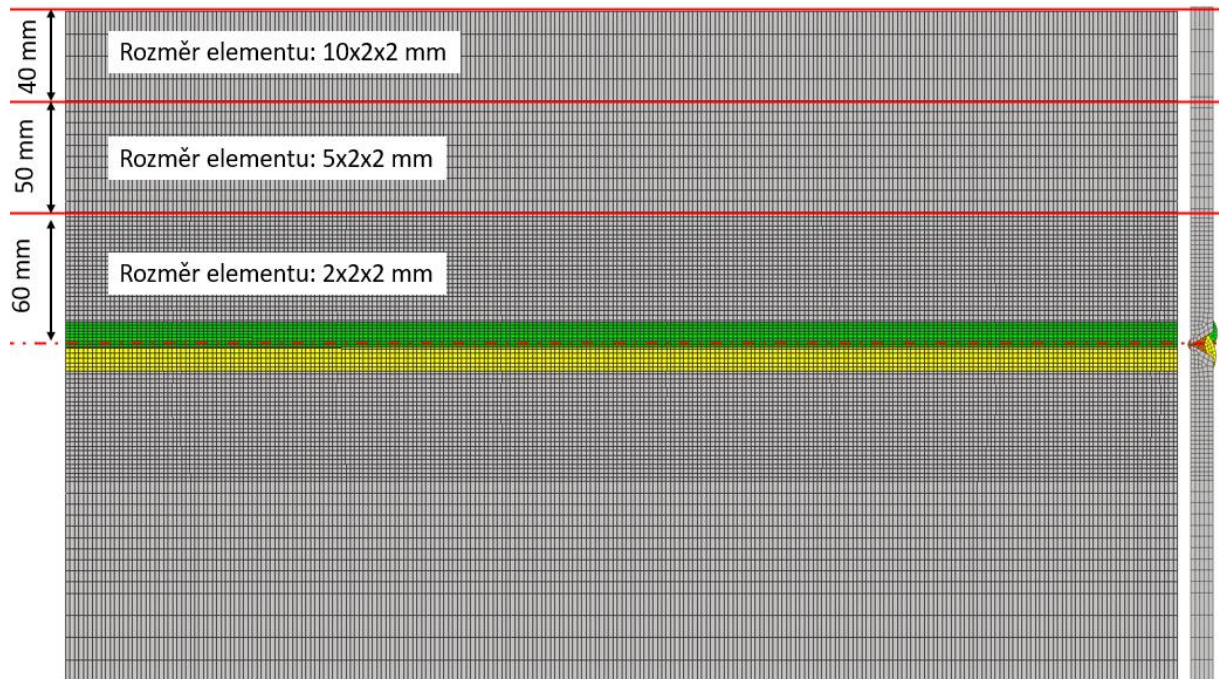
Veškeré chemické a mechanické vlastnosti použité oceli jsou uvedeny v kapitole 4.2.

Navržený svarový spoj, včetně reálných průřezů jednotlivých svarových housenek, byl vymodelován v softwaru Inventor 2022 a následně v programu MSC Apex byla vytvořena síť pro potřeby simulace. Pro potřeby přesné konstrukce svarového spoje byl vytvořen makrovýbrus svarového spoje. Makrovýbrus byl vytvořen v metalografické laboratoři ÚST, FS, ČVUT v Praze. Pro broušení bylo využito zařízení Buehler Beta s automatickou hlavou Vektor a svarový spoj byl následně naleptán pomocí leptadla Nital 2%. Na obrázku 67 je uveden makrovýbrus v porovnání s příčnými řezy 3D modelu a síťového modelu.



Obrázek 67: Porovnání makrovýbrusu s příčnými řezy v 3D a síťovém modelu

Jako hlavní parametr sítě byl zvolen rozměr 2 mm, pro získání dostatečné přesnosti výstupu simulace a optimalizace času výpočtu. V oblasti svarového spoje byla zvolena nejvyšší hustota sítě, směrem od osy svaru v příčném směru došlo ke snížení hustoty sítě, viz obrázek 68.



Obrázek 68: Použitá síť svarového spoje – základní materiál

### Volba přídavného materiálu

Jako přídavný materiál (PM) byl zvolen svařovací drát plného průřezu o průměru 1,2 mm, označený G 89 6 M21 Mn4Ni2CrMo dle EN ISO 16834 (*Svařovací materiály – Drátové elektrody, dráty a tyče pro obloukové svařování vysokopevnostních ocelí tavící se elektrodou v ochranném plynu a jejich svarové kovy – Klasifikace*), prodáváný pod obchodním označením ED-FK 1000 od společnosti FLIESS. Tato kombinace základního a přídavného materiálu je běžně používána v průmyslové praxi, protože zajišťuje vytvoření vyhovujícího svarového spoje o vysoké pevnosti a dostatečné houževnatosti.

Pro materiálový model PM pro potřeby simulace byl použitý vypočtený model pomocí JMatPro založený na chemickém složení uvedeném v inspekčním certifikátu 3.1 dle EN 10204 a na průměrných hodnotách mechanických vlastností. Postup byl zvolen na základě výsledku simulace č. 2 (viz kapitola 4.3.4.), kde se potvrdilo, že zpřesnění chemického složení základního materiálu pomocí spektrální analýzy má minimální dopad na výsledné deformace. Při měření chemického složení u poměděného přídavného drátu by navíc mohlo chybou měření chemického složení (způsobené měděnou vrstvou na povrchu drátu) dojít ke způsobení větší chyby v simulaci než při použití chemického složení převzatého z inspekčního certifikátu. Použité chemické složení PM je uvedeno v tabulce 20.

*g*Tabulka 20: Chemické složení PM – ED-FK 1000

Prvek	Chemické složení [% hm.]															
	C	Si	Mn	P	S	Al	B	Cr	Cu	Mo	N	Nb	Ni	Ti	V	Zr
ED-FK 1000	0,1	0,82	1,78	0,06	0,01	0,003	0,001	0,37	0,017	0,57		0,02	2,25	0,073	0,003	0,004

Mechanické vlastnosti PM (plného drátu) byly ověřeny zkouškou tahem. Hodnoty rázové houževnatosti jsou převzaty z Inspekčního certifikátu 3.1. Průměrné hodnoty mechanických vlastností jsou uvedeny v tabulce 21.

Tabulka 21: Mechanické vlastnosti PM ED-FK 1000

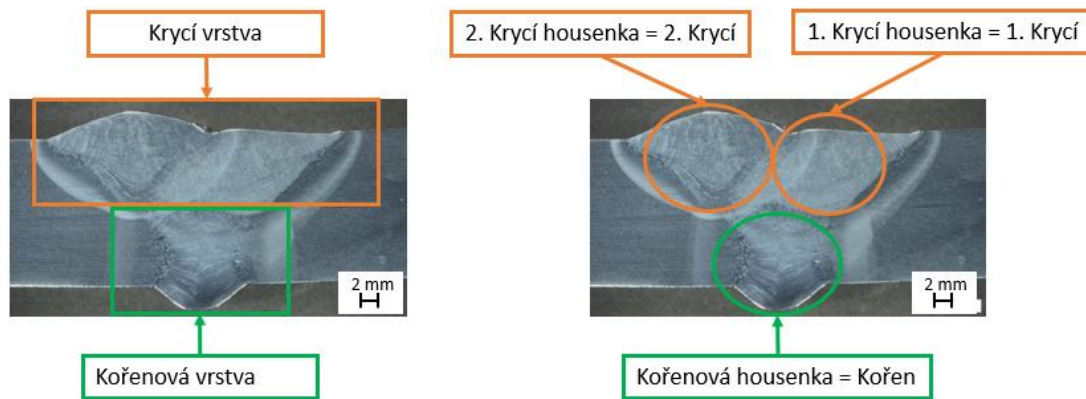
Mechanické vlastnosti ED-FK 1000				
Materiál	Mez kluzu Rp0,2 [MPa]	Mez pevnosti Rm [MPa]	Tažnost A [%]	Rázová houževnatost KV -40°C [J]
ED-FK 1000	902	1000	16	66

### Volba svařovacích parametrů

Svarový spoj byl vyhotoven ze dvou vrstev svařovaných celkem na tři housenky. V následujícím textu bude použita následující terminologie:

- Kořenová housenka = Kořen
- 1. Krycí housenka = 1. Krycí
- 2. Krycí housenka = 2. Krycí

Grafické znázornění použité terminologie je uvedeno na obrázku 69.



Obrázek 69: Použitá terminologie

Při volbě svařovacích parametrů byly vymezeny tři hlavní cíle – svařování bez přehřevu z důvodu snahy o maximální omezení možných vlivů na přesnost výsledků simulace, dosažení  $t_{8/5}$  v intervalu 5-15 s dle doporučení výrobce a vytvoření vyhovujícího svarového spoje ve stupni B podle EN ISO 5817. Volba svařovacích parametrů a kompletní návrh procesu svařování byly založeny na zkušenostech autora práce. [J2, J3, J4, J5]

Proto po provedení svařovacích zkoušek a ověření pomocí aplikace WeldCalc byly zvoleny svařovací parametry uvedené v tabulce 22. Svařovací parametry byly nastaveny na ovládacím panelu svařovacího zdroje Migatron Sigma Galaxy 400. Teplota

předehřevu se rovnala pokojové teplotě, tzn. 25°C. Teplota interpass byla nastavena na 100°C.

Tabulka 22: Svařovací parametry nastavené na svařovacím zdroji

Nastaveno na svářečce					
Vrstva	I [A]	U [V]	$v_{sv}$ [cm·min <sup>-1</sup> ]	Q [kJ·mm <sup>-1</sup> ]	$t_{8/5}$ [s]
Kořen	250	27,9	42	0,80	6,6
1. krycí	260	28,4	40	0,89	11,5
2. krycí	260	28,4	50	0,71	7,4

Při reálném svařování byly svařovací parametry zaznamenávány pomocí zařízení WeldMonitor 4.5 device s WDS software. Pro potřeby simulace byly využity tyto reálné svařovací parametry, jejichž použití má pozitivní vliv na přesnost výsledků simulace. Reálné svařovací parametry jsou uvedeny v tabulce 23. Při porovnání vneseného tepla Q a dosažených časů  $t_{8/5}$  mezi nastavenými a reálnými parametry svařování, si lze všimnout, že je rozdíl minimální.

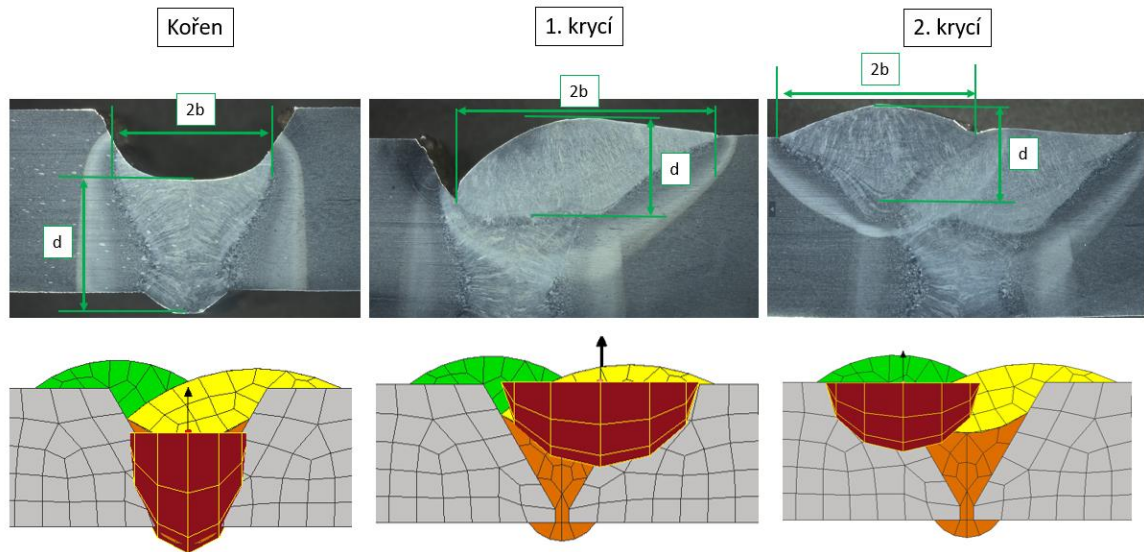
Tabulka 23: Svařovací parametry (reálné) použité pro simulaci

Reálné parametry pro simulaci					
Vrstva	I [A]	U [V]	$v_{sv}$ [cm·min <sup>-1</sup> ]	Q [kJ·mm <sup>-1</sup> ]	$t_{8/5}$ [s]
Kořen	257,8	27,1	42	0,80	6,7
1. krycí	266,9	28	40	0,90	11,8
2. krycí	272,1	27,4	50	0,72	7,5

Zvolené svařovací parametry splňují všechna doporučení výrobce základního materiálu (společnosti SSAB) a na základě zkušebního svařování, vizuální kontroly VT a zkoušky makrostruktury bylo potvrzeno, že tyto parametry jsou schopné zajistit vyhovující svarový spoj.

Při definování teplotního zdroje pro simulaci je nutné, kromě volby svařovacích parametrů (definice vneseného tepla Q), také definovat rozměry tepelného zdroje. Tepelný zdroj pro použitou technologii MAG je definován pomocí dvouelipsoidu (tepelný zdroj dle Goldaka), viz kapitola 2.1.2.

Rozměry tepelného zdroje odpovídají rozměrům tavné lázně, takže z příčného řezu svarového spoje lze šířku ( $b$ ) a hloubku ( $d$ ) jednoduše určit. Kvůli zvýšení přesnosti odečtu rozměrů byl v rámci přípravy experimentu vytvořen vzorek pro každou housenku svarového spoje. Znázornění odečtených rozměrů z makrovýbrusů a jejich porovnání s modelem tepelného zdroje je uveden na obrázku 70.



Obrázek 70: Porovnání makrovýbrusů a modelů tepelného zdroje.

Délka svarové lázně ( $a_f$ ,  $a_r$ ) lze určit více způsoby – výpočtem, měřením koncového kráteru či odečtem pomocí termokamery. Pro ověření materiálového modelu byl zvolen způsob výpočtu dle vztahů (18, 19) doporučený výrobcem softwaru Simufact Welding, viz kapitola 4.1.2. Přehled rozměrů tavných lázní pro jednotlivé housenky je uveden v tabulce 24.

Tabulka 24: Rozměry tavných lázní

Rozměry tavné lázně				
Vrstva	b [mm]	d [mm]	$a_f$ [mm]	$a_r$ [mm]
Kořen	4,5	8,7	2,7	9,8
1. krycí	7,2	6,1	4,3	15,7
2. krycí	5,7	5,0	3,4	12,4

### Volba svařovací technologie

Pro svařování vzorku pro validaci materiálového modelu byl použit robotizovaný MAG proces, na robotické svařovací pracovišti Laboratoře pro výuku svářečských technologií. Byl použit svařovací robot FANUC ARC Mate 100iC s řídicí jednotkou Fanuc R30iA připojený ke svařovacímu zdroji MIGATRONIC Sigma Galaxy 400, viz obrázek 71.



*Obrázek 71: Použité experimentální svařovací zařízení.*

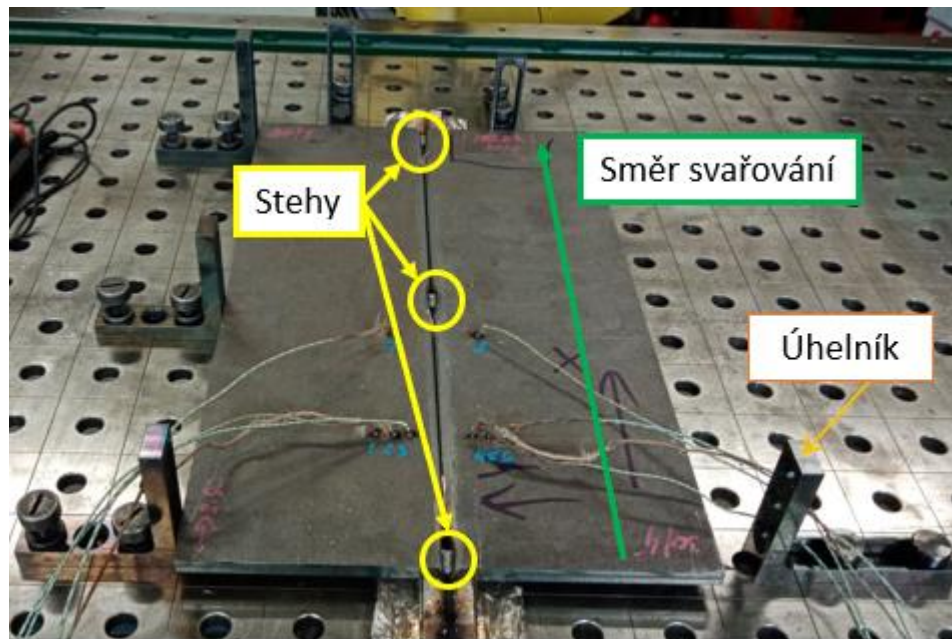
Jako ochranná atmosféra byl použit směsný plyn Corgon 18, obsahující 82% Ar a 18% CO<sub>2</sub>, tzn. aktivní směs skupiny M21 podle EN ISO 14175. Tato aktivní ochranná atmosféra je nejběžnější ochrannou atmosférou používanou v praxi při svařování vysokopevnostních konstrukčních ocelí S960QL metodou MAG.

Svarový spoj byl svařován na volno (bez upnutí), ve svarovém úkosu byly pouze vytvořeny tři stehové svary, o délce 20 mm. Pro zvolené robotické svařování je nutné, aby svařenec byl vždy ve stejné, předem definované poloze. Pro zajištění polohy byly proto použity úhelníky (dorazy), po dvou stranách svařence. Pro ochranu svařovacího stolu byl svarový spoj podložen dvěma plechy o délce 500 mm, šířce 50 mm a výšce 10 mm. Pod kořenem svarového spoje byla na stůl položena keramická podložka, které ale neměla funkci formování kořene, ale také pouze chránila svařovací stůl před poškozením.

Trajektorie svařování byla zvolena od jedné strany svařence na druhou, tzn. že svarový spoj byl vytvořen souvisle po celé délce, bez přerušování.

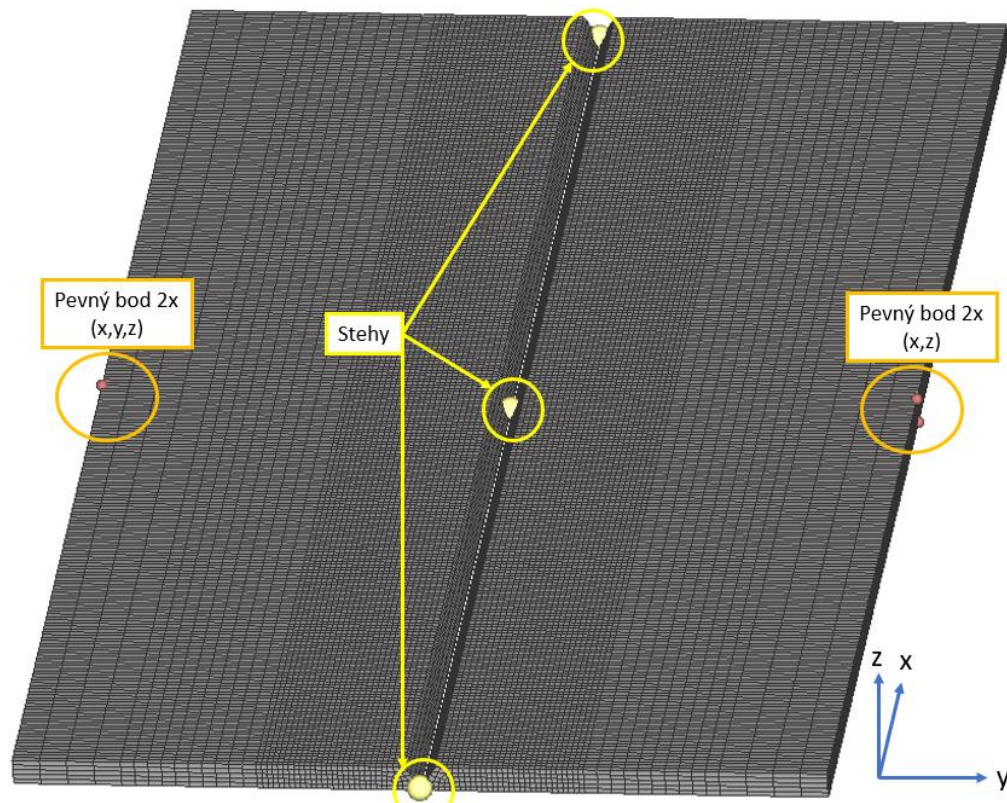
Veškeré výše zmíněné nastavení svařovacího procesu, viz obrázek 72, mělo za cíl maximalizovat deformaci svařence, protože na tomto vzorku nebyla použita žádná z metod pro omezení makroskopických deformací.





Obrázek 72: Sestava pro svařování vzorku pro validaci materiálového modelu

Při kompletním převedení konstrukce svařovací technologie (podložky a úhelníky) do simulace, následný výpočet vykazuje chyby z důvodu statické neurčitosti. Proto pro vytvoření stejného procesu v počítačové simulaci bylo nutné model zjednodušit. Do podélného středu svařence byly umístěny 4 body. Na jedné straně statické ve všech třech osách (x,y,z), a na druhé straně statické ve směru osy x a z. Díky tomu byl svařence schopný se deformovat, svařence začal být staticky určitý a výpočet simulace přestal vykazovat chyby. Tato zjednodušení bylo provedeno po konzultaci s dodavatelem softwaru. Stehy (stehové svary) byly přeneseny do konstrukce technologie v simulaci. Znárodnění přípravy svarového spoje na simulaci, viz obrázek 73.

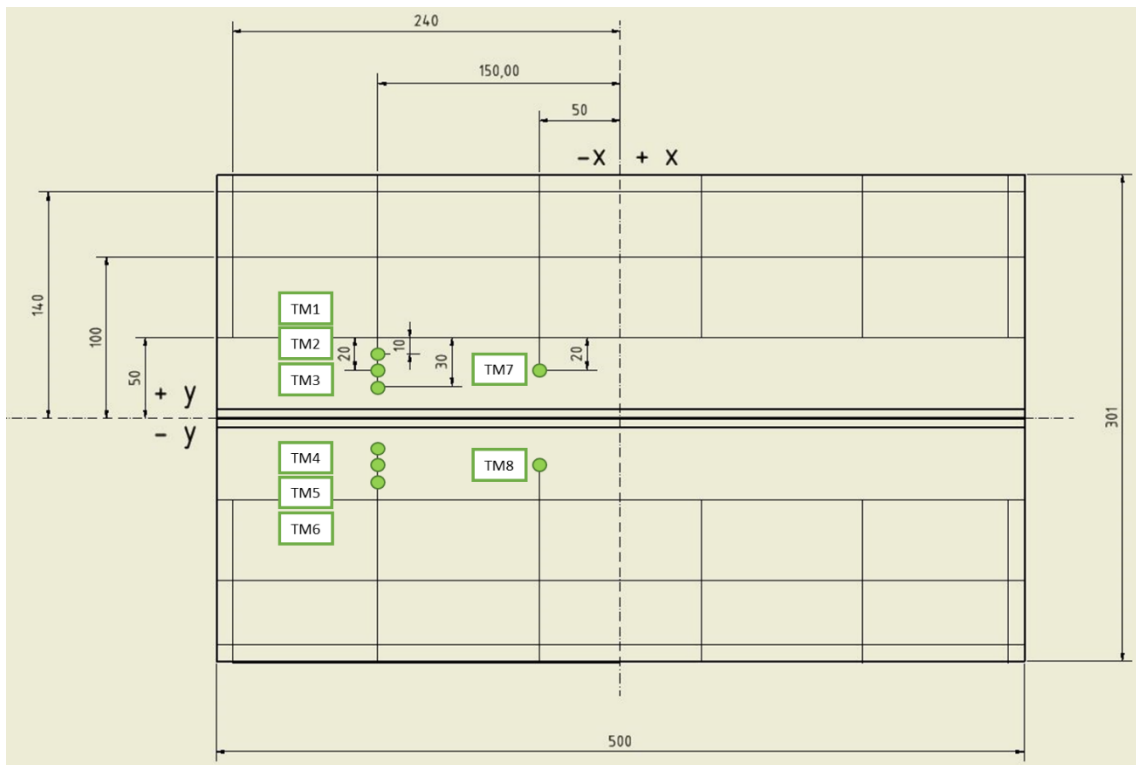


Obrázek 73: Příprava svarového spoje na simulaci

### 4.3.2. Hodnocení teplotních cyklů

Jako první z metod pro validaci správné definice materiálového modelu S960QL bylo zvoleno porovnání teplotních cyklů. Na reálný svařenec byly umístěny termočlánky typu K (NiCr-NiAl), které byly přivařeny do předem definovaných poloh na svařenci pomocí kondenzátorové svářečky BT – 2. Tyto termočlánky za pomoci měřicí stanice AHLBORN ALMEMO 5690-2M měřily data pro sestavení teplotních cyklů, které byly následně použity pro porovnání s výsledky simulace.

Vizualizace umístění termočlánků na svařenci a na modelu v simulaci, viz obrázek 74.



Obrázek 74: Umístění termočláneků na svařovaném vzorku tupého svaru

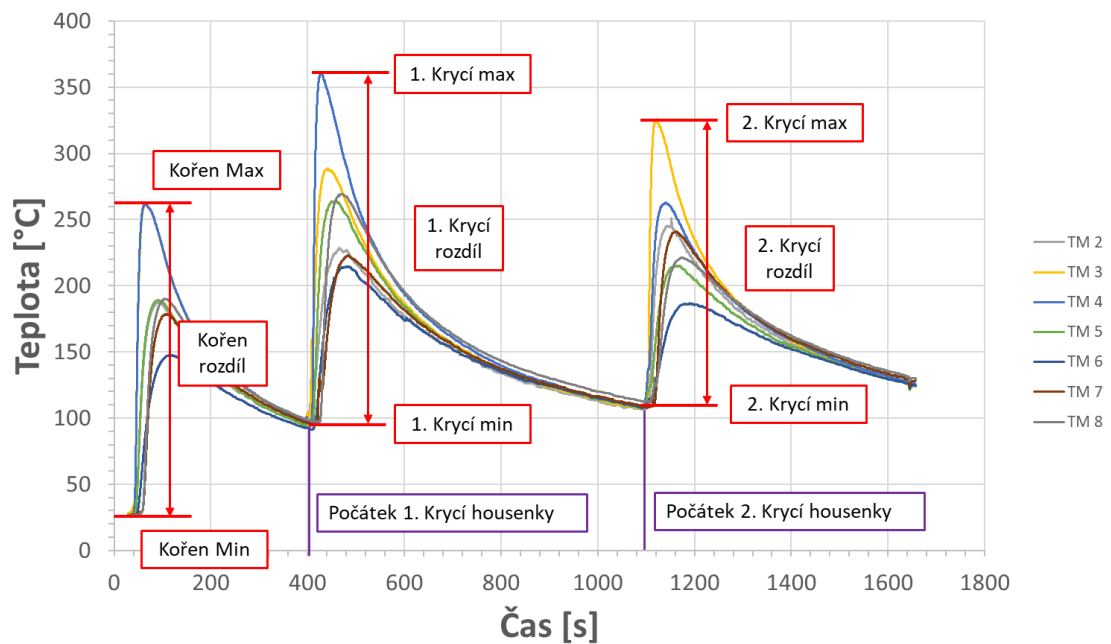
Pro sběr dat bylo celkově použito osm termočláneků, avšak termočlánek TM1 naměřil špatná data nejspíše z důvodu špatného přivaření (kontaktu) a proto byl vynechán z porovnávání teplotních cyklů.

Pro hodnocení teplotních cyklů bylo zvoleno více hodnotících kritérií:

- Maximální teplota 1. cyklu (Kořen), 2. cyklu (1. Krycí) a 3. cyklu (2. Krycí) cyklu.
- Minimální teplota 1. cyklu (Kořen), 2. cyklu (1. Krycí) a 3. cyklu (2. Krycí) (Teplota předehřevu, popř. teplota interpass).
- Rozdíl mezi maximální a minimální teplotou u každého cyklu.

Znázornění hodnocených kritérií na výsledku teplotních cyklů ze svařování reálného svařence pro porovnání (viz obrázek 75). Teplotní cyklus reálného svařování byl také použit pro definování začátku druhé a třetí housenky svaru.

## Teplotní cykly - Validace modelu



Obrázek 75: Znáornění hodnocených kritérií teplotních cyklů

Výsledné hodnoty hodnocených kritérií pro všechny termočlánky (TM1-TM8) jsou uvedeny v tabulce 25.

Tabulka 25: Výsledky teplotních cyklů reálného svařování

	Výsledky - Reálné svařování [°C]						
	TM2	TM3	TM4	TM5	TM6	TM7	TM8
Kořen min	25,7	25,6	25,5	25,7	25,5	25,6	26
Kořen max	187,5	261,2	262,0	189,1	147,5	178,4	190,1
1. Krycí min	94,3	97,7	97,6	94,0	91,1	95,2	97,0
1. Krycí max	228,6	288,5	361,3	264,2	214,6	222,9	269,3
2. Krycí min	106,4	107,2	107,8	106,8	107,6	108,3	112,3
2. Krycí max	251,3	325,6	262,9	215,3	186,7	241,2	221,3
Rozdíl Kořen	161,8	235,6	236,5	163,4	122,0	152,8	164,1
Rozdíl 1. Krycí	134,3	190,8	263,7	170,2	123,5	127,7	172,3
Rozdíl 2. krycí	144,9	218,4	155,1	108,5	79,1	132,9	109,0

Pro zjednodušení práce s daty byla v porovnání teplotních cyklů v dalších částech disertační práce vždy určena průměrná odchylka ze všech termočlánků (kromě vynechaného termočlánku č.1) pro každé hodnocené kritérium. Výsledné hodnoty jsou vypočteny pomocí vzorců (23), (24) a (25)

$$\text{Rozdíl (TMn)} [^{\circ}\text{C}] = \text{Simulace(TMn)} - \text{Reálné svařování(TMn)} \quad (23)$$

$$\text{Rozdíl (TMn)} [\%] = \frac{\text{Simulace(TMn)} - \text{Reálné svařování(TMn)}}{\text{Reálné svařování(TMn)}} \quad (24)$$

$$\text{Průměrný rozdíl} [\%] = \frac{\text{Rozdíl (TM2)} + \text{Rozdíl (TM3)} + \dots + \text{Rozdíl (TM8)}}{7} \quad (25)$$

Kde:

Simulace (TMn) = výsledky simulace pro každé kritérium a termočlánek

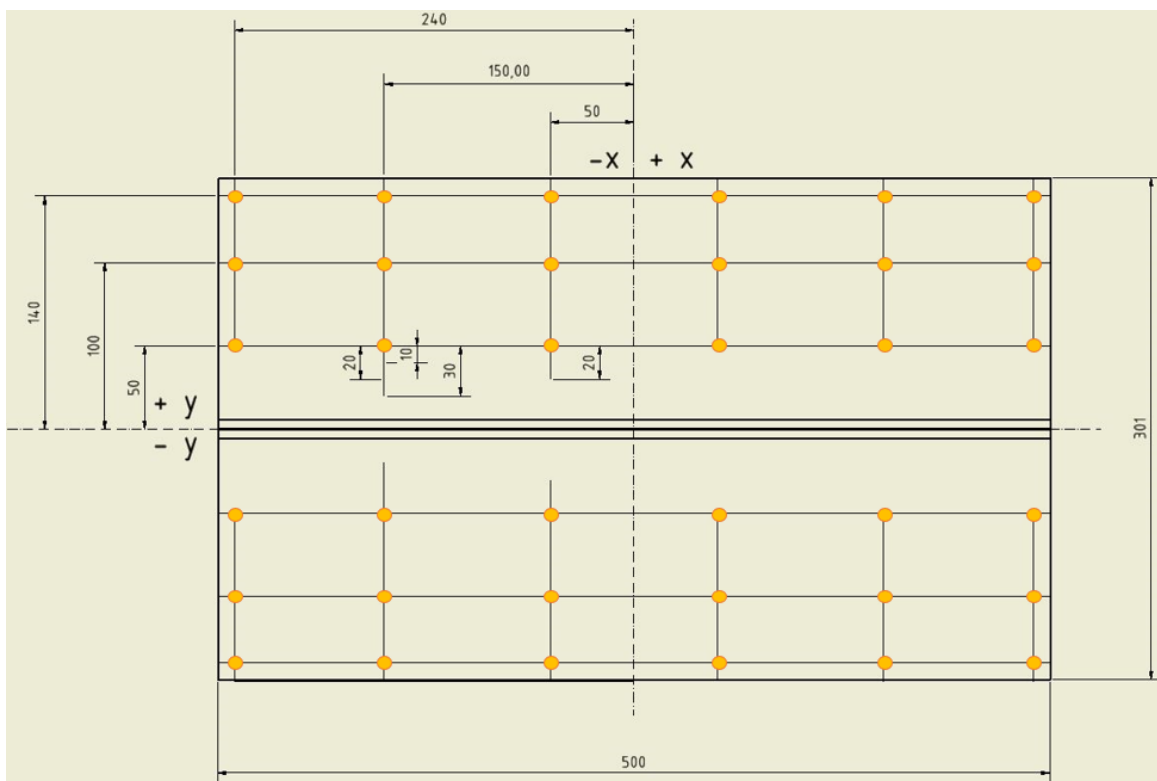
Reálné svařování (TMn) = výsledky reálného svařování pro každé kritérium a termočlánek, viz tabulka 25.

Ve výsledných tabulkách jsou barevně vyznačeny rozdíly. Žlutě označený rozdíl znázorňuje vyšší hodnotu teploty než u reálného měření při svařování a červeně označený rozdíl znázorňuje hodnotu nižší než u reálného svařování.

Materiálový model bude považován za validovaný v případě, že průměrný rozdíl [%] (24) pro každé kritérium bude v rozsahu  $\pm 10$  %.

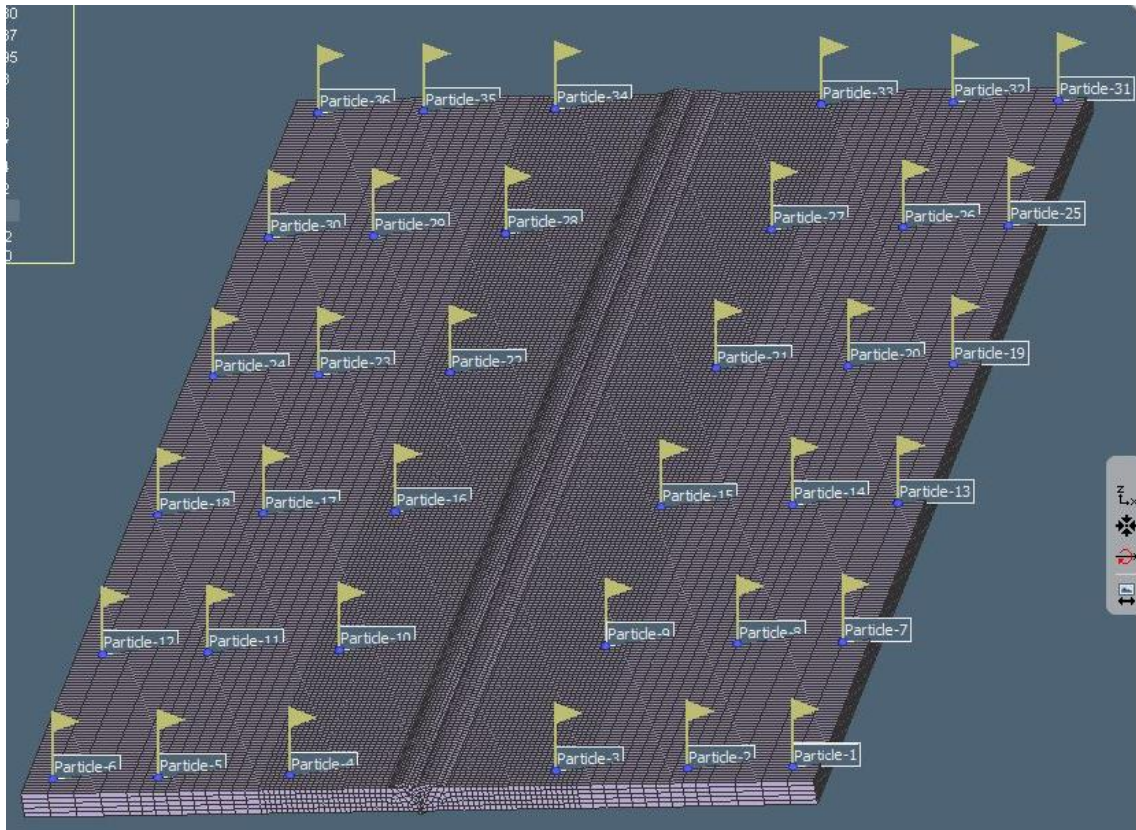
### 4.3.3. Hodnocení makroskopických deformací

Jako druhá metoda pro validaci materiálového modelu základního materiálu S960QL bylo zvoleno porovnání výsledných makroskopických deformací. Před začátkem svařování byly navrženy polohy měrných bodů (v počtu celkem 36), na základě kterých lze vyhodnotit výsledné deformace. Vizualizace umístění měrných bodů a znázornění souřadného systému vzorku, viz obrázek 76.



Obrázek 76: Vizualizace umístění měrných bodů na experimentálním vzorku tupého svarového spoje

Pro tyto souřadnice byl připraven program na souřadnicovém měřicím stroji ZEISS PRISMO v měrovém centru C. Zeiss na ČVUT v Praze, FS, za podpory kolegů z Ústavu technologie obrábění, projektování a metrologie. Stejně tak tyto body byly přeneseny do simulace v programu Simufact Welding, viz obrázek 77.

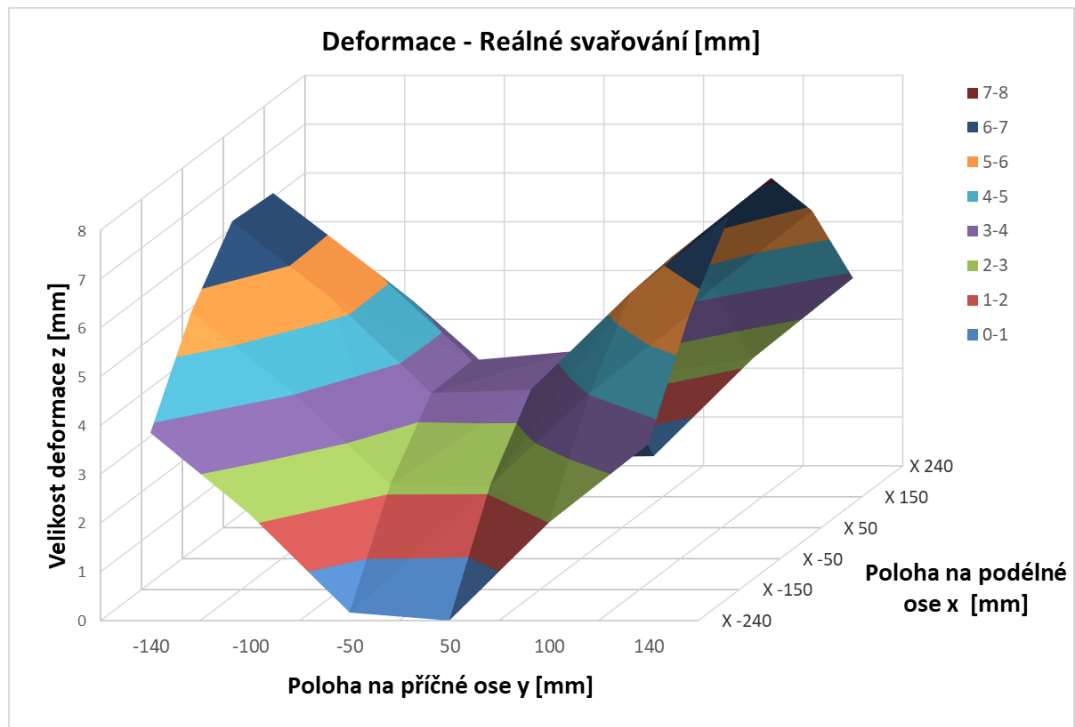


Obrázek 77: Měrné body deformací v programu Simufact Welding

Z důvodu zvýšení přesnosti dat týkajících se vlivu svařovacího procesu na výsledné deformace byl změřen reálný svařenec po nastehování. Vlivem vytváření stehových svarů dochází k makroskopické deformaci svarového spoje, která ale nebude dále zahrnuta v simulaci procesu. Proto bylo rozhodnuto, že naměřené hodnoty deformací svařence po nastehování budou odečteny od výsledných deformací po svařování, aby negativně neovlivňovali přesnost porovnání hodnot deformací z reálného procesu a výstupu ze simulace.

Makroskopické deformace jsou reprezentovány odchylkami polohy měrných bodů v ose kolmo na osu svařence (osa Z), po vychladnutí svařence.

Pro lepší vizualizaci výsledků byly číselné hodnoty makroskopických deformací přeneseny do grafu. Výsledný graf pro reálné svařování je uveden na obrázku 78.



Obrázek 78: Výsledné hodnoty deformací pro reálné svařování.

Pro vyhodnocení přesnosti validace materiálového modelu, na základě porovnání deformace, byla stanovena následující metoda. Vždy byl pro znázornění simulace zobrazen graf pro porovnání s reálným svařováním. Pro číselné vyhodnocení výsledků byla vždy pro každou polohu rozdílu v ose y (-140, -100, -50, 50, 100, 140) spočítána průměrná hodnota. Výsledné číselné hodnoty deformací získaných při reálném svařování jsou uvedeny v tabulce 26.

Tabulka 26: Číselné výsledky deformací při reálném svařování

Poloha		Deformace - Reálné svařování [mm]					
		Y					
		-140	-100	-50	50	100	140
X	-240	3,85	2,17	0,16	0,00	2,01	3,61
	-150	5,69	4,08	2,16	2,14	4,04	5,64
	-50	6,91	5,33	3,39	3,47	5,45	7,07
	50	6,86	5,30	3,43	3,61	5,55	7,17
	150	5,52	4,01	2,20	2,40	4,28	5,86
	240	3,62	2,05	0,17	0,20	2,21	3,85
Max. Reálné svař.		6,91	5,33	3,43	3,61	5,55	7,17

Rozdíl v deformaci je dále uváděn v mm a stejně tak i v procentech. Pro výpočet hodnot byly využity následující vzorce (26) a (27):

$$\text{Rozdíl } (Y_n)[\text{mm}] = \text{Simulace}(Y_n) - \text{Reálné svařování}(Y_n) \quad (26)$$

$$\text{Rozdíl } (Y_n)[\%] = \frac{\text{Simulace}(Y_n) - \text{Reálné svařování}(Y_n)}{\text{Reálné svařování}(Y_n)} \quad (27)$$

Při výpočtu dle výpočtového vztahu (27) byly vyjmuty body ležící u osy na začátku a konci svaru (x, y) -240,-50; -240,50; 240,-50 a 240,50, neboť hodnoty deformací v těchto bodech jsou velmi nízko nuly a proto jakákoli změna způsobí výraznou procentuální změnu, která negativně ovlivňuje průměrnou hodnotu deformace.

Jako vyhovující výsledek simulace byl brán výsledek, kde procentuální rozdíl měl hodnotu do  $\pm 10\%$ .

#### 4.3.4. Výsledky simulací

Po nastavení simulačního procesu na základě vstupů a nastavení metod pro vyhodnocení z předchozích kapitol (viz kapitoly 4.3.1, 4.3.2 a 4.3.3), došlo ke spuštění simulace a sběru výsledků. Bylo však nutné simulaci vícekrát upravit, než došlo ke splnění nastavených limitů pro teplotní cykly a velikost makroskopických deformací. V následujících částech práce bude vždy znázorněno, k jakým změnám došlo a jak to ovlivnilo výslednou přesnost simulace.

##### Simulace č.1 – Doporučené nastavení + Materiálový model z Inspekčního certifikátu 3.1

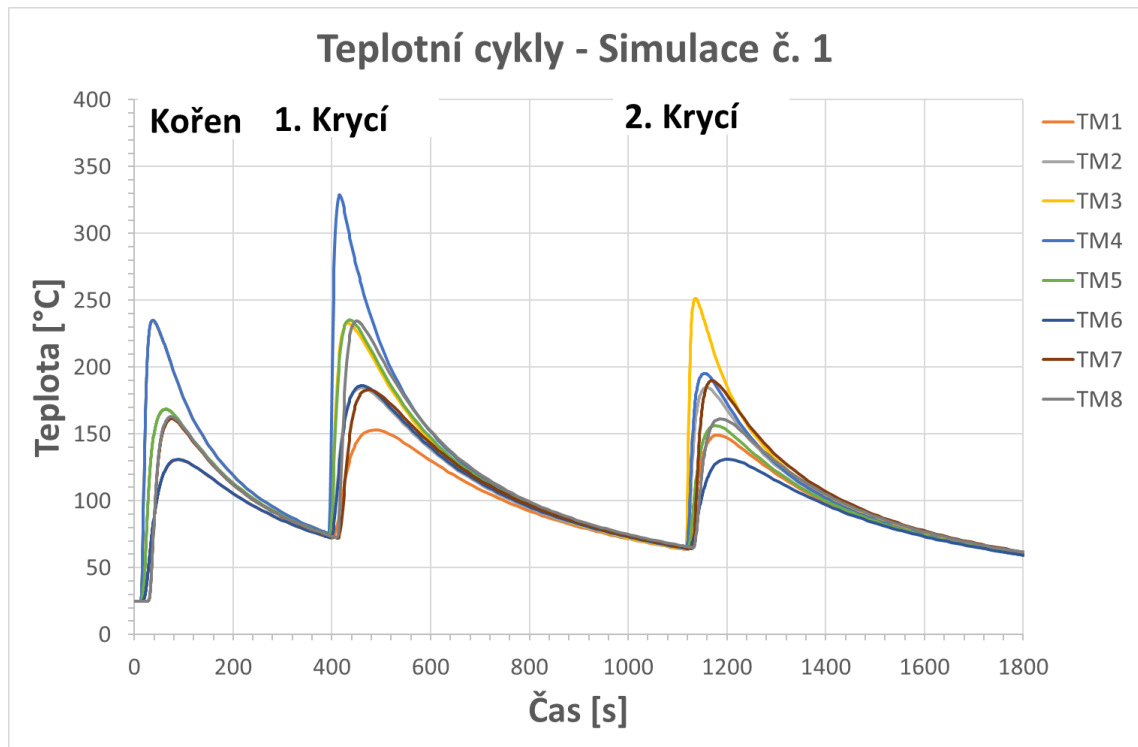
Simulace č. 1 je první vytvoření simulace, kde došlo k základnímu nastavení simulačního softwaru dle doporučení výrobce. Jako materiálový model byl využit model získaný z chemického složení uvedeného na Inspekčním certifikátu 3.1. Přehled důležitých proměnných pro budoucí úpravy simulace a jejich hodnoty použité pro simulaci č. 1 jsou uvedeny v tabulce 27.

Tabulka 27: Nastavení simulace č. 1

Nastavení simulace				
Název simulace	Materiálový model	Emisivita povrchu [/]	Skupenské teplo tání [J/kg]	Tepelná účinnost k [/]
Simulace č. 1	Insp. Cert.	0,6	264 000	0,8

Na základě výše uvedeného nastavení byly získány dílčí výsledky. Pro simulaci č. 1 jsou v hlavním textu disertační práce publikovány i veškeré číselné výsledky, pro následující varianty simulace budou již uvedeny pouze výsledné grafy a zjednodušené tabulky s výsledky. Kompletní číselné výsledky ze všech provedených simulací jsou uloženy v přílohách disertační práce. Teplotní cykly simulace č. 1 jsou uvedeny na obrázku 79.





Obrázek 79: Teplotní cykly simulace č. 1

Číselné výsledky teplotních cyklů simulace č. 1 a následně vypočtené rozdíly dle vzorců (23), (24) a (25) jsou uvedeny v tabulkách 28, 29 a 30. Výsledky porovnání jsou získány odečtem hodnot z reálného měření (tabulka 25) a ze simulace č.1 (tabulka 28)

Tabulka 28: Číselné výsledky teplotních cyklů simulace č. 1

	Teplotní cykly - Simulace č. 1 [°C]							
	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM6	TM7	TM8
Kořen min	25	25	25	25	25	25	25	25
Kořen max	130,8	168,3	234,6	235,0	168,6	131,0	161,4	163,0
1. Krycí min	64,0	64,2	64,3	64,8	65,0	65,1	65,5	66,3
1. Krycí max	153,2	184,4	233,0	328,6	235,3	186,3	183,1	234,3
2. Krycí min	63,5	63,8	63,9	64,4	64,5	64,4	64,3	65,0
2. Krycí max	149,0	184,8	251,4	195,3	156,5	131,3	190,2	161,5
Rozdíl Kořen	105,8	143,3	209,6	210,0	143,6	106,0	136,4	138,0
Rozdíl 1. Krycí	89,2	120,2	168,7	263,8	170,3	121,2	117,6	168,0
Rozdíl 2. krycí	85,5	121,0	187,5	130,9	92,0	66,9	125,9	96,5

Tabulka 29: Rozdíl teplotních hodnot mezi simulací č. 1 a reálným svařováním ve [°C]

	Rozdíl [°C] - Simulace č. 1 (Teplotní cykly)						
	TM2	TM3	TM4	TM5	TM6	TM7	TM8
Kořen min	-0,7	-0,6	-0,5	-0,7	-0,5	-0,6	-1
Kořen max	-19,2	-26,6	-27,0	-20,5	-16,5	-17,0	-27,1
1. Krycí min	-30,1	-33,4	-32,8	-29,0	-26,0	-29,7	-30,7
1. Krycí max	-44,2	-55,5	-32,7	-28,9	-28,3	-39,8	-35,0
2. Krycí min	-42,6	-43,3	-43,4	-42,3	-43,2	-44,0	-47,3
2. Krycí max	-66,5	-74,2	-67,6	-58,8	-55,4	-51,0	-59,8
Rozdíl Kořen	-18,5	-26,0	-26,5	-19,8	-16,0	-16,4	-26,1
Rozdíl 1. Krycí	-14,1	-22,1	0,1	0,1	-2,3	-10,1	-4,3
Rozdíl 2. krycí	-23,9	-30,9	-24,2	-16,5	-12,2	-7,0	-12,5

Tabulka 30: Rozdíl teplotních hodnot mezi simulací č. 1 a reálným svařováním v [%]

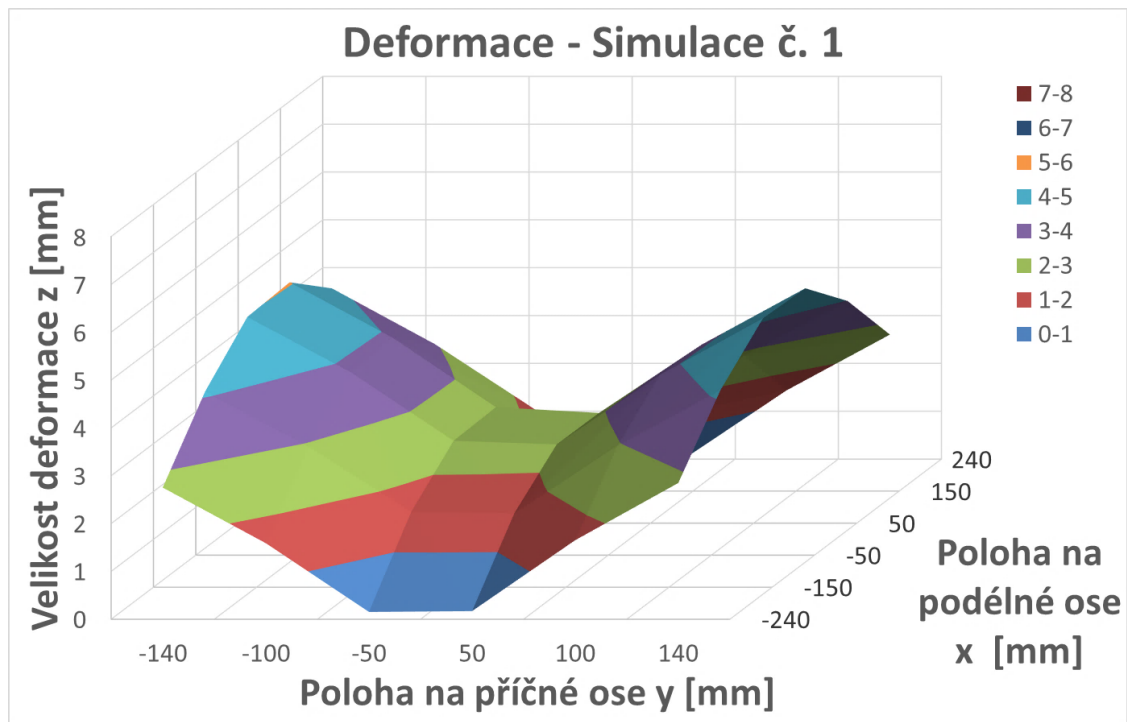
	Rozdíl [%] - Simulace č. 1 (Teplotní cykly)							
	TM2	TM3	TM4	TM5	TM6	TM7	TM8	Průměr
Kořen min	-2,7%	-2,3%	-2,0%	-2,7%	-2,0%	-2,3%	-3,8%	-2,6%
Kořen max	-10,2%	-10,2%	-10,3%	-10,9%	-11,2%	-9,5%	-14,2%	-10,9%
1. Krycí min	-31,9%	-34,2%	-33,6%	-30,8%	-28,6%	-31,2%	-31,6%	-31,7%
1. Krycí max	-19,3%	-19,2%	-9,1%	-10,9%	-13,2%	-17,8%	-13,0%	-14,7%
2. Krycí min	-40,0%	-40,4%	-40,3%	-39,6%	-40,2%	-40,6%	-42,1%	-40,5%
2. Krycí max	-26,5%	-22,8%	-25,7%	-27,3%	-29,7%	-21,1%	-27,0%	-25,7%
Rozdíl Kořen	-11,4%	-11,1%	-11,2%	-12,1%	-13,1%	-10,7%	-15,9%	-12,2%
Rozdíl 1. Krycí	-10,5%	-11,6%	0,0%	0,1%	-1,8%	-7,9%	-2,5%	-4,9%
Rozdíl 2. krycí	-16,5%	-14,2%	-15,6%	-15,2%	-15,5%	-5,3%	-11,5%	-13,4%

Pro zjednodušení práce s výsledky budou hodnoty teplot (max, min) teplotních cyklů vždy uvedeny pouze v jednoduché zkrácené tabulce, kde budou v dalších kapitolách práce přibývat další výsledky, aby bylo možné jednoduše porovnat vývoj hodnot. Ve zjednodušené tabulce budou uvedeny pouze průměrné hodnoty procentuálních rozdílů. Výsledné zjednodušené výsledky pro simulaci č. 1 jsou uvedeny v tabulce 31.

Tabulka 31: Zkrácená tabulka s výsledky teplotních cyklů

Název	Rozdíl [%] - Teplotní cykly
	Simulace č. 1 - průměr
Kořen min	-2,6%
Kořen max	-10,9%
1. Krycí min	-31,7%
1. Krycí max	-14,7%
2. Krycí min	-40,5%
2. Krycí max	-25,7%
Rozdíl Kořen	-12,2%
Rozdíl 1. Krycí	-4,9%
Rozdíl 2. krycí	-13,4%

Výsledné hodnoty makroskopických deformací z výsledků simulace č. 1 jsou uvedeny na obrázku 80.



Obrázek 80: Porovnání výsledků deformace simulace č. 1

Číselné výsledky deformace simulace č. 1 a následně vypočtené rozdíly dle vzorců (26) a (27) jsou uvedeny v tabulkách 32, 33 a 34. Výsledky porovnání jsou získány odečtem hodnot z reálného měření (tabulka 26) a ze simulace č.1 (tabulka 32)

Tabulka 32: Číselné výsledky deformací získaných ze simulace č. 1

Poloha		Deformace - Simulace č. 1 [mm]					
		Y					
		-140	-100	-50	50	100	140
X	-240	2,75	1,59	0,15	0,17	1,65	2,85
	-150	4,09	2,95	1,58	1,55	2,96	4,13
	-50	4,98	3,83	2,39	2,32	3,77	4,95
	50	5,03	3,87	2,42	2,30	3,74	4,91
	150	4,24	3,07	1,66	1,48	2,84	3,97
	240	2,98	1,77	0,26	0,00	1,44	2,60
Max. Simulace č. 1		5,03	3,87	2,42	2,32	3,77	4,95

Tabulka 33: Rozdíl mezi simulací č. 1 a reálným svařováním [mm]

Poloha		Rozdíl - Simulace č. 1 [mm] (Deformace)					
		Y					
		-140	-100	-50	50	100	140
X	-240	-1,10	-0,58	-0,01	0,17	-0,36	-0,77
	-150	-1,60	-1,14	-0,59	-0,59	-1,08	-1,52
	-50	-1,93	-1,50	-1,00	-1,15	-1,69	-2,12
	50	-1,82	-1,42	-1,01	-1,31	-1,81	-2,26
	150	-1,29	-0,94	-0,53	-0,92	-1,44	-1,89
	240	-0,64	-0,28	0,10	-0,20	-0,77	-1,24

Tabulka 34: Rozdíl mezi simulací č. 1 a reálným svařováním [%]

Poloha		Rozdíl - Simulace č. 1 [%] (Deformace)					
		Y					
		-140	-100	-50	50	100	140
X	-240	-28,5%	-26,8%	-6,8%	dělení 0	-17,8%	-21,2%
	-150	-28,1%	-27,8%	-27,1%	-27,6%	-26,8%	-26,9%
	-50	-28,0%	-28,1%	-29,6%	-33,2%	-30,9%	-29,9%
	50	-26,6%	-26,9%	-29,4%	-36,2%	-32,6%	-31,5%
	150	-23,3%	-23,4%	-24,3%	-38,5%	-33,7%	-32,2%
	240	-17,7%	-13,8%	58,4%	-100,0%	-34,9%	-32,4%
Průměr. Rozdíl		-25,4%	-24,5%	-27,6%	-33,9%	-29,4%	-29,0%

Stejně jako u teplotních cyklů, tak také u výsledků deformací je v následujícím hlavním textu práce uvedena pouze zkrácená tabulka s maximálními rozdíly, mezi simulací č. 1 a reálným svařováním, v jednotlivých řadách Y, viz tabulka 35. Veškerá kompletní výsledná data pro všechny publikované výsledky simulací jsou uvedeny v přílohách disertační práce.

Tabulka 35: Zjednodušené výsledky deformací získané ze simulace č.1

Název	Průměrný Rozdíl [%] (Deformace)					
	Poloha - Y					
	-140	-100	-50	50	100	140
Simulace č. 1	-25,4%	-24,5%	-27,6%	-33,9%	-29,4%	-29,0%

Na základě publikovaných dat ohledně výsledků teplotních cyklů ze simulace č. 1 lze odvodit, že simulace nesplnila požadavky na maximální rozdíl v hodnotách +/- 10%. Největší rozdíl je v minimálních hodnotách 1. a 2. Krycí housenky. Tento velký rozdíl je způsobený rychlejším chladnutím svařence v simulaci, v porovnání s reálným svařencem. Na omezení rychlosti chladnutí svařence budou zaměřeny další úpravy procesu. V souvislosti s nesplněním požadavků na teplotní cykly nebyly splněny také požadavky na velikost deformace po svařování. Simulace vykazuje nižší deformaci okolo 30%, úprava procesu pro zvýšení tepelného zatížení svařence pozitivně ovlivní také výsledné deformace.

## Simulace č. 2 – Použití materiálového modelu založeného na spektrální analýze

Pro druhou variantu simulace byl použitý druhý materiálový model, kde byl výpočet založen na chemickém složení získaném pomocí spektrální analýzy realizované na ČVUT v Praze (viz kapitola 4.2). Zbytek zvolených proměnných zůstal stejný jako u simulace č. 1. Přehled základního nastavení pro simulaci č. 2 je uveden v tabulce 36.

Tabulka 36: Nastavení simulace č. 2

Nastavení simulace				
Název simulace	Materiálový model	Emisivita povrchu [f]	Skupenské teplo tání [J/kg]	Tepelná účinnost k [f]
Simulace č. 1	Insp. Cert.	0,6	264 000	0,8
Simulace č. 2	Spekt. analýza	0,6	264 000	0,8

Na základě uvedeného nastavení byla provedena simulace procesu. Veškerá data výsledků jsou uvedena v příloze č. 1. Zkrácené číselné porovnání výsledků teplotních cyklů je uvedeno v tabulce 37.

Tabulka 37: Zkrácené výsledky teplotních cyklů

Název	Rozdíl [%] - Teplotní cykly	
	Simulace č. 1 - průměr	Simulace č. 2 - průměr
Kořen min	-2,6%	-2,6%
Kořen max	-10,9%	-9,7%
1. Krycí min	-31,7%	-30,7%
1. Krycí max	-14,7%	-13,7%
2. Krycí min	-40,5%	-39,7%
2. Krycí max	-25,7%	-23,9%
Rozdíl Kořen	-12,2%	-10,8%
Rozdíl 1. Krycí	-4,9%	-3,8%
Rozdíl 2. krycí	-13,4%	-10,6%

Zkrácené číselné porovnání výsledků deformací je uvedeno v tabulce 38.

Tabulka 38: Zkrácený přehled výsledků deformací

Název	Průměrný Rozdíl [%] - Deformace					
	Poloha - Y					
	-140	-100	-50	50	100	140
Simulace č. 1	-25,4%	-24,5%	-27,6%	-33,9%	-29,4%	-29,0%
Simulace č. 2	-21,9%	-19,5%	-15,1%	-21,4%	-24,2%	-25,6%

Na základě získaných dat ze simulace č. 2 lze tvrdit, že změna použitého materiálového modelu (zpřesněním pomocí modelu získaného na základě chemického složení ZM ze spektrální analýzy provedené na ČVUT v Praze) měla pozitivní vliv na výslednou přesnost simulace. Změna materiálového modelu pozitivně ovlivnila jak hodnoty teplot v teplotních cyklech, tak i výsledné makroskopické deformace. Z pohledu teplotních cyklů je největší rozdíl znatelný v hodnocení rozdílů u všech cyklů a u hodnocení deformací je největší vliv znatelný na podélné deformaci v bezprostřední

blízkosti svarového spoje. Tato změna ale stále nepřinesla požadovaný výsledek (dle zvoleného kritéria), a proto bylo přikročeno k dalším úpravám simulace.

### Simulace č. 3 – Změna nastavení skupenského tepla tání

Pro další změnu nastavení simulace byla zvolena změna nastavení hodnoty skupenského tepla tání [J/kg]. Jak již bylo zmíněno dříve v disertační práci, výrobce simulačního softwaru Simufact Welding doporučuje pro přidávání nových ocelí do materiálové databáze nastavit hodnotu skupenského tepla tání na 264 000 J/kg (viz Kapitola 4.2.)

Při důkladnější rešerši dostupných odborných zdrojů bylo zjištěno následující. Kalup a kol. [95] hodnotí teplotu tavení, tuhnutí a skupenské teplo tání pro tři různé typy ocelí – jedna nízkolegovaná a dvě chromové (vysokolegované) oceli. Testovaná nízkolegovaná ocel má podobné chemické složení jako S960QL zkoumaná v této práci, všechny uvedené prvky testované oceli mají ale vyšší obsah, kromě obsahu Cr. Výsledkem jejich zkoumání je určení skupenského tepla tání pro testovanou nízkolegovanou ocel  $258\,900 \pm 2,6$  J/kg. Ve své další práci uvádí Kalup a kol. [96] výsledky hodnocení skupenského tepla tání pro dvě třídy oceli, jedna s obsahem Si kolem 0,2% a druhá s obsahem Si kolem 3%. První zkoumaná ocel se podobá oceli S960QL, neboť S960QL použitá pro tvorbu této práce obsahuje 0,274 % Si. Pro první typ oceli (s obsahem Si kolem 0,2%) uvádí autor skupenské teplo tání na úrovni  $246\,700 \pm 1,2$  J/Kg. Na internetové stránce [97] je volně dostupný přehled hodnot skupenského tepla tání pro jednotlivé prvky. U čistého železa je uvedena hodnota 247 000 J/Kg.

Proto pro další úpravu simulace bylo navrženo upravit hodnotu skupenského tepla tání na hodnotu 250 000 J/kg. Přehledné nastavení simulace č. 3 je uvedeno v tabulce 39.

Tabulka 39: Nastavení simulace č. 3 (a porovnání s ostatními variantami)

Nastavení simulace				
Název simulace	Materiálový model	Emisivita povrchu [/]	Skupenské teplo tání [J/kg]	Tepelná účinnost k [/]
Simulace č. 1	Insp. Cert.	0,6	264 000	0,8
Simulace č. 2	Spekt. analýza	0,6	264 000	0,8
Simulace č. 3	Spekt. analýza	0,6	250 000	0,8

Na základě uvedeného nastavení byla provedena simulace procesu. Veškerá data jsou uvedena v příloze č. 2. Zkrácené číselné porovnání výsledků teplotních cyklů je uvedeno v tabulce 40.

Tabulka 40: Zkrácené výsledky teplotních cyklů

Název	Rozdíl [%] - Teplotní cykly		
	Simulace č. 1 - průměr	Simulace č. 2 - průměr	Simulace č. 3 - průměr
Kořen min	-2,6%	-2,6%	-2,6%
Kořen max	-10,9%	-9,7%	-6,3%
1. Krycí min	-31,7%	-30,7%	-30,2%
1. Krycí max	-14,7%	-13,7%	-13,0%
2. Krycí min	-40,5%	-39,7%	-39,2%
2. Krycí max	-25,7%	-23,9%	-21,7%
Rozdíl Kořen	-12,2%	-10,8%	-6,8%
Rozdíl 1. Krycí	-4,9%	-3,8%	-3,0%
Rozdíl 2. krycí	-13,4%	-10,6%	-6,9%

Zkrácené číselné porovnání výsledků deformací je uvedeno v tabulce 41.

Tabulka 41: Zkrácené výsledky deformací

Název	Průměrný Rozdíl [%] - Deformace					
	Poloha - Y					
	-140	-100	-50	50	100	140
Simulace č. 1	-25,4%	-24,5%	-27,6%	-33,9%	-29,4%	-29,0%
Simulace č. 2	-21,9%	-19,5%	-15,1%	-21,4%	-24,2%	-25,6%
Simulace č. 3	-17,3%	-14,8%	-10,5%	-16,3%	-19,3%	-21,0%

Změna skupenského tepla tání (simulace č.3) měla minimální vliv na výsledky simulace, ale trend změny výsledků byl pozitivním směrem. I díky této úpravě se výsledky simulace přiblížili k vytyčeným cílům. Navržená kritéria ale stále nebyla splněna, a tak bylo nutné přistoupit k další úpravě simulace.

#### Simulace č. 4 – Úprava emisivity povrchu č.1

Další z proměnných, kterou lze u simulace procesu svařování upravit, je emisivita povrchu. Při základním nastavení simulace je emisivita povrchu  $\varepsilon$  nastavena na 0,6 [/>. Emisivita se nastavuje pro celý svařenec bez rozdílu polohy. Při provedené rešerši bylo zjištěno, že Sadiq a kol. [98] hodnotí emisivitu konstrukční oceli pro tepelnou predikci při požáru. Na základě provedených experimentů bylo publikováno, že emisivita povrchu je závislá na teplotě materiálu. Pro teploty pod 380° určil hodnotu  $\varepsilon = 0,28$ . Pro teploty nad 520 °C je emisivita  $\varepsilon = 0,69$ . Na internetových stránkách [99] je dostupná tabulka s emisivitami pro jednotlivé materiály a jejich stavy povrchu. Pro běžnou konstrukční ocel je uveden rozsah  $\varepsilon = 0,2 - 0,32$ .

Na základě provedené rešerše bylo zvoleno, že pro další simulaci bude upravena hodnota emisivity povrchu  $\varepsilon = 0,28$ . Teplota 380 °C je u simulovaného svarového spoje dosažena pouze ve velmi blízké oblasti kolem svarového spoje, neboť ani termočlánek umístěný nejbližší svarového spoje při svařování 1. Krycí vrstvy nepřesáhl tuto teplotu.

Přehledné nastavení simulace č. 4 s vyznačenou úpravou procesu je uvedeno v tabulce 42.

Tabulka 42: Nastavení simulace č. 4

Nastavení simulace				
Název simulace	Materiálový model	Emisivita povrchu [/]	Skupenské teplo tání [J/kg]	Tepelná účinnost k [/]
Simulace č. 1	Insp. Cert.	0,6	264 000	0,8
Simulace č. 2	Spekt. analýza	0,6	264 000	0,8
Simulace č. 3	Spekt. analýza	0,6	250 000	0,8
Simulace č. 4	Spekt. analýza	0,28	250 000	0,8

Na základě uvedeného nastavení byla provedena simulace procesu. Veškerá data jsou uvedena v příloze č. 3. Zkrácené číselné porovnání výsledků teplotních cyklů je uvedeno v tabulce 43.

Tabulka 43: Zkrácené výsledky teplotních cyklů

Název	Rozdíl [%] - Teplotní cykly			
	Simulace č. 1 - průměr	Simulace č. 2 - průměr	Simulace č. 3 - průměr	Simulace č. 4 - průměr
Kořen min	-2,6%	-2,6%	-2,6%	-2,6%
Kořen max	-10,9%	-9,7%	-6,3%	-6,5%
1. Krycí min	-31,7%	-30,7%	-30,2%	-22,2%
1. Krycí max	-14,7%	-13,7%	-13,0%	-9,0%
2. Krycí min	-40,5%	-39,7%	-39,2%	-32,2%
2. Krycí max	-25,7%	-23,9%	-21,7%	-18,1%
Rozdíl Kořen	-12,2%	-10,8%	-6,8%	-7,1%
Rozdíl 1. Krycí	-4,9%	-3,8%	-3,0%	-1,4%
Rozdíl 2. krycí	-13,4%	-10,6%	-6,9%	-6,1%

Zkrácené číselné porovnání výsledků deformací je uvedeno v tabulce 44.

Tabulka 44: Zkrácené výsledky deformací

Název	Průměrný Rozdíl [%] - Deformace					
	Poloha - Y					
	-140	-100	-50	50	100	140
Simulace č. 1	-25,4%	-24,5%	-27,6%	-33,9%	-29,4%	-29,0%
Simulace č. 2	-21,9%	-19,5%	-15,1%	-21,4%	-24,2%	-25,6%
Simulace č. 3	-17,3%	-14,8%	-10,5%	-16,3%	-19,3%	-21,0%
Simulace č. 4	-16,8%	-13,5%	-6,5%	-12,6%	-18,1%	-20,5%

Úprava emisivitu povrchu pozitivně ovlivnila výslednou přesnost simulace. Výsledky ale stále nejsou v požadovaných mezích, a proto bylo přistoupeno k další úpravě simulace.

### Simulace č. 5 – Úprava emisivitu povrchu č. 2

Pro simulaci 5 byla dále snížena emisivita povrchu na nejnižší uvedenou hodnotu z rozsahu uvedeném ve zdroji [99] tzn.  $\varepsilon = 0,2$  (viz řešerše u simulace č. 4).

Přehledné nastavení simulace se zvýrazněnou změnou je uvedeno v tabulce 45.



Tabulka 45: Nastavení simulace č. 5

Nastavení simulace				
Název simulace	Materiálový model	Emisivita povrchu [ε]	Skupenské teplo tání [J/kg]	Tepelná účinnost k [ε]
Simulace č. 1	Insp. Cert.	0,6	264 000	0,8
Simulace č. 2	Spekt. analýza	0,6	264 000	0,8
Simulace č. 3	Spekt. analýza	0,6	250 000	0,8
Simulace č. 4	Spekt. analýza	0,28	250 000	0,8
Simulace č. 5	Spekt. analýza	0,2	250 000	0,8

Na základě uvedeného nastavení byla provedena simulace procesu. Veškerá data jsou uvedena v příloze č. 4. Zkrácené číselné porovnání výsledků teplotních cyklů je uvedeno v tabulce 46.

Tabulka 46: Zkrácené výsledky teplotních cyklů

Rozdíl [%] - Teplotní cykly					
Název	Simulace č. 1 - průměr	Simulace č. 2 - průměr	Simulace č. 3 - průměr	Simulace č. 4 - průměr	Simulace č. 5 - průměr
Kořen min	-2,6%	-2,6%	-2,6%	-2,6%	-2,6%
Kořen max	-10,9%	-9,7%	-6,3%	-6,5%	-5,6%
1. Krycí min	-31,7%	-30,7%	-30,2%	-22,2%	-19,8%
1. Krycí max	-14,7%	-13,7%	-13,0%	-9,0%	-7,8%
2. Krycí min	-40,5%	-39,7%	-39,2%	-32,2%	-30,1%
2. Krycí max	-25,7%	-23,9%	-21,7%	-18,1%	-16,4%
Rozdíl Kořen	-12,2%	-10,8%	-6,8%	-7,1%	-6,0%
Rozdíl 1. Krycí	-4,9%	-3,8%	-3,0%	-1,4%	-0,9%
Rozdíl 2. krycí	-13,4%	-10,6%	-6,9%	-6,1%	-4,8%

Zkrácené číselné porovnání výsledků deformací je uvedeno v tabulce 47.

Tabulka 47: Zkrácené výsledky deformací

Průměrný Rozdíl [%] - Deformace						
Název	Poloha - Y					
	-140	-100	-50	50	100	140
Simulace č. 1	-25,4%	-24,5%	-27,6%	-33,9%	-29,4%	-29,0%
Simulace č. 2	-21,9%	-19,5%	-15,1%	-21,4%	-24,2%	-25,6%
Simulace č. 3	-17,3%	-14,8%	-10,5%	-16,3%	-19,3%	-21,0%
Simulace č. 4	-16,8%	-13,5%	-6,5%	-12,6%	-18,1%	-20,5%
Simulace č. 5	-15,6%	-12,3%	-4,8%	-10,8%	-16,7%	-19,2%

Další úprava emisivity povrchu opět pozitivně přispěla ke snížení rozdílu mezi reálným svařováním a simulací. Stále ale nebylo dosaženo požadovaného kritéria – rozdílu 10 % a tak byla provedena další úprava simulace.

### Simulace – varianta 6 – Úprava emisivity povrchu č. 3

Neboť je na základě předchozích simulací viditelné, že hlavním problémem je rychlost chlazení svařence, kterou pozitivně ovlivňuje změna hodnoty emisivity povrchu ZM svařence, bylo přistoupeno k dalšímu výraznému snížení emisivity povrchu na  $\epsilon = 0,02$ .

Hypotéza pro úpravu emisivity povrchu na takto nízkou úroveň je taková, že vlivem zjednodušení procesu svařování pro potřeby simulace (odstranění svařovacího stolu, podkladových plechu, dorazů a podložky) došlo k narušení teplotní bilance a omezení kumulace tepla v oblasti svařence. Proto změnou emisivity povrchu na uvedenou nízkou úroveň lze nahradit kumulované teplo, které brání chladnutí svařence.

Přehledné nastavení pro simulaci č. 6 je uvedeno v tabulce 48.

Tabulka 48: Nastavení simulace č. 6

Nastavení simulace				
Název simulace	Materiálový model	Emisivita povrchu [J]	Skupenské teplo tání [J/kg]	Tepelná účinnost k [J]
Simulace č. 1	Insp. Cert.	0,6	264 000	0,8
Simulace č. 2	Spekt. analýza	0,6	264 000	0,8
Simulace č. 3	Spekt. analýza	0,6	250 000	0,8
Simulace č. 4	Spekt. analýza	0,28	250 000	0,8
Simulace č. 5	Spekt. analýza	0,2	250 000	0,8
Simulace č. 6	Spekt. analýza	0,02	250 000	0,8

Na základě uvedeného nastavení byla provedena simulace procesu. Veškerá data jsou uvedena v příloze č. 5. Zkrácené číselné porovnání výsledků teplotních cyklů je uvedeno v tabulce 49.

Tabulka 49: Zkrácené výsledky teplotních cyklů

Název	Rozdíl [%] - Teplotní cykly					
	Simulace č. 1 - průměr	Simulace č. 2 - průměr	Simulace č. 3 - průměr	Simulace č. 4 - průměr	Simulace č. 5 - průměr	Simulace č. 6 - průměr
Kořen min	-2,6%	-2,6%	-2,6%	-2,6%	-2,6%	-2,6%
Kořen max	-10,9%	-9,7%	-6,3%	-6,5%	-5,6%	-2,5%
1. Krycí min	-31,7%	-30,7%	-30,2%	-22,2%	-19,8%	-12,9%
1. Krycí max	-14,7%	-13,7%	-13,0%	-9,0%	-7,8%	-4,5%
2. Krycí min	-40,5%	-39,7%	-39,2%	-32,2%	-30,1%	-24,1%
2. Krycí max	-25,7%	-23,9%	-21,7%	-18,1%	-16,4%	-11,6%
Rozdíl Kořen	-12,2%	-10,8%	-6,8%	-7,1%	-6,0%	-2,5%
Rozdíl 1. Krycí	-4,9%	-3,8%	-3,0%	-1,4%	-0,9%	0,2%
Rozdíl 2. krycí	-13,4%	-10,6%	-6,9%	-6,1%	-4,8%	-1,0%

Zkrácené číselné porovnání výsledků deformací je uvedeno v tabulce 50.

Tabulka 50: Zkrácené výsledky deformací

Název	Průměrný Rozdíl [%] - Deformace					
	Poloha - Y					
	-140	-100	-50	50	100	140
Simulace č. 1	-25,4%	-24,5%	-27,6%	-33,9%	-29,4%	-29,0%
Simulace č. 2	-21,9%	-19,5%	-15,1%	-21,4%	-24,2%	-25,6%
Simulace č. 3	-17,3%	-14,8%	-10,5%	-16,3%	-19,3%	-21,0%
Simulace č. 4	-16,8%	-13,5%	-6,5%	-12,6%	-18,1%	-20,5%
Simulace č. 5	-15,6%	-12,3%	-4,8%	-10,8%	-16,7%	-19,2%
Simulace č. 6	-12,1%	-9,2%	-4,5%	-10,8%	-13,7%	-15,7%

Úprava provedená v simulaci č. 6 měla pozitivní vliv na výsledky simulací, ve většině hodnocených parametrech se již výsledky blíží k požadované přesnosti  $\pm 10\%$ , jak v oblasti teplotních cyklů, tak v oblasti deformací. Největším problémem je stále teplota interpass mezi druhou a třetí housenkou svařového spoje, kde je nepřesnost nejvyšší. Trend extrémně rychlého chlazení se podařilo snížit. Na základě dat bylo rozhodnuto, že bude přistoupeno k další úpravě svařování.

### **Simulace č. 7 – Změna tepelné účinnosti metody svařování k [/]**

Na výsledcích hodnocení teplotních cyklů si lze povšimnout, že i přes veškeré stávající úpravy procesu je stále negativní (záporný) rozdíl mezi reálným svařencem a simulací. Jediný teplotní cyklus, kde je rozdíl teplot kladný, je 1. Krycí. Proto bylo dále navrženo a odzkoušeno, že další úprava simulace se bude týkat úpravy vneseného tepla pro Kořen a 2. Krycí. Nejjednodušší cesta, jak řídit velikost vneseného tepla, je úprava velikosti koeficientu  $k$  (= tepelné účinnosti metody svařování), viz kapitola 2.4.2.

Pro všechny simulace (simulace č. 1-6) byl použit koeficient účinnosti  $k = 0,8$  [/] dle doporučení normy EN 1011-2. V případě, že je nutné pro simulaci zvýšit teplotní příkon, je nutné zvýšit hodnotu koeficientu účinnosti. Dupont a kol. [100] prováděli hodnocení více metod svařování – plazmou, MIG, TIG. Pro svařování byl použitý základní materiál z konstrukční oceli, avšak jako přídavný materiál byla použita austenitická korozivzdorná ocel, svařovaná v atmosféře čistého argonu. Hodnota koeficientu tepelné účinnosti metody MIG při popisovaném nastavení byla autory vypočtena  $k = 0,84 \pm 0,04$ . Radaj [101] publikoval tabulku, ve které pro MAG svařování uvádí účinnost metody  $k = 0,65 - 0,9$  [/>. Messler [102] ve své knize uvádí rozdílné účinnosti pro různé metody svařování, ale hlavně u metody MAG rozděluje účinnost metody dle dvou základních typů přenosu kovů. V případě kapkového, či zkratového přenosu uvádí účinnost  $k = 0,6 - 0,75$ , zatímco pro vyšší parametry a pro sprchový přenos uvádí  $k = 0,65 - 0,85$ . Na základě těchto uvedených dat lze tvrdit, že sprchový přenos kovu má vyšší tepelnou účinnost. Gray a kol. [103] uvádí přehled účinnosti pro jednotlivé metody a dále pro jejich modifikace – tloušťka materiálu, typ přenosu kovu a také použitá ochranná atmosféra. Na základě uvedených dat lze tvrdit, že rozsah účinnosti pro metodu MAG je  $k = 0,58-0,9$ . Modifikace procesu výrazně ovlivňují účinnost metody – účinnost metody roste s obsahem kyslíku v ochranné atmosféře a se zvyšující se tloušťkou materiálu. Nejefektivnější metoda přenosu kovu dle této publikace je CMT (Cold metal transfer). Problematikou tepelné účinnosti různých metod přenosu kovu se zabýval také autor práce, prostřednictvím kalorimetrických měření. [J6]

Po prostudování dostupné literatury a na základě výsledků simulace č. 6 byla zvolena úprava koeficientu tepelné účinnosti metody „ $k$ “ pro Kořen a 2. Krycí na  $k = 0,85$ . Přehledné nastavení se zvýrazněnou změnou je uvedeno v tabulce 51.

*Tabulka 51: Nastavení simulace č.7*

Nastavení simulace				
Název simulace	Materiálový model	Emisivita povrchu [/]	Skupenské teplo tání [J/kg]	Tepelná účinnost k [/]
Simulace č. 1	Insp. Cert.	0,6	264 000	0,8
Simulace č. 2	Spekt. analýza	0,6	264 000	0,8
Simulace č. 3	Spekt. analýza	0,6	250 000	0,8
Simulace č. 4	Spekt. analýza	0,28	250 000	0,8
Simulace č. 5	Spekt. analýza	0,2	250 000	0,8
Simulace č. 6	Spekt. analýza	0,02	250 000	0,8
Simulace č. 7	Spekt. analýza	0,02	250 000	0,85 (Kořen + 2. Krycí)

Na základě uvedeného nastavení byla provedena simulace procesu. Veškerá data jsou uvedena v příloze č. 6. Zkrácené číselné porovnání výsledků teplotních cyklů je uvedeno v tabulce 52.

Tabulka 52: Zkrácené výsledky teplotních cyklů

Název	Rozdíl [%] - Teplotní cykly						
	Simulace č. 1 - průměr	Simulace č. 2 - průměr	Simulace č. 3 - průměr	Simulace č. 4 - průměr	Simulace č. 5 - průměr	Simulace č. 6 - průměr	Simulace č. 7 - průměr
Kořen min	-2,6%	-2,6%	-2,6%	-2,6%	-2,6%	-2,6%	-2,6%
Kořen max	-10,9%	-9,7%	-6,3%	-6,5%	-5,6%	-2,5%	1,0%
1. Krycí min	-31,7%	-30,7%	-30,2%	-22,2%	-19,8%	-12,9%	-11,8%
1. Krycí max	-14,7%	-13,7%	-13,0%	-9,0%	-7,8%	-4,5%	-3,7%
2. Krycí min	-40,5%	-39,7%	-39,2%	-32,2%	-30,1%	-24,1%	-23,2%
2. Krycí max	-25,7%	-23,9%	-21,7%	-18,1%	-16,4%	-11,6%	-8,3%
Rozdíl Kořen	-12,2%	-10,8%	-6,8%	-7,1%	-6,0%	-2,5%	1,5%
Rozdíl 1. Krycí	-4,9%	-3,8%	-3,0%	-1,4%	-0,9%	0,2%	1,0%
Rozdíl 2. krycí	-13,4%	-10,6%	-6,9%	-6,1%	-4,8%	-1,0%	4,3%

Zkrácené číselné porovnání výsledků deformací je uvedeno v tabulce 53.

Tabulka 53: Zkrácené výsledky deformací

Název	Průměrný Rozdíl [%] - Deformace					
	Poloha - Y					
	-140	-100	-50	50	100	140
Simulace č. 1	-25,4%	-24,5%	-27,6%	-33,9%	-29,4%	-29,0%
Simulace č. 2	-21,9%	-19,5%	-15,1%	-21,4%	-24,2%	-25,6%
Simulace č. 3	-17,3%	-14,8%	-10,5%	-16,3%	-19,3%	-21,0%
Simulace č. 4	-16,8%	-13,5%	-6,5%	-12,6%	-18,1%	-20,5%
Simulace č. 5	-15,6%	-12,3%	-4,8%	-10,8%	-16,7%	-19,2%
Simulace č. 6	-12,1%	-9,2%	-4,5%	-10,8%	-13,7%	-15,7%
Simulace č. 7	-5,9%	-1,8%	8,4%	3,3%	-5,9%	-9,7%

Výsledky simulace č. 7 byly vyhodnoceny jako vyhovující, protože veškeré výsledné deformace jsou v požadované přesnosti  $\pm 10\%$ . U teplotních cyklů nedošlo u dvou hodnocených kritérií ke splnění požadavků a to u 1. Krycí min (-11,8 %) a 2. Krycí min (-23,2 %), resp. 1. Krycí min (-11,3 °C) a 2. Krycí (-25 °C). Tato kritéria jsou jediná ze všech hodnocených kritérií, kde se nepodařilo plně splnit předem nastavené limity.

Simulace, které jsou provedeny v následujících částech disertační práce budou z pohledu základního nastavení kopírovat nastavení simulace č.7, kde bylo dosaženo nejlepší shody s reálným svařováním.

#### 4.4. Analýza vlivu procesu svařování na vznik deformací a ověření, zda zvolený software je schopen tyto vlivy identifikovat

Po ukončení validace materiálového modelu a nastavení simulace lze přistoupit k další části disertační práce. Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, fáze simulace svařovacího procesu by měla sloužit k omezení nákladů na testování, v případě snahy o nalezení nápravného opatření např. pro omezení makroskopických deformací. Aby bylo možné dosáhnout snížení nákladů, je nutné dosáhnout simulace, která je schopna s určitou přesností předpovědět, jak zafunguje zvolená úprava procesu bez toho, aby musel být svařen reálný svařenec.

Při snaze o omezení makroskopických deformací svařence je v literatuře uvedena řada doporučení: změna trajektorie svařování, použití upínek, změna úhlu rozevření svarových ploch, či kombinace více uvedených faktorů. [78, 79, 81, 82]

Proto byl navržen experiment, kde svarový spoj, který byl použitý pro validaci materiálového modelu, bude použit pro hodnocení vlivu změn, v přípravě svařovacího procesu, na celkové deformace svařence. Cílem experimentu je zjistit, zda simulační software dokáže promítnout navrženou úpravu procesu do simulace a se stejnou přesností ( $\pm 10\%$ ) odhadnout velikost deformace. Všechny svařovací procesy s navrženými úpravami byly reálně svařeny i vyhodnoceny a byly použity pro porovnání reálného výsledku s výsledky simulace. Navržené úpravy procesu svařování vedoucí ke snížení deformace jsou popsány v tabulce 54.

Tabulka 54: Navržené úpravy procesu svařování vedoucí ke snížení deformace

Úprava č.	Popis úpravy
1.	Změna trajektorie svařování – svařování ze středu svařence k okrajům
2.	Použití upínek pro omezení deformace
3.	Úprava svarové plochy - změna úhlu rozevření z 60° na 40° – omezení množství svarového kovu
4.	4.Kombinace úprav popsanych v bodech 1. + 2. + 3.

Výstupem tohoto experimentu bude vždy porovnání pouze výsledných deformací ve zjednodušené formě. Detailní číselné a grafické výsledky jsou uloženy v přílohách disertační práce.

Při porovnání vlivu procesu svařování na výsledné deformace byl vždy porovnán následující rozdíl:

- a) Výsledky reálného svařování s upraveným svařovacím procesem (body 1 až 4) porovnány s reálným procesem použitým pro validaci materiálového modelu – výpočetní vztah (28)

- b) Výsledky simulace upraveného svařovacího procesu (body 1 až 4) porovnány s výsledky simulace č.7 (viz kapitola 4.3) - výpočetní vztah (29)

Porovnání bude provedeno pomocí následujících vztahů (28, 29):

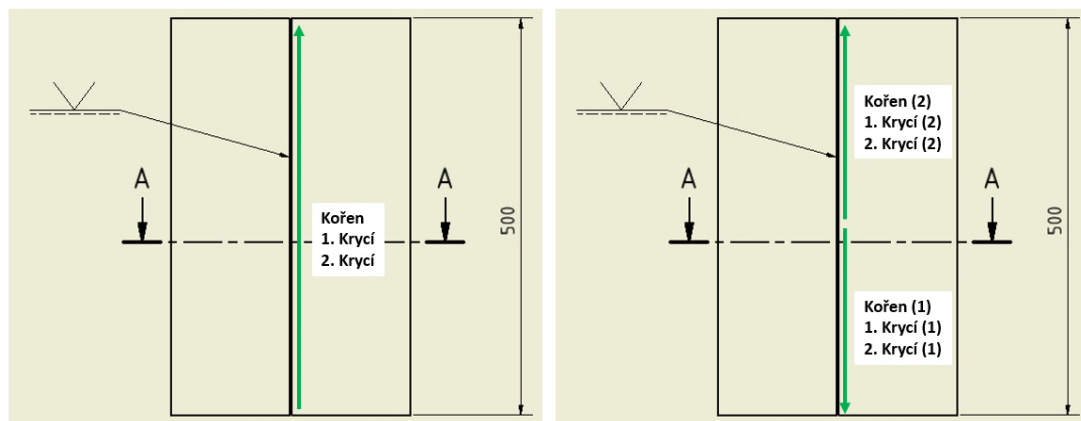
$$\text{Průměrný rozdíl – deformace [\%]} = \left( \frac{\text{Svařování (upravený proces) } (Y_n) [\text{mm}]}{\text{Svařování (validace procesu) } (Y_n) [\text{mm}]} - 1 \right) \cdot 100 \quad (28)$$

$$\text{Průměrný rozdíl – deformace [\%]} = \left( \frac{\text{Simulace (upravený proces) } (Y_n) [\text{mm}]}{\text{Simulace č.7 } (Y_n) [\text{mm}]} - 1 \right) \cdot 100 \quad (29)$$

Aby simulace správně předpověděla výsledek procesu svařování z pohledu makroskopických deformací, měl by se v ideálním případě procentuální rozdíl mezi původním procesem (viz kapitola 4.3) a upraveným procesem (viz tabulka 54) shodovat.

#### 4.4.1. Změna trajektorie svařování

První úprava svařovacího procesu je založena na změně trajektorie svařování. Původní svarový spoj, které byl použitý pro validaci materiálového modelu byl svařen pomocí tří svarových housenek, svařovaných postupně od jednoho okraje plechu ke druhému okraji (viz obrázek 81 vlevo). Upravený svařenec se bude svařovat vždy od středu svařence k jeho okrajům, tzn. na celkem šest svarových housenek, jak je ukázáno na obrázku 81 vpravo. Tato úprava je časově náročnější z pohledu strojního času, stejně tak z pohledu přípravy svarových ploch (napojení housenek ve středu svařence). Nicméně zvolená úprava by podle teorie deformací (viz kapitola 2.5.4) měla snížit celkové makroskopické deformace.



Obrázek 81: Znáznornění změny trajektorie – trajektorie svařování původního vzorku (vlevo) a svařování pomocí změny trajektorie (vpravo)

Byly použity stejné svařovací parametry v jednotlivých vrstvách svarového spoje, jako u vzorku pro validaci modelu, viz tabulka 23 v kapitole 4.3.1.

Porovnání výsledků deformací upraveného procesu je zobrazeno v tabulce 55, veškeré číselné hodnoty deformací s výslednými grafy jsou uvedeny v příloze č. 7.

Tabulka 55: Porovnání výsledků deformací pro simulaci změny trajektorie

Název			Průměrný rozdíl [%] - (Deformace)					
			Poloha - Y					
Č.	Výsledky 1	Výsledky 2	-140	-100	-50	50	100	140
a)	Reálné svařování (Trajektorie)	Reálné svařování (Validace)	4,8%	3,9%	-3,7%	-7,7%	1,7%	2,5%
b)	Simulace (Trajektorie)	Simulace č. 7	-16,1%	-13,3%	-8,4%	-8,2%	-15,3%	-17,7%

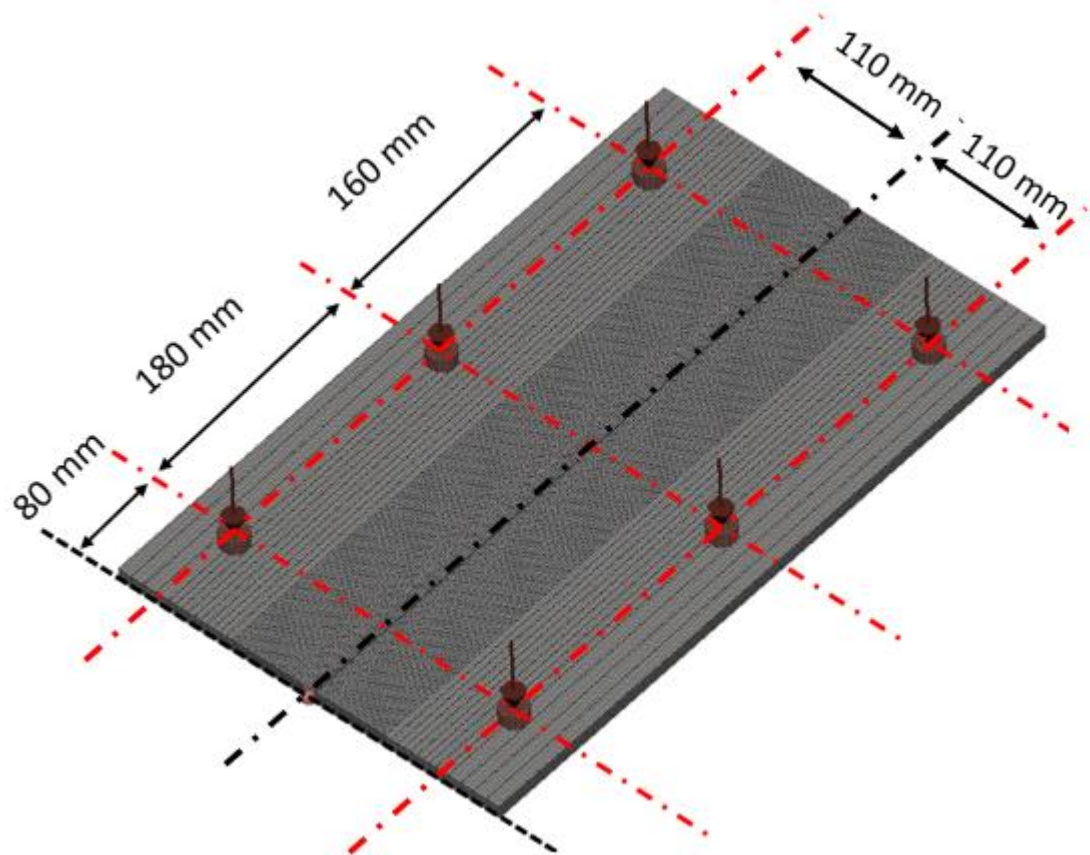
Hodnoty výsledných deformací mezi reálným svařováním a simulací se neshodují, výsledky simulace však vykazují správný trend redukce makroskopických deformací.

#### 4.4.2. Použití upínek pro omezení deformace

Pro další simulaci proběhla jiná úprava procesu, v tabulce 54 označená jako č.2. Při simulaci byla trajektorie svařování stejná jako při původním svařování (tzn. souvislá od kraje ke kraji), ale bylo přidáno 6 upínek, které měly za cíl ovlivnit (snížit) výsledné deformace.

Při přidávání upínek do simulace je nutné zvolit základní nastavení upínek. Ma a kol. [10] například místo modelování a definice upínek používá pouze tuhou oporu, která zamezuje pohybu svařence kolmo na plochu opory (rovnoběžně s osou upínky). Yan a kol. [104] přistupuje k modelování upínek naprosto stejným přístupem, také definuje pouze tuhé omezení pohybu svařence. Woo a kol. [105] se zaměřují hlavně na pozici a počet upínek, společně s výztuhami pro ideální omezení deformací, avšak ohledně specifikace vlastností upínek nic konkrétního neuvádí.

Pro simulaci v disertační práci byla použita vymodelována kulatá upínka s průměrem 15 mm a silou 0,5 kN (polovina maximální síly, kterou je upínka schopna vyvinout dle katalogu výrobce), působící po celou dobu svařování a chladnutí svařence, stejně jako při reálném svařování. Celkem bylo použito šest upínek. Umístění upínek na svařenci je znázorněno na obrázku 82.



Obrázek 82: Rozmístění upínek

Použité svařovací parametry byly shodné s předchozími simulacemi (viz tabulka 23, kapitola 4.3.1.). Porovnání výsledků deformací upraveného procesu je zobrazeno v tabulce 56, veškeré číselné hodnoty deformací s výslednými grafy jsou uvedeny v příloze č. 8.

Tabulka 56: Porovnání výsledků deformací pro simulaci použití upínek

Název			Průměrný rozdíl [%] - (Deformace)					
			Poloha - Y					
Č.	Výsledky 1	Výsledky 2	-140	-100	-50	50	100	140
a)	Reálné svařování (Upinky)	Reálné svařování (Validace)	-29,7%	-29,0%	-28,5%	-30,7%	-30,4%	-30,5%
b)	Simulace (Upinky)	Simulace č. 7	-25,4%	-31,4%	-58,1%	-59,3%	-30,5%	-27,6%

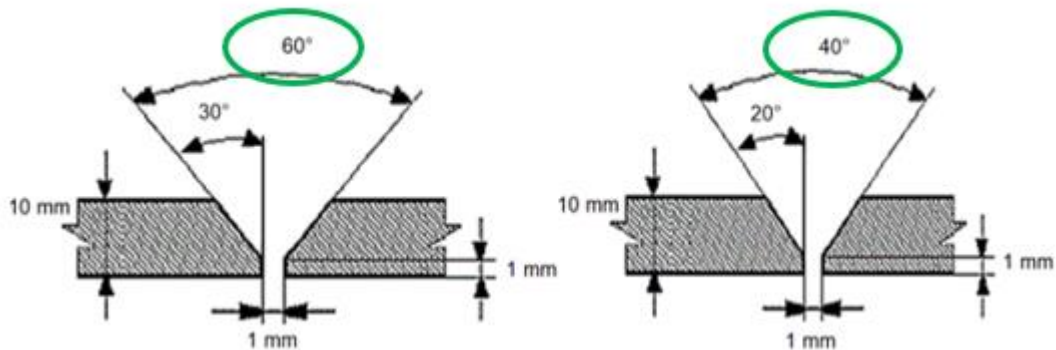
Úhlová deformace vykazuje vysokou shodu mezi simulací a reálným svařencem. V oblasti podélné deformace se hodnoty liší.

#### 4.4.3. Změna úhlu rozevření z 60° na 40°

Jedním ze základních pravidel, pro omezení deformací je snížení (zmenšení) množství svarového kovu. Toho lze dosáhnout pomocí změny úhlu rozevření při přípravě svarové plochy před svařováním. V důsledku zmenšení úhlu dojde ke snížení plochy průřezu a tím i ke snížení počtu svarových housenek pro vyplnění úkosu. Pro následující simulaci byla provedena právě výše zmíněná úprava. Úhel rozevření byl zmenšen ze 60° na 40°, viz obrázek 83, a tím došlo i ke snížení počtu housenek ze tří na dvě. Nově zvolený úhel



rozevření  $40^\circ$  byl zvolen na základě doporučeného rozsahu v normě EN ISO 9692-1, tento úhel je nejmenší doporučený, a tak by měl být rozdíl ve výsledných deformacích maximalizován. Zbylé podmínky svařování zůstaly stejné jako u simulace č. 7, tzn. použití stehových svarů, svařování od kraje ke kraji a bez použití upínek.



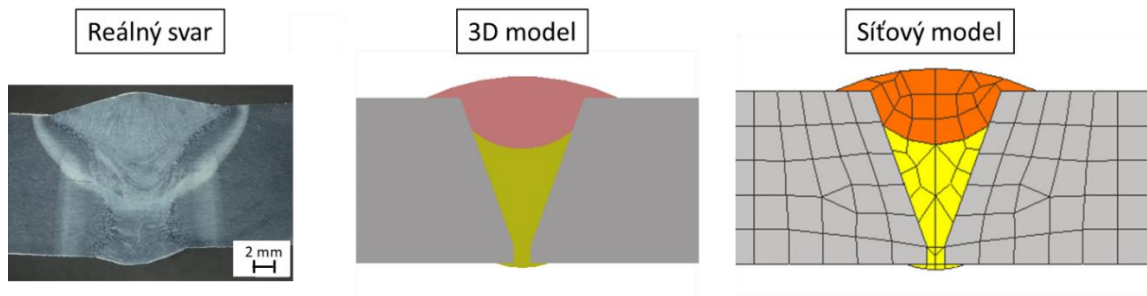
Obrázek 83: Změna úhlu rozevření

Z důvodu výše popsané změny bylo nutné upravit také proces svařování. Pro dosažení vyhovujícího svarového spoje byly drobně upraveny svařovací parametry. Kvůli nutnosti porovnání výsledných deformací byl při návrhu nových svařovacích parametrů kladen důraz na velikost vneseného tepla. Proto i přes drobné úpravy svařovacích parametrů se podařilo dosáhnout vyhovujícího svarového spoje, při použití velmi podobného vneseného tepla a parametru  $t_{8/5}$ . Porovnání použitých svařovacích parametrů pro oba úhly rozevření je uvedeno v tabulce 57. Protože pro simulaci č. 7 byl upravený koeficient účinnosti „k“ pro Kořen a 2. Krycí na  $k = 0,85$ , pro simulaci s upraveným úhlem rozevření bude použitý koeficient  $k = 0,85$  pro Kořen také.

Tabulka 57: Porovnání svařovacích parametrů

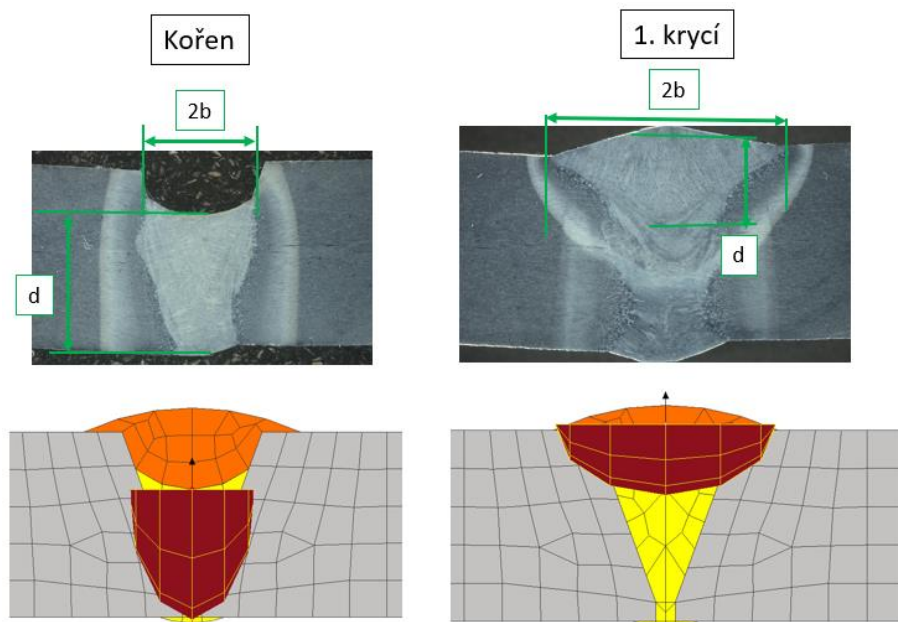
Svařovací parametry							
Úhel rozevření	Vrstva	I [A]	U [V]	$v_{sv}$ [cm·min <sup>-1</sup> ]	k [l]	Q [kJ·mm <sup>-1</sup> ]	$t_{8/5}$ [s]
60°	Kořen	257,8	27,1	42	0,85	0,85	7,5
	1. krycí	266,9	28	40	0,8	0,90	11,8
	2. krycí	272,1	27,4	50	0,85	0,76	8,5
40°	Kořen	270,05	28,05	45	0,85	0,86	7,7
	1. krycí	252,56	29,23	40	0,8	0,89	11,51

Z důvodu změny konstrukce svarového spoje bylo nutné také upravit konstrukci v simulaci. Modelování průřezu housenek bylo opět založeno na makrovýbrusu z příčného řezu, stejně jako v předchozím případě pro úhel rozevření svarové plochy  $60^\circ$ . Porovnání výbrusu společně s příčným řezem v 3D modelu a síťovém modelu je znázorněno na obrázku 84.



Obrázek 84: Modelování housenek pro potřeby simulace

Pro dosažení přesnějších výsledků simulace bylo nutné také upravit rozměry tavné lázně. R rozměry byly získány také z makrovýbrusů. Znázornění odečtených rozměrů tavných lázní pro každou vrstvu svaru je ukázáno na obrázku 85.



Obrázek 85: Tavné lázně 40°

Číselné vyjádření rozměrů tavných lázní pro obě housenky je uvedeno v tabulce 58.

Tabulka 58: Číselné rozměry tavných lázní

Rozměry tavné lázně - 40°				
Vrstva	b [mm]	d [mm]	af [mm]	ar [mm]
Kořen	3,1	7,5	1,8	6,7
1. krycí	5,8	3,7	3,5	12,7

Po výše popsaných úpravách byla spuštěna simulace. Porovnání výsledků deformací upraveného procesu je zobrazeno v tabulce 59, veškeré číselné hodnoty deformací s výslednými grafy jsou uvedeny v příloze č. 9.

Tabulka 59: Porovnání výsledků deformací pro simulaci změny úhlu rozevření

Název			Průměrný rozdíl [%] - (Deformace)					
			Poloha - Y					
Č.	Výsledky 1	Výsledky 2	-140	-100	-50	50	100	140
a)	Reálné svařování (Úhel 40°)	Reálné svařování (Validace)	12,7%	13,6%	5,1%	-2,7%	10,3%	11,4%
b)	Simulace (Úhel 40°)	Simulace č. 7	-23,0%	-21,2%	-19,5%	-20,1%	-21,3%	-23,0%

U této simulace došlo k podobnému výsledku jako v kapitole 4.4.2 Změna trajektorie svařování. U výsledků simulace došlo k redukci deformací, avšak u reálného vzorku k nárůstu.

#### 4.4.4. Kombinace předchozích opatření

Poslední simulace byla zaměřena na kombinaci všech předchozích opatření – změna úhlu rozevření, změna trajektorie svařování a použití upínek pro svařování. U této simulace byl předpokládán největší rozdíl mezi simulací a realitou, protože bylo očekáváno vzájemné násobení chyb.

Úhel rozevření byl zvolen 40°, stejně jako v kapitole 4.4.3. Použití upínek se shoduje s upínkami v kapitole 4.4.2 – včetně zvoleného typu a polohy. Trajektorie svařování byla zvolena stejně jako u kapitoly 4.4.1, avšak místo šesti housenek byly použity pouze čtyři. Svařovací parametry použité pro svařování reálného vzorku a stejně tak pro provedení simulace jsou uvedeny v tabulce 60.

Tabulka 60: Svařovací parametry

Svařovací parametry - kombinace opatření						
Vrstva	I [A]	U [V]	v <sub>sv</sub> [cm·min <sup>-1</sup> ]	k [l]	Q [kJ·mm <sup>-1</sup> ]	t <sub>8/5</sub> [s]
Kořen (1)	270,05	28,05	45	0,85	0,86	7,7
Kořen (2)	270,05	28,05	45	0,85	0,86	7,7
1. krycí (1)	252,56	29,23	40	0,8	0,89	11,51
1. krycí (2)	252,56	29,23	40	0,8	0,89	11,51

Po výše popsanych úpravách byla spuštěna simulace. Porovnání výsledků deformací upraveného procesu je zobrazeno v tabulce 61, veškeré číselné hodnoty deformací s výslednými grafy jsou uvedeny v příloze č. 10.

Tabulka 61: Porovnání výsledků deformací pro simulaci kombinaci opatření

Název			Průměrný rozdíl [%] - (Deformace)					
			Poloha - Y					
Č.	Výsledky 1	Výsledky 2	-140	-100	-50	50	100	140
a)	Reálné svařování (Kombinace)	Reálné svařování (Validace)	-58,0%	-47,9%	-16,8%	-22,1%	-49,9%	-56,6%
b)	Simulace (Kombinace)	Simulace č. 7	-50,0%	-52,2%	-59,8%	-58,0%	-47,4%	-45,3%

U simulace došlo k největší redukci deformace ze všech výše popsanych úprav. Tento trend potvrzuje i porovnání reálného svařence.

## 5. Diskuse výsledků

### 5.1. Vytipování vhodného simulačního softwaru a ověření vhodnosti jeho použití pro predikci deformací

Vytipovaný sw Simufact Welding byl správně zvolený. Jeho vhodnost pro použití simulací technologické operace svařování potvrzují také další autoři ve svých pracích. [106, 107, 108]

Z výsledků simulace lze vyvodit, že simulace celkově predikuje nižší maximální teploty než změřené hodnoty teplot při reálném svařování. Výsledky správně zobrazují rozdíl mezi maximální teplotou na stojině a pásnici. Na pásnici je v průběhu svařování rozdílný odvod tepla, což se projeví snížením maximálních dosahovaných teplot. Výsledky simulace nikdy nebudou přesně odpovídat výsledkům reálného svařování z důvodu vnesených nepřesností při specifikaci okrajových podmínek. Z důvodu podobného rozdílu v dosahovaných maximálních teplotách může být rozdíl způsoben i zjednodušenou specifikací účinnosti procesu metody MAG. Výsledky simulace by bylo možné zpřesnit při použití jiné hodnoty koeficientu účinnosti metody (volena byla zaokrouhlená a zjednodušená hodnota  $k=0,8$  [/] dle EN 1011-2), neboť tato hodnota se mění v závislosti na nastavení svařovacího procesu.

Tento vliv nebyl řešen v popisovaném úvodním experimentu.

Výsledek validace však odpovídá obdobným experimentům a výsledkům dalších autorů, kteří se zabývali touto problematikou. Autoři ve svých článcích dosahují často větších rozdílů mezi měřenými veličinami a k validaci přesto přistupují pozitivně. Proto lze výsledek považovat za vyhovující. [109, 110, 111, 112, 113, 114]

### 5.2. Návrh materiálového modelu pro simulaci procesu svařování materiálu S960QL

Materiálový model byl úspěšně vytvořen, upraven a nahrán do softwaru Simufact Material pro použití v sw Simufact Welding. Mechanické vlastnosti byly zjištěny pomocí doplňujícího měření, pro omezení chyby výsledné predikce způsobené vnesenou chybou při definování vstupů.

Použitý postup vytvoření materiálového modelu je doporučený výrobcem softwaru společností Hexagon. [115] Tento postup spojení sw Simufact Material společně s JMatPro využívají ve svých pracích i další autoři. [116, 117]

### 5.3. Validace vstupních dat navrženého materiálového modelu pro vybraný případ svarového spoje

Výsledky simulace č. 7 byly vyhodnoceny jako vyhovující, protože veškeré výsledné deformace jsou v požadované přesnosti  $\pm 10$  %. U teplotních cyklů nedošlo u dvou hodnocených kritérií ke splnění požadavků, viz výsledky kapitola 4.3.4.

Z pohledu teplotních cyklů je stále znatelné rychlejší ochlazování svařence. Tento problém byl ovšem viditelný i ve výsledcích ostatních autorů, např. [21]. Při hodnocení teplotních cyklů byl tedy kladen důraz hlavně na hodnocení rozdílu maximálních a minimálních teplot, což reprezentuje množství vneseného tepla při svařování.

V hodnocení přesnosti predikce deformací simulací svařence se podařilo dosáhnout výsledků v požadované přesnosti  $\pm 10\%$ . Z výsledků (uvedených v kapitole 4.3.4, tabulce 53) je vidět, že úhlová deformace na krajích svařence je menší v porovnání s reálným svařencem, ale naopak v ose svaru je podélná deformace větší. Tento rozdíl v podélné deformaci mohl být ovlivněn zjednodušením modelu pro simulaci. Ve skutečnosti svařenec ležel na dvou kovových pásech. Kombinace hmotnosti svařence a tření mezi pásy a svařencem mohla při reálném svařování omezovat svařenec v jeho podélné deformaci a tím i ovlivňovat jeho úhlovou deformaci.

Celkově lze tedy validaci hodnotit jako úspěšnou, neboť hlavním cílem disertační práce je hodnocení deformací, u kterých bylo dosaženo výsledků v nastavených limitech. Dosažená přesnost predikce teplotních cyklů a výsledné makroskopické deformace odpovídají výsledkům ostatních autorů. [15, 18, 19, 20, 21]

## **5.4. Analýza vlivu procesu svařování na vznik deformací a ověření, zda zvolený software je schopen tyto vlivy identifikovat**

### **5.4.1. Změna trajektorie svařování**

Na základě uvedených dat (viz kapitola 4.4.1., tabulka 55) je viditelné, že při reálném svařování došlo změnou trajektorie při svařování ke zvýšení úhlové deformace, a k drobnému snížení podélné deformace. Tento stav neodpovídá teorii deformací a stejně tak dostupným zdrojům, které se tomuto problému věnují [78, 79, 81, 82]. Oproti tomu, výsledky simulace a trend změny velikosti deformace odpovídají teorii a výsledkům prací ostatních autorů, např. [9, 15, 118]. Vlivem změny trajektorie došlo ke snížení úhlové i podélné deformace.

Při reálném svařování vzorku došlo k vadě ve svarovém spoji a kořen svarového spoje nebyl dostatečně provařen. Tento důvod mohl ovlivnit celkové deformace, neboť kořenová i krycí housenky tím byly v rozdílné pozici z pohledu tloušťky plechu a síly způsobující deformaci mohly působit jinak. Proto tento rozdíl nebyl brán jako nevyhovující výsledek simulace, neboť simulace správně předpověděla redukci deformace, jak bylo očekáváno. Na základě znalostí a použité literatury je předpokládáno, že výsledky reálného svařování nejsou relevantní z výše popsaných důvodů.

### **5.4.2. Použití upínek pro omezení deformace**

U této úpravy (použití upínek při svařování) dokázala simulace velice dobře predikovat výslednou deformaci svařence (viz kapitola 4.4.2., tabulka 56). Rozdíl v úhlové deformaci je mezi hodnocenými svařenci minimální, hlavní rozdíl je opět v oblasti kolem svarového kovu (podélná deformace). Z rozdílu v podélné deformaci lze usoudit,

že tření mezi upínkami u reálného svařence bylo nižší, a proto došlo k výraznější podélné deformaci (zkrácení svařence).

Velmi dobrou shodu v predikci úhlových deformací publikují také autoři ostatních publikací. [10, 104, 105].

Potvrzení, že simulace je schopna různě reagovat na odlišné typy svařovacích přípravků publikoval autor práce v článku. [J7]

### **5.4.3. Změna úhlu rozevření z 60° na 40°**

Výsledky simulace (viz kapitola 4.4.3., tabulka 59) ukazují redukcí makroskopických deformací, což odpovídá teorii a zároveň jsou tyto výsledky v souladu s publikacemi dalších autorů. [78, 79, 81, 82, 119, 120]

Při reálném svařování však překvapivě došlo k nárůstu makroskopických deformací. Při reálném svařování opět došlo k částečnému neprovaření kořene, které mohlo ovlivnit výsledné deformace. Neprovaření kořene je běžným problémem při redukcí úhlu rozevření svarových ploch. Výsledky simulace však autor disertační práce považuje za platný výsledek. Chybu ve výsledných hodnotách deformací je možné spíše spatřovat v naměřených hodnotách u reálného svařence. Při omezení průřezu svarového spoje dojde ke snížení počtu housenek a tím i počtu teplotních cyklů, kterým je svarový spoj vystaven. Teplotní cykly jsou hnací silou vzniku deformací, a proto je velmi nepravděpodobné, že by s omezením počtu housenek deformace rostla.

### **5.4.4. Kombinace předchozích opatření**

Na základě získaných dat (viz kapitola 4.4.4., tabulka 61) lze tvrdit, že simulace byla schopna s vysokou přesností odhadnout redukcí úhlové deformace, avšak u podélné deformace (podél svarového spoje) je u výsledků patrný rozdíl. Tento rozdíl může být ovlivněn velikostí tření mezi upínkami a oporou při reálném svařování. Rozdíl v podélné deformaci se shoduje s trendem u použití samostatných upínek. Pro přesnější výsledek simulace podélné deformace by nejspíš muselo dojít k dalším úpravám vstupních podmínek simulace.

Pozitivní na výsledcích je, že jak reálný svařenec, tak simulace ukazují celkově největší omezení makroskopických deformací při použití kombinace opatření pro snížení deformací. Výsledek u reálného svařování potvrzuje předchozí domněnky (v kapitolách č. 4.4.1. a č. 4.4.3. týkajících se úpravy trajektorie a úhlu rozevření), že výsledné deformace reálných svařenců neodpovídají vlivu úprav procesu. Pokud by úpravy v těchto simulacích zvyšovali deformace svařence, musely by celkové deformace v této kapitole být vyšší než v kapitole č. 4.4.2, s použitím pouze upínek pro omezení deformací.

## 6. Závěr

Disertační práce se zabývá MKP simulací technologického procesu svařování. Pro simulaci procesu svařování byla zvolena vysokopevnostní mikrolegovaná konstrukční ocel S960QL svařovaná vícevrstevným tupým V svarem. Zvolená ocel dosahuje svých mechanických vlastností pomocí jemnozrnné struktury a fázové transformace. Při simulacích byla fázová transformace zahrnuta do materiálového modelu.

Pro dosažení hlavního cíle práce byly nastaveny následující dílčí cíle práce:

### *Vytipování vhodného simulačního softwaru a ověření vhodnosti jeho použití pro predikci deformací*

Pro použití v disertační práci byl zvolen specializovaný simulační software Hexagon Simufact Welding, jehož vhodnost byla ověřena na jednovrstvém koutovém svaru z oceli S355J2+N (popsáno v kapitole 4.1.). Dílčí cíl lze považovat za splněný. [J8]

### *Návrh materiálového modelu pro simulaci procesu svařování materiálu S960QL*

Tvorba materiálového modelu byla provedena za použití výpočetního sw JMatPro a vstupních dat chemického složení základního materiálu, získaných dvěma různými způsoby - a) převzetím z Inspekčního certifikátu 3.1 dle EN 10204 a b) výsledkem měření spektrální analýzy. Dílčí cíl byl splněn, podařilo se definovat materiálový model pro provedení MKP simulace procesu svařování oceli S960QL, viz kapitola 4.2.

Na základě výsledků z provedených dat lze tvrdit, že pro budoucí tvorbu materiálových modelů lze použít chemické složení uvedené na Inspekčním certifikátu. Rozdíl ve výsledcích mezi uvedenými dvěma zdroji materiálových dat je z pohledu celkové přesnosti simulace zanedbatelný.

### *Validace vstupních dat navrženého materiálového modelu pro vybraný případ svarového spoje*

Použitý materiálový model byl validovaný, avšak proti základnímu nastavení simulace bylo nutné provést úpravy, pro dosažení požadované přesnosti u deformací (na základě rešerše současného stavu řešené problematiky bylo stanoveno kritérium  $\pm 10\%$  rozdílu výsledků v porovnání s reálným svařencem). Pro dosažení nastavené přesnosti bylo nutné upravit hodnotu měrného skupenského tepla, emisivity povrchu a také koeficientu teplotní účinnosti metody svařování, viz kapitola 4.3.

Stejně přesnosti výsledků nebylo dosaženo u všech hodnocených kritérií u teplotních cyklů, stále přetrvával problém s příliš rychlým ochlazováním svařence, v porovnání s reálným svařováním. Z provedených úprav je patrné, že každá úloha zabývající se simulací svařovacího procesu musí být na začátku validována. Použitý materiál, ale také prostředí a technologie svařování výrazně ovlivňují vstupní nastavení simulace tím i výslednou přesnost. Protože hlavním předmětem zájmu bylo hodnocení deformací, lze z toho pohledu považovat dílčí cíl za splněný. [J9]

***Analýza vlivu procesu svařování na vznik deformací a ověření, zda zvolený software je schopen tyto vlivy identifikovat***

Po správně provedené validaci procesu je simulace schopná predikovat trend úpravy svařovacího procesu i pro svařování vysokopevnostních konstrukčních ocelí S960QL, při použití vícevrstvého svařování a kombinaci úprav procesu vedoucí ke snížení deformací. Z výsledků simulace nelze očekávat predikci výsledné hodnoty deformace s přesností v řádu mm, ale lze použít simulaci pro potvrzení pozitivního trendu úpravy procesu. [J10]

I tento výsledek však lze považovat za úspěšný výsledek. Už pouze naznačení trendu úpravy je velice prospěšné pro řízení a úpravy procesu. To, že simulace je schopna predikovat výsledné simulace u nového materiálu, jehož materiálový model může být založený na datech z Inspekčního certifikátu 3.1, je pro průmyslovou praxi velmi prospěšné.

Disertační práce potvrdila, že specializovaný simulační software Simufact Welding 2021.1 je schopný predikovat dopad opatření pro omezení makroskopických deformací pro vícevrstvé tupé spoje z vysokopevnostních konstrukčních ocelí se zahrnutím fázových transformací v průběhu procesu svařování, proto lze považovat celkový cíl práce za splněný. Toto je prokázáno výsledky uvedenými v kapitole 4.4.

Výsledky disertační práce jsou unikátní, neboť publikují využití MKP softwaru (Simufact Welding 2021.1) pro predikci opatření s cílem omezit výsledné makroskopické deformace při svařování vícevrstvého tupého spoje metodou MAG s použitím vysokopevnostní konstrukční oceli S960QL jako základního materiálu (3.12.2023). Díky tomu lze rozšířit využitelnost specializovaných MKP softwarů průmyslových procesů na složitější a více reálné aplikace.

Pro zajištění vyhovující přesnosti predikce je extrémně důležité validovat správné nastavení vstupů do simulace pomocí porovnání výsledku simulace pro známý stav s reálným svařencem.

Použití MKP simulací pro průmyslové procesy je současným trendem a disertační práce potvrzuje, že trend je to správný. Je vhodné v současné době používat možnosti doby týkající se výpočetního výkonu počítačů. V současnosti se světový průmysl specializuje na složitější a nákladnější výrobky z ušlechtlejších materiálů, lidská práce je také velmi nákladná, a proto by měla být vždy použita možnost, jak omezit plýtvání zdroji při dosažení požadovaného cíle – výroby kvalitních svařenců.

Další výzkum týkající se tématu simulací technologických procesů by měl být zaměřen na nalezení metod pro zjednodušení definice vstupů do simulace při zachování dostatečné přesnosti. V průmyslu je nejběžnější metodou pro omezení makroskopických deformací použití přípravků, avšak definice vlivu přípravku na simulační proces je velmi obtížná. Proto by bylo vhodné, aby se další výzkumné práce zaměřili na metody definice přípravků a jejich vliv na přesnost predikce makroskopické deformace.



## 7. Použité literární zdroje

1. VOESTALPINE. X-treme. *Voestalpine* [online]. [cit. 2023-12-03]. Dostupné z: <https://www.voestalpine.com/alform/en/Products/x-treme>
2. SSAB. Strenx® 960 product group. *SSAB* [online]. [cit. 2023-12-03]. Dostupné z: <https://www.ssab.com/en/brands-and-products/strenx/product-offer/960>
3. THYSSENKRUPP. Special vehicles – for the toughest conditions. *Thyssenkrupp* [online]. [cit. 2023-12-03]. Dostupné z: <https://www.thyssenkrupp.com/en/products/special-vehicles>
4. THYSSENKRUPP. ThyssenKrupp Steel Europe AG. *Mineral Processing* [online]. [cit. 2023-12-03]. Dostupné z: [https://www.at-minerals.com/en/artikel/at\\_-1624033.html](https://www.at-minerals.com/en/artikel/at_-1624033.html)
5. ACEROS ESPECIALES. STRENX 700. High strenght steel. *ACEROS ESPECIALES* [online]. [cit. 2023-12-03]. Dostupné z: <https://www.acerosurssa.es/en/high-elastic-limit-steels/19-strenx-700-high-strenght-steel.html>
6. VOESTALPINE. Applications. *Voestalpine* [online]. [cit. 2023-12-03]. Dostupné z: <https://www.voestalpine.com/alform/en/Applications>
7. PIEKARSKA, W.; KUBIAK, M. a SATERNUS, Z. Numerical Simulation of Deformations in T-Joint Welded by the Laser Beam. Online. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2013, roč. 58, č. 4, s. 1391-1396. ISSN 1733-3490. Dostupné z: <https://doi.org/10.2478/amm-2013-0181>. [cit. 2023-12-03].
8. PIEKARSKA, W.; KUBIAK, M.; SATERNUS, Z.; STANO, S. a DOMAŃSKI, T. Numerical Prediction Of Deformations In Laser Welded Sheets Made Of X5CrNi18-10 Steel. Online. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2015, roč. 60, č. 3, s. 1965-1972. ISSN 2300-1909. Dostupné z: <https://doi.org/10.1515/amm-2015-0334>. [cit. 2023-12-03].
9. SATTARI-FAR, I. a JAVADI, Y. Influence of welding sequence on welding distortions in pipes. Online. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2008, roč. 85, č. 4, s. 265-274. ISSN 03080161. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2007.07.003>. [cit. 2023-12-03].
10. MA, Ninshu a HUANG, Hui. Efficient Simulation of Welding Distortion in Large Structures and Its Reduction by Jig Constraints. Online. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2017, roč. 26, č. 11, s. 5206-5216. ISSN 1059-9495. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11665-017-3000-4>. [cit. 2023-12-03].
11. YAZDIAN, Nima; DERAKHSHAN, Ehsan Dezhparvar a KOVACEVIC, Radovan. Numerical prediction and experimental analysis of the residual stress fields and generated distortion in hybrid laser/arc welded thick plates of high-strength steels. Online. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018, roč. 98, č. 9-12, s.

- 2725-2735. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2404-0>. [cit. 2023-12-03].
12. NATEGHI, Ebrahim a HOSSEINZADEH, Morteza. Experimental investigation into effect of cooling of traversed weld nugget on quality of high-density polyethylene joints. Online. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016, roč. 84, č. 1-4, s. 581-594. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7663-4>. [cit. 2023-12-03].
  13. ANDERSSON, Oscar a MELANDER, Arne. Prediction and Verification of Resistance Spot Welding Results of Ultra-High Strength Steels through FE Simulations. Online. *Modeling and Numerical Simulation of Material Science*. 2015, roč. 05, č. 01, s. 26-37. ISSN 2164-5345. Dostupné z: <https://doi.org/10.4236/mnsms.2015.51003>. [cit. 2023-12-03].
  14. ZUO, D. Q.; CAO, Z. Q.; CAO, Y. J.; HUO, L. B. a LI, W. Y. Thermal fields in dissimilar 7055 Al and 2197 Al-Li alloy FSW T-joints: numerical simulation and experimental verification. Online. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019, roč. 103, č. 9-12, s. 3495-3512. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03465-z>. [cit. 2023-12-03].
  15. CAI, Wayne; SAEZ, Miguel; SPICER, Patrick; CHAKRABORTY, Debejyo; SKURKIS, Richard et al. Distortion simulation of gas metal arc welding (GMAW) processes for automotive body assembly. Online. *Welding in the World*. 2023, roč. 67, č. 1, s. 109-139. ISSN 0043-2288. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s40194-022-01369-3>. [cit. 2023-12-03].
  16. FISK, M. a LUNDBÄCK, A. Simulation and validation of repair welding and heat treatment of an alloy 718 plate. Online. *Finite Elements in Analysis and Design*. 2012, roč. 58, s. 66-73. ISSN 0168874X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.finel.2012.04.002>. [cit. 2023-12-03].
  17. BONAZZI, Enrico; COLOMBINI, Elena; PANARI, Davide; VERGNANO, Alberto; LEALI, Francesco et al. Numerical Simulation and Experimental Validation of MIG Welding of T-Joints of Thin Aluminum Plates for Top Class Vehicles. Online. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2017, roč. 48, č. 1, s. 379-388. ISSN 1073-5623. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11661-016-3834-7>. [cit. 2023-12-03].
  18. RAHMAN CHUKKAN, Jazeel; VASUDEVAN, M.; MUTHUKUMARAN, S.; RAVI KUMAR, R. a CHANDRASEKHAR, N. Simulation of laser butt welding of AISI 316L stainless steel sheet using various heat sources and experimental validation. Online. *Journal of Materials Processing Technology*. 2015, roč. 219, s. 48-59. ISSN 09240136. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.12.008>. [cit. 2023-12-03].
  19. ZUBAIRUDDIN, M.; ALBERT, S.K.; VASUDEVAN, M.; MAHADEVAN, S.; CHAUDHARI, V. et al. Numerical simulation of multi-pass GTA welding of grade 91

- steel. Online. *Journal of Manufacturing Processes*. 2017, roč. 27, s. 87-97. ISSN 15266125. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.04.031>. [cit. 2023-12-03].
20. LIDAM, Robert Ngendang; MANURUNG, Yupiter H. P.; HARUMAN, Esa; REDZA, M. Ridhwan; RAHIM, M. Ridzwan et al. Angular distortion analysis of the multipass welding process on combined joint types using thermo-elastic-plastic FEM with experimental validation. Online. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013, roč. 69, č. 9-12, s. 2373-2386. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5184-6>. [cit. 2023-12-03].
21. ZHAN, Xiaohong; LIU, Xiangbo; WEI, Yanhong; OU, Wenmin; CHEN, Jie et al. Numerical simulation on backward deformation of MIG multi-layer and multi-pass welding of thick Invar alloy. Online. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017, roč. 92, č. 1-4, s. 1001-1012. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0058-y>. [cit. 2023-12-03].
22. ŠPANIEL, Miroslav a Zdeněk HORÁK, 2010. *Úvod do metody konečných prvků*. Praha: Vydavatelství ČVUT.
23. NETUKAI, Seki. Parametric 3D FEM Modeler MaProMesh. Full Automatic Finite Element Analysis. *Netukaiseki.co.jp* [online]. [cit. 2023-12-03]. Dostupné z: [http://www.netukaiseki.co.jp/Mapro\\_1\\_eng.htm](http://www.netukaiseki.co.jp/Mapro_1_eng.htm)
24. HEXAGON, 2021. *Simufact Welding - software: 2021.1* [Online]. Germany.
25. UDDIN, Mohammad a Kazuoi YAMAZAK. Study of Distance Computation between Objects Represented by Discrete Boundary Model. In: *ResearchGate [online]*. [cit. 2023-10-22]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/267961691\\_Study\\_of\\_Distance\\_Computation\\_between\\_Objects\\_Represented\\_by\\_Discrete\\_Boundary\\_Model](https://www.researchgate.net/publication/267961691_Study_of_Distance_Computation_between_Objects_Represented_by_Discrete_Boundary_Model)
26. RANJAN, Prabhat. Investigations on the flow behaviour in microfluidic device due to surface roughness: a computational fluid dynamics simulation. Online. *Microsystem Technologies*. 2019, roč. 25, č. 10, s. 3779-3789. ISSN 0946-7076. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00542-019-04304-7>. [cit. 2023-12-03].
27. GHAFOURI, Mehran; AHOLA, Antti; AHN, Joseph a BJÖRK, Timo. Welding-induced stresses and distortion in high-strength steel T-joints: Numerical and experimental study. Online. *Journal of Constructional Steel Research*. 2022, roč. 189. ISSN 0143974X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.107088>. [cit. 2023-12-03].
28. MORAVEC, Jaromír. Technologie a materiály: (Tepelné zpracování – Výhody, nevýhody, rozdělení, výsledné struktury. Použití ARA a IRA diagramů. *TUL*.
29. GOLDAK, John; CHAKRAVARTI, Aditya a BIBBY, Malcolm. A new finite element model for welding heat sources. Online. *Metallurgical Transactions B*. 1984, roč. 15, č. 2, s. 299-305. ISSN 0360-2141. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/BF02667333>. [cit. 2023-12-03].

30. ODBOR TERMOMECHANIKY A TECHNIKY PROSTŘEDÍ, FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ, VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Stefanův Boltzmannův zákon. <https://eu.fme.vutbr.cz> [online]. [cit. 2023-12-03]. Dostupné z: <https://eu.fme.vutbr.cz/file/vomm/0204.htm>
31. MEYGHANI, Bahman a AWANG, Mokhtar. *Welding Simulations Using ABAQUS*. Online. Singapore: Springer Singapore, 2022. ISBN 978-981-19-1319-8. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/978-981-19-1320-4>. [cit. 2023-12-03].
32. ANSYS. How to Mesh and Simulate Welds with Ansys Mechanical. *Ansys.com* [online]. [cit. 2023-12-03]. Dostupné z: <https://www.ansys.com/blog/how-to-simulate-welds>
33. GROUP, Esi. *SYSWELD Welding*. Online. ESI Group. Dostupné z: <https://www.esi-group.com/products/sysweld>. [cit. 2023-12-03].
34. HEXAGON. Simufact Welding. *Hexagon* [online]. [cit. 2023-12-03]. Dostupné z: <https://hexagon.com/products/simufact-welding>
35. SWANTEC. *SORPAS® Welding Simulation*. Online. SWANTEC | Welding Simulation and Optimization. Dostupné z: <https://www.swantec.com/products/sorpas/>. [cit. 2023-12-03].
36. FABWELD. Software for welding simulation. *FabWeld* [online]. [cit. 2023-12-03]. Dostupné z: <https://fabweld.de/en/>
37. GHAFOURI, Mehran; AHN, Joseph; MOURUJÄRVI, Juho; BJÖRK, Timo a LARKIOLA, Jari. Finite element simulation of welding distortions in ultra-high strength steel S960 MC including comprehensive thermal and solid-state phase transformation models. Online. *Engineering Structures*. 2020, roč. 219. ISSN 01410296. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110804>. [cit. 2023-12-03].
38. QU, Zhaoxia a XIA, Liqian. Study on Welding Deformation Numerical Simulation for Ultra-high Strength Steel BS960E. Online. *Procedia Manufacturing*. 2019, roč. 37, s. 97-104. ISSN 23519789. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.12.020>. [cit. 2023-12-03].
39. SUN, Jiamin a DILGER, Klaus. Reliability analysis of thermal cycle method on the prediction of residual stresses in arc-welded ultra-high strength steels. Online. *International Journal of Thermal Sciences*. 2023, roč. 185. ISSN 12900729. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2022.108085>. [cit. 2023-12-03].
40. GHAFOURI, Mehran; AHOLA, Antti; AHN, Joseph a BJÖRK, Timo. Numerical and experimental investigations on the welding residual stresses and distortions of the short fillet welds in high strength steel plates. Online. *Engineering Structures*. 2022, roč. 260. ISSN 01410296. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114269>. [cit. 2023-12-03].
41. WEINGRILL, L.; NASIRI, M. B. a ENZINGER, N. Thermo-metallurgically coupled numerical simulation and validation of multi-layer gas metal arc welding of high strength

- pearlitic rails. Online. *Welding in the World*. 2019, roč. 63, č. 1, s. 63-73. ISSN 0043-2288. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s40194-018-0639-x>. [cit. 2023-12-03].
42. SARMAST, Ardeshir; SCHUBNEL, Jan a FARAJIAN, Majid. Finite element simulation of multi-layer repair welding and experimental investigation of the residual stress fields in steel welded components. Online. *Welding in the World*. 2022, roč. 66, č. 6, s. 1275-1290. ISSN 0043-2288. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s40194-022-01286-5>. [cit. 2023-12-03].
43. MENTE, Tobias; BOELLINGHAUS, Thomas a SCHMITZ-NIEDERAU, Martin. Heat treatment Effects on The Reduction of Hydrogen in Multi-Layer High-Strength Weld Joints. Online. *Welding in the World*. 2012, roč. 56, č. 7-8, s. 26-36. ISSN 0043-2288. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/BF03321362>. [cit. 2023-12-03].
44. FALTUS, František, 1947. *Svařování*. Praha: Česká matice technická.
45. KOUKAL, Jaroslav, Schwarz DRAHOMÍR a Jiří HAJDÍK, 2009. *Materiály a jejich svařitelnost*. Ostrava: Český svářečský ústav.
46. BENEŠ, Libor. *Přehled svařování* [online]. [cit. 2023-09-17]. Dostupné z: [http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/svarovani/UT\\_01\\_Prehled\\_svarovani\\_T08.pdf](http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/svarovani/UT_01_Prehled_svarovani_T08.pdf)
47. SPŠ ZENGROVA. *Svařování* [online]. [cit. 2023-09-17]. Dostupné z: <https://www.spszengrova.cz/wp-content/uploads/2020/04/ZAV1-svarovani.pdf>
48. *ČSN EN ISO 4063 - Svařování a příbuzné procesy - Přehled metod a jejich číslování*, 2023. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
49. FRONIUS. Co je svařování MIG/MAG? *Fronius.com* [online]. [cit. 2023-12-03]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/cs-cz/czech-republic/perfect-welding/svet-svarovani/svaovn-migmag>
50. LINCOLN ELECTRIC. *Metoda MIG MIG. Svařování MIG. Svařování MIG. Svařování plněnou elektrodou s vlastní ochranou. MIG / MAG svářečky* [online]. [cit. 2023-12-03]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/12817760-Metoda-mig-mig-svarovani-mig-svarovani-mig-svarovani-plnenou-elektrodou-s-vlastni-ochranou-mig-mag-svarecky.html>
51. KOUKAL, Jaroslav. HISTORIE A SOUČASNOST METOD SVAŘOVÁNÍ MIG/MAG. *Svět svaru* [online]. [cit. 2023-12-03]. Dostupné z: <https://readgur.com/doc/1002939/st%C3%A1hnout-zdarma--->
52. TECHNODAT, Cae-systémy. *Průmysl 4.0*. Online. Nenalezený vydavatel. Dostupné z: <https://www.prumysl-4.cz/>. [cit. 2023-11-28].
53. SABRE, [www.sabre.cz](http://www.sabre.cz). *Robotizované svařování: rychlost, ale i problémy*. Online. Technický týdeník. Dostupné z: [https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv-technik/robotizovane-svarovani-rychlost-ale-i-problemy\\_26137.html](https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv-technik/robotizovane-svarovani-rychlost-ale-i-problemy_26137.html). [cit. 2023-12-03].
54. ROBOTS, Universal. *Vývoj robotického svařování*. Online. Vše o průmyslu. Dostupné z: <https://www.vseoprumsly.cz/robotizace/kooperativni-roboty/vyvoj-robotickeho-svarovani.html>. [cit. 2023-12-03].

55. KUBÍČEK, Jaroslav, Bohumil KANDUS a Oldřich AMBROŽ, 2001. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: ZEROSS. Svařování. ISBN 8085771810.
56. NOVOTNÝ, František, HOTAŘ, Vlastimil, HORÁK, Marcel, STARÁ, Marie a Michal STARÝ *Úvod do automatizace a robotizace ve strojírenství*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2020. ISBN 978-80-7494-545-8.
57. INFO@WEBPROGRESS.CZ, E-mail:. *Ruční sváření*. Online. TMW, a.s. Dostupné z: <http://www.tmw.cz/rucni-svareni1>. [cit. 2023-12-03].
58. TCP. *MECHANIZOVANÉ SVAŘOVÁNÍ*. Online. Svařovací technika s.r.o. Ostrava. Dostupné z: <https://www.vlceksvt.cz/svarovaci-traktory.html>. [cit. 2023-12-03].
59. REDAKTEUR. *High productivity through automated high-performance welding*. Online. Perfect Welding. Dostupné z: <https://blog.perfectwelding.fronius.com/en/automated-high-performance-welding/>. [cit. 2023-12-03].
60. TREICHEL, Alois. *Karosseriebau*. Online. BimmerArchiv · bimmerarchiv.de. Dostupné z: <http://www.bimmerarchiv.de/foto/12495-591-karosseriebau.html>. [cit. 2023-12-03].
61. PILOUS, Václav, 2006. Svařování normalizovaných, termomechanických zpracovaných a zušlechtěných jemnozrných ocelí. *Zváranie*. **55**(6), 131-136.
62. Václav Pilous a kolektiv autorů. *Vysokopevné Mikrolegované Jemnozrné oceli a jejich svařitelnost*. Plzeň 1999.
63. ASM HANDBOOK COMMITTEE, 1990. *Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloy*. ASM International. ISBN 978-1-62708-161-0.
64. HELMUT KAUFMANN, Peter J. Uggowitzer a T. GLADMAN. *Fundamentals and Applications of Microalloying Forging Steels: Proceedings of a Symposium Sponsored by the Ferrous Metallurgy Committee of TMS [and Others] at the Colorado School of Mines Held July 8-10, 1996 at the Colorado School of Mines, Golden, Colorado*. In: Google Books [online]. [cit. 2023-10-22]. Dostupné z: [https://books.google.com/books/about/Fundamentals\\_and\\_Applications\\_of\\_Microal.html?hl=cs&id=CZuZXwAACAAJ](https://books.google.com/books/about/Fundamentals_and_Applications_of_Microal.html?hl=cs&id=CZuZXwAACAAJ)
65. ČSN EN 10025-6: *Výrobky válcované za tepla z konstrukčních ocelí - Část 6: Technické dodací podmínky na ploché výrobky s vyšší mezí kluzu po zušlechtování*, 2005. 1. Praha: Český normalizační institut.
66. STEMNE, Daniel, Torbjörn NARSTRÖM a Bogoljub HRNJEZ, 2010. *Welding handbook: a guide to better welding of Hardox and Weldox*. Oxelösund: SSAB. ISBN 9789197857307.
67. ČSN EN 1011-2: *Svařování - Doporučení pro svařování kovových materiálů - Část 2: Obloukové svařování feritických ocelí*, 2001. 1. Praha: Český normalizační institut.
68. SAMUELSSON, Anders; SCHRÖTER, Falko; SEDLACEK, Gerhard; MÜLLER, Christian; NUSSBAUMER, Alain et al. *High-Performance Steels in Europe*. Online. In: GÜNTHER, Hans-Peter (ed.). *Use and Application of High-Performance Steels for Steel*

- Structures*. Zurich, Switzerland: International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE), 2005, s. 99-146. ISBN 978-3-85748-113-0. Dostupné z: <https://doi.org/10.2749/sed008.099>. [cit. 2023-12-03].
69. WELDING ANSWERS. WELDING ANSWERS. *WELDING ANSWERS* [online]. [cit. 2023-12-03]. Dostupné z: <https://weldinganswers.com/using-the-carbon-equivalent-method-to-determine-weldability-of-steels/>
70. LAUDIEN, U., et al. Fachbuchreihe Schweißtechnik : *DVS - Gefügerichtreihe Stahl*. Düsseldorf : Deutscher Verlag für Schweißtechnik, 1979. 264 s. ISBN 3 87155 079
71. KNOOP, Franz Martin, Sandrine BREMER, Volker FLAXA a Markus LIEDTKE, 2013. The processing of helical-welded large diameter pipes of grade X80 with 23.7 mm wall thickness and their properties. *Proceeding of the Internation seminar on welding of high strength pipelines steels*. 209-229.
72. HERMANN, Petr. *Svařování jemnozrnných, vysokopevnostních ocelí*. Online. Konstrukce. Dostupné z: <http://old.konstrukce.cz/clanek/svarovani-jemnozrnnych-vysokopevnostnich-oceli/>. [cit. 2023-12-03].
73. OKERBLOM, Nikolaj Oskarovič, 1971. *Konstrukčně-technologické projektování svařovaných konstrukcí*. Praha: Nakladatelství technické literatury.
74. MICHÁLEK, Karel, Ladislav SOCHA, Zdeněk ADOLF a Jiří BAŽAN. Rafinace a odlévání oceli. In: *Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství* [online]. [cit. 2023-10-23]. Dostupné z: [http://katedry.fmmi.vsb.cz/Modin\\_Animace/Opory/02\\_Metalurgicke\\_inzenyrstvi/03\\_Rafinace\\_a\\_odlevani\\_oceli/Michalek\\_Socha\\_Rafinace\\_a\\_odlevani\\_oceli.pdf](http://katedry.fmmi.vsb.cz/Modin_Animace/Opory/02_Metalurgicke_inzenyrstvi/03_Rafinace_a_odlevani_oceli/Michalek_Socha_Rafinace_a_odlevani_oceli.pdf)
75. KOBEL CO. Preheating and Postheating: The Purposes and Procedures. *KOBE STEEL, LTD.* - [online]. [cit. 2023-12-03]. Dostupné z: [https://www.kobelco-welding.jp/education-center/abc/ABC\\_2002-04.html](https://www.kobelco-welding.jp/education-center/abc/ABC_2002-04.html)
76. ANTONIO, Amarine. How to determine preheating exemption in welding? *AMARINE* [online]. [cit. 2023-12-03]. Dostupné z: <https://amarineblog.com/2021/06/25/how-to-determine-preheating-exemption-in-welding/>
77. SÉFÉRIAN, Daniel, 1962. *Nauka o kovech ve svařování ocelí*. SNTL - Státní nakladatelství technické literatury.
78. OKERBLOM, Nikolaj Oskarovič, 1971. *Konstrukčně-technologické projektování svařovaných konstrukcí*. Praha: Nakladatelství technické literatury.
79. HÄNSCH, Hans a Joachim KREBS, 1964. *Deformace a pnutí ve svařovaných konstrukcích*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury.
80. ČSN EN ISO 5817: *Svařování - Svarové spoje oceli, niklu, titanu a jejich slitin zhotovené tavným svařováním (mimo elektronového a laserového svařování) - Určování stupňů jakosti*, 2004. 1. Praha: Český normalizační institut.

81. HUDEC, Zdeněk, 1998. *Deformace a napětí při svařování*. Liberec: Technická univerzita v Liberci. ISBN 80-7083-313-0.A
82. MUSIL, Miloslav a Jaromír MORAVEC, 2017. *Výroba a aplikované inženýrství ve svařování*. DOM-ZO 13. ISBN 978-80-906720-0-0
83. XING, Yonghui; WANG, Weiyong a AL-AZZANI, Hisham. Assessment of thermal properties of various types of high-strength steels at elevated temperatures. Online. *Fire Safety Journal*. 2021, roč. 122. ISSN 03797112. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2021.103348>. [cit. 2023-12-03]. CHARLIE YOUNG, P.E. Thermal Expansion of Steel: A Complete Guide. Online. In: EngineerExcel. Dostupné z: <https://engineerexcel.com/thermal-expansion-of-steel/>. [cit. 2023-09-21].
84. CHARLIE YOUNG, P.E. *Thermal Expansion of Steel: A Complete Guide*. Online. EngineerExcel. Dostupné z: <https://engineerexcel.com/thermal-expansion-of-steel/>. [cit. 2023-12-03].
85. ELUC. Druhy svařovaných konstrukcí. *ELUC* [online]. [cit. 2023-12-03]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1804>
86. Fronius Česká republika s.r.o., 2022. *CMT: Cold metal transfer, naprosto stabilní svařování* [Online]. Praha.
87. Maturitní otázky nejen do strojírenství. *Maturitní otázky nejen do strojírenství* [online]. [cit. 2023-12-03]. Dostupné z: <http://strojirenstvi-maturita.blogspot.com/2011/10/maturitni-otazka-c-11b.html>
88. Meiller Slany. CLOSS [online]. [cit. 2018-06-13]. Dostupné z: <https://www.cloos.de/de-cz/solutions/meiller-slany-4997/>
89. STRACHOTA, Antonín. *Rovnění součástí ohřevem*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1966. Knihnice strojírenské výroby. ISBN 621.98-229.6.
90. HEXAGON, 2021. *Simufact Welding 2021.1 (software)*.
91. ČSN EN 10025-2: *Výrobky válcované za tepla z konstrukčních ocelí - Část 2: Technické dodací podmínky pro nelegované konstrukční oceli*, 2005. Praha: Český normalizační institut.
92. ČSN EN ISO 14341: *Svařovací materiály - Dráty pro obloukové svařování nelegovaných a jemnozrnných ocelí v ochranném plynu a jejich svarové kovy - Klasifikace*, 2011. Praha: Český normalizační institut.
93. SAJEK, Adam a NOWACKI, Jerzy. Comparative evaluation of various experimental and numerical simulation methods for determination of t<sub>8/5</sub> cooling times in HPAW process weldments. Online. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2018, roč. 18, č. 2, s. 583-591. ISSN 16449665. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.acme.2017.10.001>. [cit. 2023-12-03].
94. DUNĐER, Marko, Tomaž VUHERER a Ivan SAMARDŽIĆ, 2014. Weldability of microalloyed high strength steels TStE 420 and S960QL. *Metalurgija*. (3), 335-338.



95. KALUP, Aleš; SMETANA, Bedřich; KAWULOKOVÁ, Monika; ZLÁ, Simona; FRANCOVÁ, Hana et al. Liquidus and solidus temperatures and latent heats of melting of steels. Online. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2017, roč. 127, č. 1, s. 123-128. ISSN 1388-6150. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s10973-016-5942-4>. [cit. 2023-12-03].
96. ŽALUDOVÁ, Monika; SMETANA, Bedřich; ZLÁ, Simona; DOBROVSKÁ, Jana; WATSON, Andy et al. Experimental study of Fe–C–O based system above 1,000 °C. Online. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2013, roč. 112, č. 1, s. 465-471. ISSN 1388-6150. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s10973-012-2847-8>. [cit. 2023-12-03].
97. THE ENGINEERING TOOLBOX. Metals - Latent Heat of Melting. *Latent Heat of Melting* [online]. [cit. 2023-12-03]. Dostupné z: [https://www.engineeringtoolbox.com/fusion-heat-metals-d\\_1266.html](https://www.engineeringtoolbox.com/fusion-heat-metals-d_1266.html)
98. SADIQ, H.; WONG, M. B.; TASHAN, J.; AL-MAHAIDI, R. a ZHAO, X.-L. Determination of Steel Emissivity for the Temperature Prediction of Structural Steel Members in Fire. Online. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2013, roč. 25, č. 2, s. 167-173. ISSN 0899-1561. Dostupné z: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000607](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000607). [cit. 2023-12-03].
99. THE ENGINEERING TOOLBOX. *Surface Emissivity Coefficients* [online]. [cit. 2023-12-03]. Dostupné z: [https://www.engineeringtoolbox.com/emissivity-coefficients-d\\_447.html](https://www.engineeringtoolbox.com/emissivity-coefficients-d_447.html)
100. DUPONT, J.N. a A.R. MARDER, 1995. Thermal efficiency of arc welding processes. *Welding Journal*. (74).
101. RADAJ, Dieter. *Heat Effects of Welding*. Online. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1992. ISBN 978-3-642-48642-5. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-48640-1>. [cit. 2023-12-03].
102. MESSLER, Robert W. *Principles of Welding*. Online. New York: Wiley, 1999. ISBN 9780471253761. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/9783527617487>. [cit. 2023-12-03].
103. GRAY, Tom, Duncan CAMILLERI a Norman MCPHERSON. Control of welding distortion in thin-plate fabrication. Cambridge: Elsevier/Woodhead Publishing. Woodhead Publishing series in welding and other joining technologies, 2014, 83, ISBN 9780857090478.
104. YAN, De-jun; LIU, Xue-song; XU, Huan-yu; YANG, Jian-guo; FANG, Hong-yuan et al. Welding distortion control of automobile engine stator by finite element method. Online. *Frontiers of Materials Science in China*. 2009, roč. 3, č. 1, s. 71-74. ISSN 1673-7377. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11706-009-0011-6>. [cit. 2023-12-03].
105. WOO, Donghan; KITAMURA, Mitsuru a TAKEZAWA, Akihiro. Systematic method for positioning clamps and strongbacks based on their influence on welding displacements. Online. *Ocean Engineering*. 2020, roč. 202. ISSN 00298018. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107084>. [cit. 2023-12-03].

- 106.GUO, Hao; FAN, Chenkang; YANG, Shufeng; WANG, Jianmei; PEI, Wenle et al. Numerical Simulation of Layered Bimetallic ZChSnSb8Cu4/Steel TIG-MIG Hybrid Welding Based on Simufact. Online. *Materials*. 2023, roč. 16, č. 15. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ma16155346>. [cit. 2023-12-03].
- 107.BAJPAI, Tapas; NYATI, Alok Kumar; SHARMA, Pankaj a GUPTA, Pankaj Kumar. Numerical and Experimental Investigation on Effects of Welding Sequence on Distortions in Fillet-Welded AA6061-T6 Joints. Online. *Journal of Materials Engineering and Performance*. ISSN 1059-9495. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11665-023-08755-y>. [cit. 2023-12-03].
- 108.NAPITUPULU, Richard A.M.; HUTABARAT, Chilinton; MANURUNG, Charles S.P; MANURUNG, Yupiter HP a GRAF, Marcel. Comparative study between MSC Marc/Mentat student version and Simufact Welding for three-passed butt joint. Online. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020, roč. 852, č. 1. ISSN 1757-8981. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/852/1/012071>. [cit. 2023-12-03].
- 109.ABBURI VENKATA, K.; TRUMAN, C.E.; WIMPORY, R.C. a PIRLING, T. Numerical simulation of a three-pass TIG welding using finite element method with validation from measurements. Online. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2018, roč. 164, s. 68-79. ISSN 03080161. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2017.05.014>. [cit. 2023-12-03].
- 110.RAHMAN CHUKKAN, Jazeel; VASUDEVAN, M.; MUTHUKUMARAN, S.; RAVI KUMAR, R. a CHANDRASEKHAR, N. Simulation of laser butt welding of AISI 316L stainless steel sheet using various heat sources and experimental validation. Online. *Journal of Materials Processing Technology*. 2015, roč. 219, s. 48-59. ISSN 09240136. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.12.008>. [cit. 2023-12-03].
- 111.DERAKHSHAN, Ehsan Dezhparvar; YAZDIAN, Nima; CRAFT, Blake; SMITH, Steve a KOVACEVIC, Radovan. Numerical simulation and experimental validation of residual stress and welding distortion induced by laser-based welding processes of thin structural steel plates in butt joint configuration. Online. *Optics & Laser Technology*. 2018, roč. 104, s. 170-182. ISSN 00303992. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.02.026>. [cit. 2023-12-03].
- 112.BONAZZI, Enrico; COLOMBINI, Elena; PANARI, Davide; VERGNANO, Alberto; LEALI, Francesco et al. Numerical Simulation and Experimental Validation of MIG Welding of T-Joints of Thin Aluminum Plates for Top Class Vehicles. Online. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2017, roč. 48, č. 1, s. 379-388. ISSN 1073-5623. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11661-016-3834-7>. [cit. 2023-12-03].
- 113.DIALAMI, N.; CHIUMENTI, M.; CERVERA, M.; SEGATORI, A. a OSIKOWICZ, W. Enhanced friction model for Friction Stir Welding (FSW) analysis: Simulation and experimental validation. Online. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2017, roč.

- 133, s. 555-567. ISSN 00207403. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.09.022>. [cit. 2023-12-03].
- 114.SUN, Zhenbang; HAN, Yongquan; DU, Maohua; TONG, Jiahui a HONG, Haitao. An improved simulation of temperature field in VPPA–GMAW of Al–Cu–Mg alloy. Online. *Journal of Materials Processing Technology*. 2019, roč. 263, s. 366-373. ISSN 09240136. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.08.017>. [cit. 2023-12-03].
- 115.HEXAGON. Material Data. *Simufact software solutions* [online]. [cit. 2023-12-03]. Dostupné z: <https://www.simufact.com/material-data.html>
- 116.DEEPUPU, M. J. a PHANIKUMAR, G. ICME Framework for Simulation of Microstructure and Property Evolution During Gas Metal Arc Welding in DP980 Steel. Online. *Integrating Materials and Manufacturing Innovation*. 2020, roč. 9, č. 3, s. 228-239. ISSN 2193-9764. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s40192-020-00182-4>. [cit. 2023-12-03].
- 117.WU, Wei-Lin; WANG, Wei-Cheng a LO, Wei. The study of improving the strip flatness in run-out-table during laminar cooling. Online. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018, roč. 95, č. 9-12, s. 4419-4437. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1558-5>. [cit. 2023-12-03].
- 118.NATEGHI, Ebrahim a VOLUKOLA, Abdolhamid Gorji. Numerical and Experimental Investigations of Trajectory Effects into Temperature Distribution and Distortion in the Slot Welding of Steel S235JR. Online. *International Journal of Steel Structures*. 2019, roč. 19, č. 3, s. 819-833. ISSN 1598-2351. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s13296-018-0167-y>. [cit. 2023-12-03].
- 119.YE, Yanhong; CAI, Jianpeng; JIANG, Xiaohua; DAI, Deping a DENG, Dean. Influence of groove type on welding-induced residual stress, deformation and width of sensitization region in a SUS304 steel butt welded joint. Online. *Advances in Engineering Software*. 2015, roč. 86, s. 39-48. ISSN 09659978. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2015.04.001>. [cit. 2023-12-03].
- 120.HE, Zitao; HUANG, Bensheng; CHEN, Lingzhi; ZHENG, Jianneng; YANG, Jiang et al. Effect of Groove Angle on Stress Field and Deformation of Q345/316 Dissimilar Metal Welded Joints. Online. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2022, roč. 31, č. 8, s. 6891-6903. ISSN 1059-9495. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11665-022-06739-y>. [cit. 2023-12-03].

## 8. Publikace autora související s DP

- J1. JEŽEK, Štěpán, Jaroslav BRABEC a Karel KOVANDA, 2017. Welding procedure qualification report for steel with increased yield strength. In: *TECHNOLOGICAL FORUM*. Špindlerův mlýn, s. 48-54. ISBN 978-80-87583-22-7.
- J2. BENEŠ, Libor, Jaroslav BRABEC a Štěpán JEŽEK, 2018. Problematika parametru t8/5 ve výrobě svařování vysocepevných jemnozrnných ocelí v auto jeřábové technice. Vidly u Karlovy Studánky: *PROMATTEN*. ISBN 978-80-905947-4-6.
- J3. BRABEC, Jaroslav; JEŽEK, Štěpán; BENEŠ, Libor; KRÍŽ, Antonín a MAJRICH, Petr. Suitability Confirmation for Welding Ultra-High Strength Steel S1100QL Using the RapidWeld Method. Online. *Manufacturing Technology*. 2021, roč. 21, č. 1, s. 29-36. ISSN 12132489. Dostupné z: <https://doi.org/10.21062/mft.2021.014>. [cit. 2023-12-04].
- J4. JEŽEK, Štěpán, Jakub HORVÁTH, Ladislav KOLAŘÍK, Jiří JANOVEC a Marie KOLAŘÍKOVÁ, 2020. INFLUENCE OF SHIELDING GAS FLOW RATE ON PROPERTIES OF STEEL S960QL WELDED JOINT. In: *METAL 2020*.
- J5. WERUNSKÝ, M.; JEŽEK, Š.; FOREJTOVÁ, L.; DOLEJŠ, J. Technologický postup svařování za studena tvářené vysokopevnostní oceli S960QL [Verified Technology] 2019.
- J6. JEŽEK, Štěpán, Tomáš GURČÍK, Ladislav KOLAŘÍK a Pavel ROHAN. Calorimetric evaluation of thermal efficiency of selected metal transfers for MAG welding. In: *TECHNOLOGICAL FORUM 2020*. ISBN 978-80-87583-32-6.
- J7. JEŽEK, Štěpán, Ladislav KOLAŘÍK a Jaroslav BRABEC, 2018. Influence of welding jigs on weldment distortion. In: *TECHNOLOGICAL FORUM*. Dubovice, s. 91-96. ISBN 978-80-87583-26-5.
- J8. JEŽEK, Štěpán, Ladislav KOLAŘÍK, Jaroslav BRABEC a Libor BENEŠ, 2019. Welding simulation results in comparison with real welding process. In: *TECHNOLOGICAL FORUM 2019*. Veselý Kopec, s. 44-49. ISBN 978-80-87583-30.
- J9. JEŽEK, Štěpán, Ladislav KOLAŘÍK a Kateřina OPATOVÁ, 2024. Validation of S960QL materiál model computed by JMatPro for utilization in Simufact Welding. *Journal of Manufacturing Processes*. ISSN 1526-6125. (odesláno k recenznímu řízení)
- J10. JEŽEK, Štěpán, Ladislav KOLAŘÍK a Jaroslav BRABEC, 2024. Suitability evaluation of Simufact Welding for prediction of distortion with various process modifications. *INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY*. ISSN 0268-3768. (odesláno k recenznímu řízení)

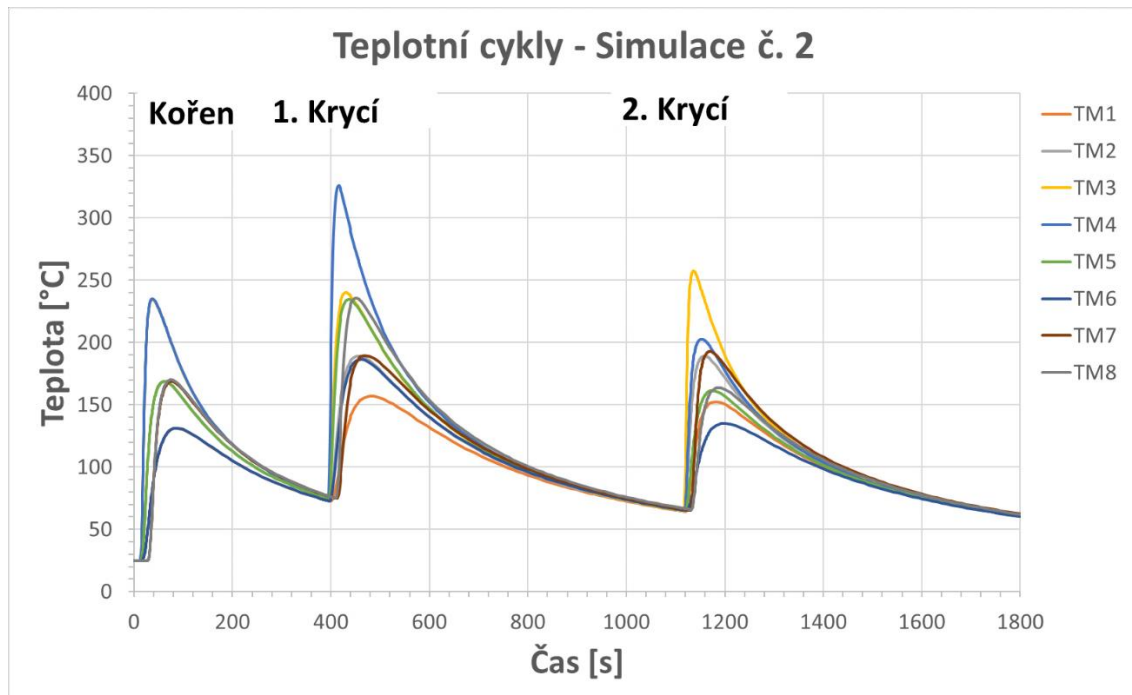
## 9. Publikace autora nesouvisející s DP

- J11. BRABEC, Jaroslav; JEŽEK, Štěpán; BENEŠ, Libor; KOLAŘÍK, Ladislav  
Metallurgy of the weld joints on the weldox 1100 steel realised with the laser hybrid technology  
In: *Advanced Manufacturing and Repair Technologies in Transport Industry*. Pardubice: Univerzita Pardubice. Dopravní fakulta Jana Pernera, 2019. ISSN 1801-674X
- J12. BRABEC, Jaroslav.; JEŽEK, Štěpán.; BENEŠ, Libor.  
Metallurgy of fine grain steels welded with the Laser Hybrid technology.  
In: *ICTKI 2018 - NOVÉ POZNATKY V TECHNOLOGIÍCH A TECHNOLOGICKÉ INFORMACE '18*. Ústí nad Labem: Univerzita Jana Evangelisty Purkyně v Ústí nad Labem. Knihkupectví UJEP, 2018. ISBN 978-80-7561-056-0.
- J13. KOLAŘÍK, Ladislav; JEŽEK, Štěpán  
Virtuální svařování - využití simulátorů při výuce svářečů  
[Unpublished Lecture] DOM-ZO 13, s.r.o., pracoviště Praha. 2018-12-04.
- J14. JEŽEK, Štěpán; KOLAŘÍK, Ladislav; KOVANDA, Karel; BRABEC, Jaroslav  
Comparison of ultrasonic and x-ray testing of butt weld  
[Unpublished Lecture] *Mikroskopie a nedestruktivní zkoušení materiálů 2018*. 2018-10-23
- J15. BENEŠ, Libor; BRABEC, Jaroslav; KOLAŘÍK, Ladislav; JEŽEK, Štěpán  
Problematika svařování hliníkových slitin u kolejových vozidel  
In: *TESYDO 2019*. Brno: TESYDO, s.r.o., 2019. ISBN 978-80-87102-25-1.

# 10. Přílohy disertační práce

## Příloha 1 – Výsledky simulace č. 2

### P1.1. Teplotní cykly



Obrázek P1.1: Teplotní cykly simulace č.2

Tabulka P1.1: Teplotní cykly simulace č.2

	Teplotní cykly - Simulace č. 2 [°C]							
	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM6	TM7	TM8
Kořen min	25	25	25	25	25	25	25	25
Kořen max	131,1	168,7	234,6	235,0	168,9	131,3	168,7	170,1
1. Krycí min	65,0	65,2	65,2	65,7	65,8	65,9	66,7	67,4
1. Krycí max	156,8	189,1	240,0	326,0	234,6	186,4	189,7	235,6
2. Krycí min	64,3	64,6	64,7	65,1	65,2	65,1	65,3	65,9
2. Krycí max	152,6	189,1	257,5	202,6	161,5	135,1	192,9	163,5
Rozdíl Kořen	106,1	143,7	209,6	210,0	143,9	106,3	143,7	145,1
Rozdíl 1. Krycí	91,8	124,0	174,8	260,4	168,8	120,5	123,0	168,1
Rozdíl 2. krycí	88,3	124,5	192,8	137,5	96,4	70,0	127,6	97,6

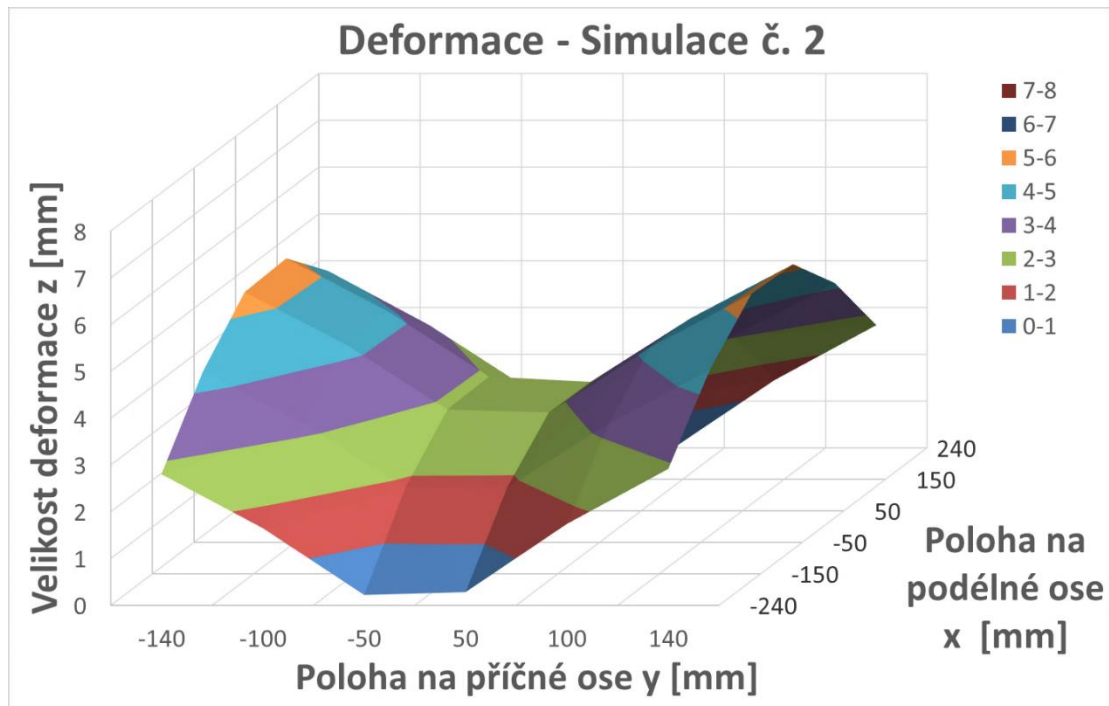
Tabulka P1.2: Teplotní cykly – Rozdíl [°C] simulace č.2

		Rozdíl [°C] - Simulace č. 2 (Teplotní cykly)						
		TM2	TM3	TM4	TM5	TM6	TM7	TM8
Kořen min		-0,7	-0,6	-0,5	-0,7	-0,5	-0,6	-1
Kořen max		-18,8	-26,6	-27,0	-20,2	-16,2	-9,7	-20,0
1. Krycí min		-29,1	-32,5	-31,9	-28,2	-25,2	-28,5	-29,6
1. Krycí max		-39,5	-48,5	-35,3	-29,6	-28,2	-33,2	-33,7
2. Krycí min		-41,8	-42,5	-42,7	-41,6	-42,5	-43,0	-46,4
2. Krycí max		-62,2	-68,1	-60,3	-53,8	-51,6	-48,3	-57,8
Rozdíl Kořen		-18,1	-26,0	-26,5	-19,5	-15,7	-9,1	-19,0
Rozdíl 1. Krycí		-10,3	-16,0	-3,3	-1,4	-3,0	-4,7	-4,2
Rozdíl 2. krycí		-20,4	-25,6	-17,6	-12,1	-9,1	-5,3	-11,4

Tabulka P1.3: Teplotní cykly – Rozdíl [%] simulace č.2

		Rozdíl [%] - Simulace č. 2 (Teplotní cykly)							
		TM2	TM3	TM4	TM5	TM6	TM7	TM8	Průměr
Kořen min		-2,7%	-2,3%	-2,0%	-2,7%	-2,0%	-2,3%	-3,8%	-2,6%
Kořen max		-10,0%	-10,2%	-10,3%	-10,7%	-11,0%	-5,4%	-10,5%	-9,7%
1. Krycí min		-30,9%	-33,2%	-32,7%	-29,9%	-27,7%	-29,9%	-30,5%	-30,7%
1. Krycí max		-17,3%	-16,8%	-9,8%	-11,2%	-13,1%	-14,9%	-12,5%	-13,7%
2. Krycí min		-39,3%	-39,7%	-39,6%	-39,0%	-39,5%	-39,7%	-41,3%	-39,7%
2. Krycí max		-24,8%	-20,9%	-22,9%	-25,0%	-27,6%	-20,0%	-26,1%	-23,9%
Rozdíl Kořen		-11,2%	-11,1%	-11,2%	-11,9%	-12,9%	-6,0%	-11,6%	-10,8%
Rozdíl 1. Krycí		-7,7%	-8,4%	-1,3%	-0,8%	-2,4%	-3,7%	-2,4%	-3,8%
Rozdíl 2. krycí		-14,1%	-11,7%	-11,3%	-11,2%	-11,4%	-4,0%	-10,4%	-10,6%

**P1.2. Deformace**



Obrázek P1.2: Deformace simulace č.2

Tabulka P1.4: Deformace simulace č.3

Poloha		Deformace - Simulace č. 2 [mm]					
		Y					
		-140	-100	-50	50	100	140
X	-240	2,80	1,65	0,22	0,28	1,74	2,92
	-150	4,33	3,21	1,86	1,85	3,22	4,37
	-50	5,35	4,23	2,84	2,78	4,17	5,31
	50	5,40	4,27	2,87	2,76	4,13	5,27
	150	4,46	3,30	1,90	1,72	3,07	4,20
	240	2,99	1,77	0,25	0,00	1,45	2,62
Max. Simulace č. 2		5,40	4,27	2,87	2,78	4,17	5,31

Tabulka P1.5: Deformace – Rozdíl [mm] simulace č.2

Poloha		Rozdíl [mm] - Simulace č. 2 (Deformace)					
		Y					
		-140	-100	-50	50	100	140
X	-240	-1,04	-0,52	0,06	0,28	-0,27	-0,70
	-150	-1,36	-0,88	-0,31	-0,29	-0,82	-1,28
	-50	-1,57	-1,10	-0,55	-0,69	-1,29	-1,75
	50	-1,46	-1,03	-0,56	-0,86	-1,42	-1,90
	150	-1,07	-0,71	-0,30	-0,68	-1,21	-1,67
	240	-0,63	-0,28	0,09	-0,20	-0,76	-1,22

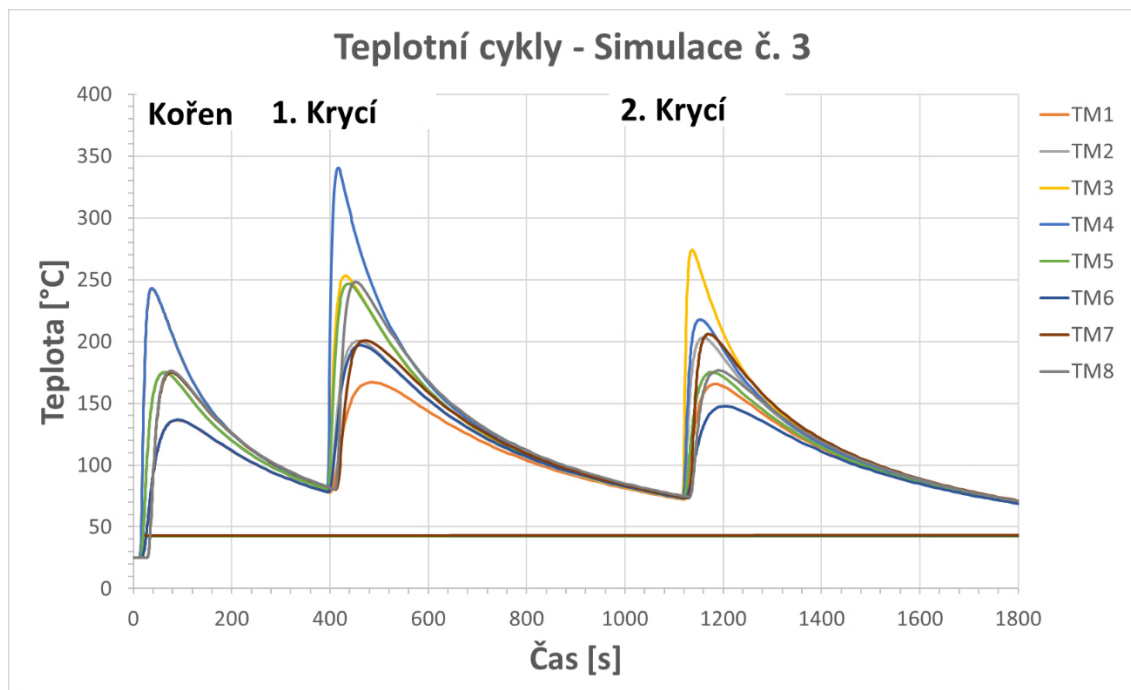


Tabulka P1.6: Deformace – Rozdíl [%] simulace č.2

Poloha		Rozdíl [%] - Simulace č. 2 (Deformace)					
		Y					
		-140	-100	-50	50	100	140
X	-240	-27,2%	-24,1%	35,4%	dělení 0	-13,4%	-19,3%
	-150	-23,9%	-21,4%	-14,2%	-13,7%	-20,2%	-22,6%
	-50	-22,7%	-20,6%	-16,3%	-19,9%	-23,6%	-24,8%
	50	-21,3%	-19,4%	-16,4%	-23,7%	-25,5%	-26,5%
	150	-19,3%	-17,7%	-13,5%	-28,4%	-28,3%	-28,4%
	240	-17,4%	-13,6%	52,0%	-100,0%	-34,2%	-31,8%
<b>Průměr. Rozdíl</b>		-21,9%	-19,5%	-15,1%	-21,4%	-24,2%	-25,6%

## Příloha 2 – Výsledky simulace č. 3

### P2.1. Teplotní cykly



Obrázek P2.1: Teplotní cykly simulace č.3

Tabulka P2.1: Teplotní cykly simulace č.3

	Teplotní cykly - Simulace č. 3 [°C]							
	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM6	TM7	TM8
Kořen min	25	25	25	25	25	25	25	25
Kořen max	136,5	174,9	242,4	242,8	175,1	136,7	174,9	176,2
1. Krycí min	72,8	73,1	73,2	73,7	73,9	73,9	74,8	75,6
1. Krycí max	166,9	200,2	253,1	340,4	246,6	197,0	200,8	248,0
2. Krycí min	72,2	72,6	72,7	73,2	73,3	73,1	73,4	74,1
2. Krycí max	165,3	203,0	274,1	217,6	175,0	147,7	206,1	176,6
Rozdíl Kořen	111,5	149,9	217,4	217,8	150,1	111,7	149,9	151,2
Rozdíl 1. Krycí	94,1	127,2	179,9	266,7	172,7	123,1	126,0	172,4
Rozdíl 2. krycí	93,1	130,5	201,3	144,4	101,8	74,5	132,7	102,5

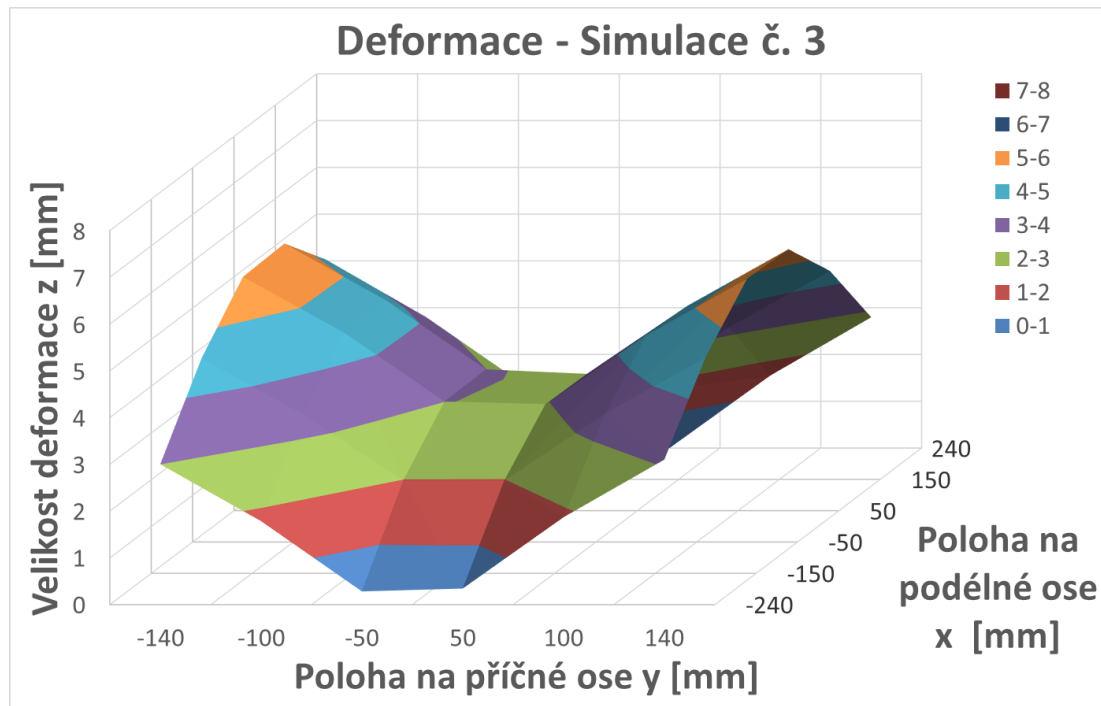
Tabulka P2.2: Teplotní cykly – Rozdíl [°C] simulace č.3

		Rozdíl [°C] - Simulace č. 3 (Teplotní cykly)						
		TM2	TM3	TM4	TM5	TM6	TM7	TM8
Kořen min		-0,7	-0,6	-0,5	-0,7	-0,5	-0,6	-1
Kořen max		-12,6	-18,8	-19,2	-14,0	-10,8	-3,5	-13,9
1. Krycí min		-21,2	-24,5	-23,9	-20,1	-17,2	-20,4	-21,4
1. Krycí max		-28,4	-35,4	-20,9	-17,6	-17,6	-22,1	-21,3
2. Krycí min		-33,8	-34,5	-34,6	-33,5	-34,5	-34,9	-38,2
2. Krycí max		-48,3	-51,5	-45,3	-40,3	-39,0	-35,1	-44,7
Rozdíl Kořen		-11,9	-18,2	-18,7	-13,3	-10,3	-2,9	-12,9
Rozdíl 1. Krycí		-7,1	-10,9	3,0	2,5	-0,4	-1,7	0,1
Rozdíl 2. krycí		-14,4	-17,1	-10,7	-6,7	-4,6	-0,2	-6,5

Tabulka P2.3: Teplotní cykly – Rozdíl [%] simulace č.3

		Rozdíl [%] - Simulace č. 3 (Teplotní cykly)							
		TM2	TM3	TM4	TM5	TM6	TM7	TM8	Průměr
Kořen min		-2,7%	-2,3%	-2,0%	-2,7%	-2,0%	-2,3%	-3,8%	-2,6%
Kořen max		-6,7%	-7,2%	-7,3%	-7,4%	-7,3%	-2,0%	-7,3%	-6,5%
1. Krycí min		-22,5%	-25,1%	-24,4%	-21,4%	-18,9%	-21,5%	-22,0%	-22,2%
1. Krycí max		-12,4%	-12,3%	-5,8%	-6,7%	-8,2%	-9,9%	-7,9%	-9,0%
2. Krycí min		-31,8%	-32,1%	-32,1%	-31,4%	-32,0%	-32,3%	-34,0%	-32,2%
2. Krycí max		-19,2%	-15,8%	-17,2%	-18,7%	-20,9%	-14,6%	-20,2%	-18,1%
Rozdíl Kořen		-7,4%	-7,7%	-7,9%	-8,1%	-8,5%	-1,9%	-7,9%	-7,1%
Rozdíl 1. Krycí		-5,3%	-5,7%	1,1%	1,5%	-0,4%	-1,3%	0,0%	-1,4%
Rozdíl 2. krycí		-10,0%	-7,8%	-6,9%	-6,2%	-5,8%	-0,2%	-6,0%	-6,1%

**P2.2. Deformace**



Obrázek P2.2: Deformace Simulace č.3

Tabulka P2.4: Deformace simulace č.3

Poloha		Deformace - Simulace č. 3 [mm]					
		Y					
		-140	-100	-50	50	100	140
X	-240	3,00	1,79	0,28	0,35	1,87	3,10
	-150	4,60	3,41	1,99	1,98	3,42	4,62
	-50	5,67	4,48	3,01	2,95	4,42	5,63
	50	5,71	4,51	3,02	2,93	4,38	5,59
	150	4,70	3,46	1,97	1,83	3,26	4,46
	240	3,14	1,85	0,22	0,00	1,55	2,80
Max. Simulace č. 3		5,71	4,51	3,02	2,95	4,42	5,63

Tabulka P2.5: Deformace – Rozdíl [mm] simulace č.3

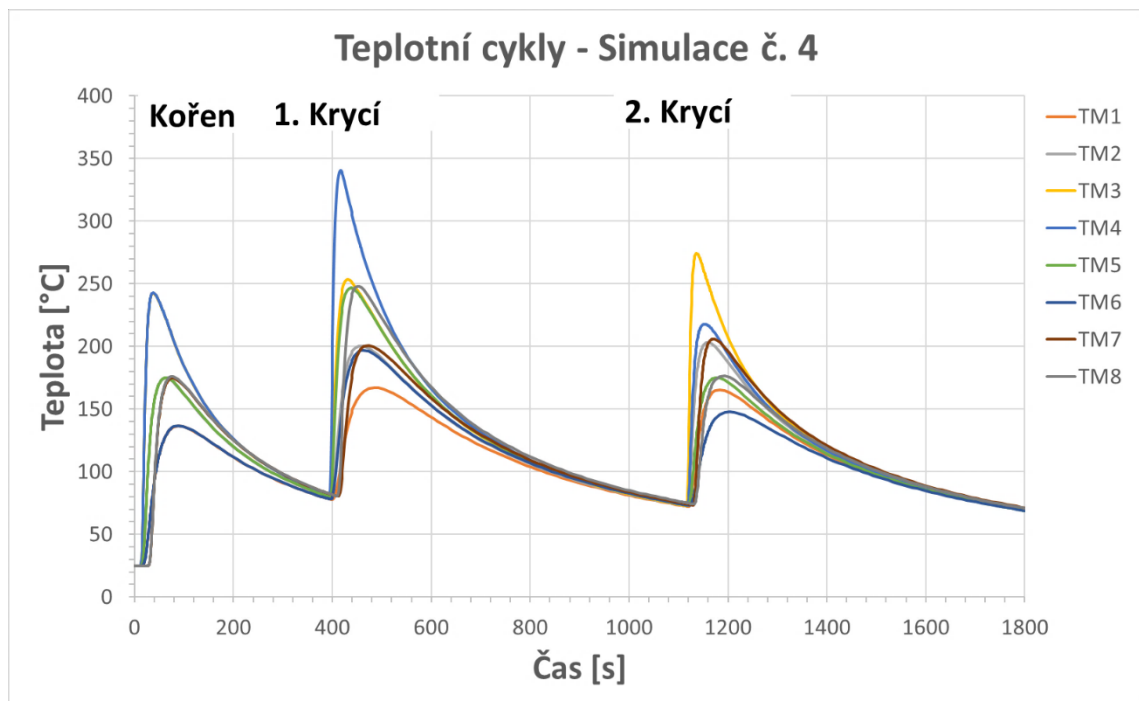
Poloha		Rozdíl [mm] - Simulace č. 3 (Deformace)					
		Y					
		-140	-100	-50	50	100	140
X	-240	-0,84	-0,39	0,12	0,35	-0,14	-0,51
	-150	-1,09	-0,67	-0,18	-0,16	-0,61	-1,02
	-50	-1,25	-0,84	-0,39	-0,52	-1,03	-1,44
	50	-1,14	-0,79	-0,41	-0,69	-1,17	-1,58
	150	-0,82	-0,54	-0,23	-0,57	-1,02	-1,40
	240	-0,47	-0,21	0,06	-0,20	-0,66	-1,05

Tabulka P2.6: Deformace – Rozdíl [%] simulace č.

Poloha		Rozdíl [%] - Simulace č. 3 (Deformace)					
		Y					
		-140	-100	-50	50	100	140
X	-240	-22,0%	-17,8%	73,0%	dělení 0	-7,0%	-14,2%
	-150	-19,1%	-16,4%	-8,2%	-7,6%	-15,2%	-18,0%
	-50	-18,0%	-15,9%	-11,4%	-14,9%	-19,0%	-20,3%
	50	-16,7%	-14,9%	-12,0%	-19,0%	-21,0%	-22,0%
	150	-14,9%	-13,6%	-10,2%	-23,8%	-23,8%	-24,0%
	240	-13,1%	-10,1%	33,5%	-100,0%	-29,8%	-27,3%
Průměr. Rozdíl		-17,3%	-14,8%	-10,5%	-16,3%	-19,3%	-21,0%

## Příloha 3 – Výsledky simulace č. 4

### P3.1. Teplotní cykly



Obrázek P3.1: Teplotní cykly simulace č.4

Tabulka P3.1: Teplotní cykly simulace č.4

	Teplotní cykly - Simulace č. 4 [°C]							
	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM6	TM7	TM8
Kořen min	25	25	25	25	25	25	25	25
Kořen max	136,5	174,8	242,4	242,8	175,1	136,6	174,8	176,2
1. Krycí min	72,8	73,1	73,2	73,7	73,9	73,9	74,8	75,6
1. Krycí max	167,0	200,3	253,4	340,5	246,6	197,0	200,7	248,0
2. Krycí min	72,2	72,6	72,7	73,2	73,3	73,2	73,4	74,1
2. Krycí max	165,5	203,1	274,3	217,7	175,1	147,8	206,0	176,5
Rozdíl Kořen	111,5	149,8	217,4	217,8	150,1	111,6	149,8	151,2
Rozdíl 1. Krycí	94,2	127,2	180,2	266,7	172,7	123,1	126,0	172,4
Rozdíl 2. krycí	93,3	130,5	201,5	144,5	101,8	74,7	132,7	102,4

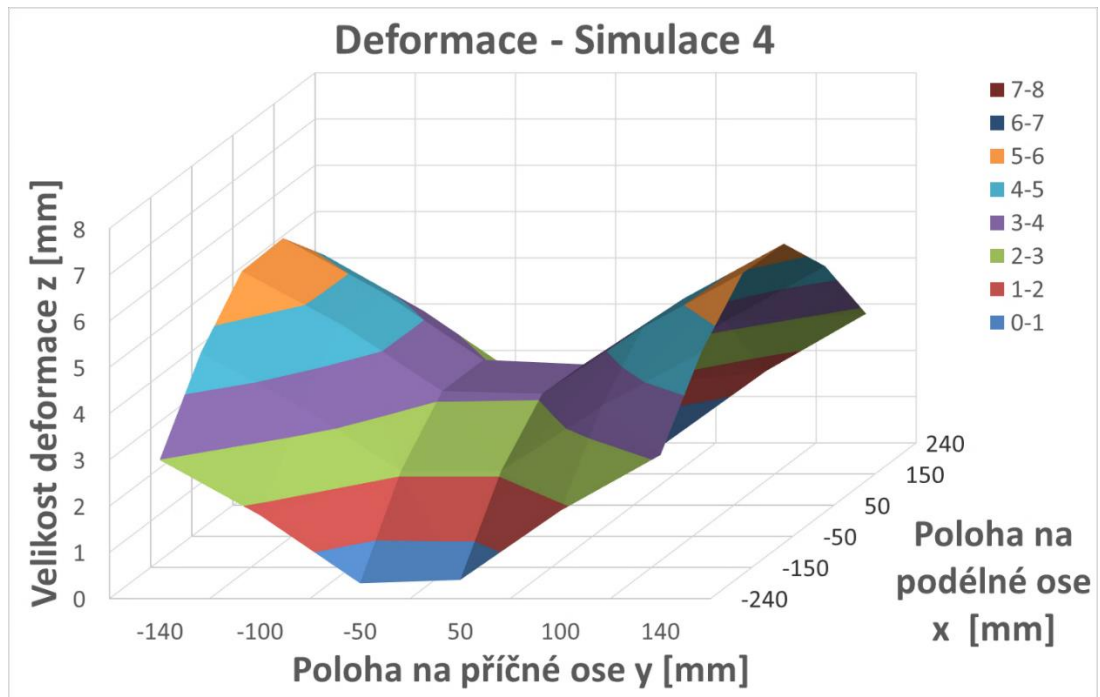
Tabulka P3.2: Teplotní cykly – Rozdíl [°C] simulace č.4

		Rozdíl [°C] - Simulace č. 4 (Teplotní cykly)						
		TM2	TM3	TM4	TM5	TM6	TM7	TM8
Kořen min		-0,7	-0,6	-0,5	-0,7	-0,5	-0,6	-1
Kořen max		-12,7	-18,8	-19,2	-14,0	-10,9	-3,6	-13,9
1. Krycí min		-21,2	-24,5	-23,9	-20,1	-17,2	-20,4	-21,4
1. Krycí max		-28,3	-35,1	-20,8	-17,6	-17,6	-22,2	-21,3
2. Krycí min		-33,8	-34,5	-34,6	-33,5	-34,4	-34,9	-38,2
2. Krycí max		-48,2	-51,3	-45,2	-40,2	-38,9	-35,2	-44,8
Rozdíl Kořen		-12,0	-18,2	-18,7	-13,3	-10,4	-3,0	-12,9
Rozdíl 1. Krycí		-7,1	-10,6	3,0	2,5	-0,4	-1,7	0,1
Rozdíl 2. krycí		-14,4	-16,9	-10,6	-6,7	-4,4	-0,2	-6,6

Tabulka P3.3: Teplotní cykly – Rozdíl [%] simulace č.4

		Rozdíl [%] - Simulace č. 4 (Teplotní cykly)							
		TM2	TM3	TM4	TM5	TM6	TM7	TM8	Průměr
Kořen min		-2,7%	-2,3%	-2,0%	-2,7%	-2,0%	-2,3%	-3,8%	-2,6%
Kořen max		-6,8%	-7,2%	-7,3%	-7,4%	-7,4%	-2,0%	-7,3%	-6,5%
1. Krycí min		-22,5%	-25,1%	-24,4%	-21,4%	-18,8%	-21,5%	-22,0%	-22,2%
1. Krycí max		-12,4%	-12,2%	-5,8%	-6,6%	-8,2%	-9,9%	-7,9%	-9,0%
2. Krycí min		-31,8%	-32,1%	-32,1%	-31,4%	-32,0%	-32,3%	-34,0%	-32,2%
2. Krycí max		-19,2%	-15,8%	-17,2%	-18,7%	-20,8%	-14,6%	-20,3%	-18,1%
Rozdíl Kořen		-7,4%	-7,7%	-7,9%	-8,2%	-8,5%	-1,9%	-7,9%	-7,1%
Rozdíl 1. Krycí		-5,3%	-5,6%	1,1%	1,5%	-0,3%	-1,4%	0,0%	-1,4%
Rozdíl 2. krycí		-9,9%	-7,7%	-6,8%	-6,2%	-5,6%	-0,2%	-6,1%	-6,1%

### P3.2. Deformace



Obrázek P3.2: Deformace simulace č.4

Tabulka P3.4: Deformace simulace č.4

Poloha		Deformace - Simulace č. 4 [mm]					
		Y					
		-140	-100	-50	50	100	140
X	-240	3,00	1,80	0,33	0,40	1,90	3,10
	-150	4,64	3,48	2,09	2,09	3,50	4,67
	-50	5,73	4,57	3,14	3,09	4,51	5,69
	50	5,77	4,59	3,14	3,04	4,47	5,65
	150	4,74	3,52	2,05	1,89	3,31	4,49
	240	3,14	1,85	0,24	0,00	1,55	2,79
Max. Simulace č. 4		5,77	4,59	3,14	3,09	4,51	5,69

Tabulka P3.5: Deformace – Rozdíl [mm] simulace č.4

Poloha		Rozdíl [mm] - Simulace č. 4 (Deformace)					
		Y					
		-140	-100	-50	50	100	140
X	-240	-0,85	-0,37	0,17	0,40	-0,11	-0,51
	-150	-1,05	-0,60	-0,07	-0,05	-0,54	-0,98
	-50	-1,18	-0,75	-0,25	-0,38	-0,94	-1,37
	50	-1,08	-0,70	-0,29	-0,57	-1,08	-1,51
	150	-0,79	-0,49	-0,15	-0,51	-0,97	-1,37
	240	-0,48	-0,20	0,07	-0,20	-0,66	-1,05

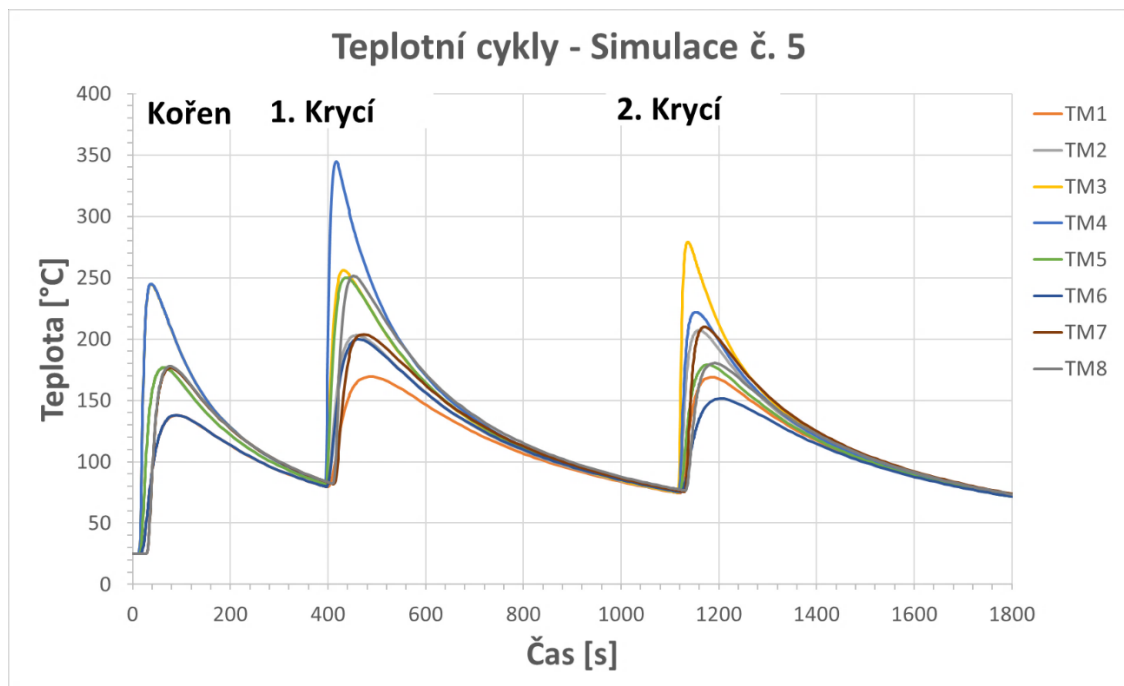


Tabulka P3.6: Deformace – Rozdíl [%] simulace č.4

Poloha		Rozdíl [%] - Simulace č. 4 (Deformace)						
		Y						
		-140	-100	-50	50	100	140	
X	-240	-22,2%	-17,0%	100,9%	dělení 0	-5,6%	-14,2%	
	-150	-18,4%	-14,8%	-3,3%	-2,3%	-13,5%	-17,3%	
	-50	-17,1%	-14,2%	-7,5%	-11,0%	-17,3%	-19,4%	
	50	-15,8%	-13,3%	-8,5%	-15,7%	-19,5%	-21,1%	
	150	-14,2%	-12,2%	-6,7%	-21,2%	-22,7%	-23,3%	
		240	-13,2%	-9,7%	43,0%	-100,0%	-29,8%	-27,4%
Průměr. Rozdíl			-16,8%	-13,5%	-6,5%	-12,6%	-18,1%	-20,5%

## Příloha 4 – Výsledky simulace č. 5

### P4.1. Teplotní cykly



Obrázek P4.1: Teplotní cykly simulace č.5

Tabulka P4.1: Teplotní cykly simulace č.5

	Teplotní cykly - Simulace č. 5 [°C]							
	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM6	TM7	TM8
Kořen min	25	25	25	25	25	25	25	25
Kořen max	138,0	176,5	244,6	245,0	176,8	138,1	176,6	177,9
1. Krycí min	75,1	75,4	75,5	76,0	76,2	76,2	77,2	78,1
1. Krycí max	169,4	202,9	255,9	344,7	250,0	199,9	203,8	251,3
2. Krycí min	74,4	74,8	75,0	75,5	75,6	75,4	75,7	76,5
2. Krycí max	169,1	207,1	279,0	221,9	178,8	151,4	209,9	180,4
Rozdíl Kořen	113,0	151,5	219,6	220,0	151,8	113,1	151,6	152,9
Rozdíl 1. Krycí	94,3	127,6	180,5	268,7	173,8	123,7	126,7	173,2
Rozdíl 2. krycí	94,7	132,3	204,1	146,5	103,2	75,9	134,2	103,9

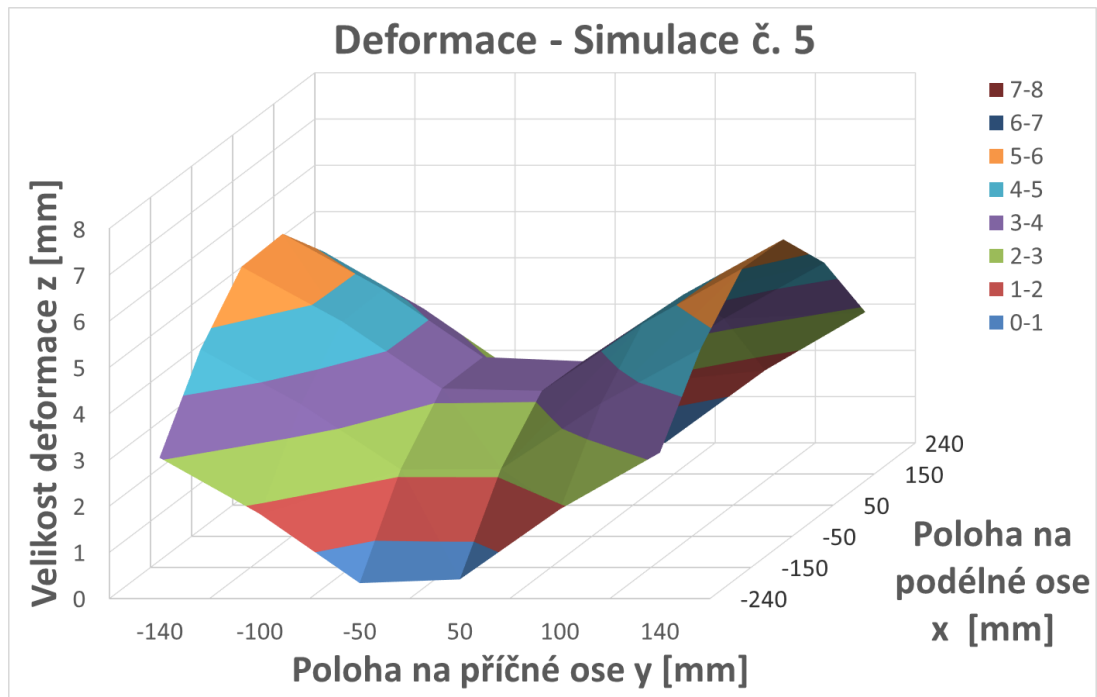
Tabulka P4.2: Teplotní cykly – Rozdíl [°C] simulace č.5

Rozdíl [°C] - Simulace č. 5 (Teplotní cykly)							
	TM2	TM3	TM4	TM5	TM6	TM7	TM8
Kořen min	-0,7	-0,6	-0,5	-0,7	-0,5	-0,6	-1
Kořen max	-11,0	-16,6	-17,0	-12,3	-9,4	-1,8	-12,2
1. Krycí min	-18,9	-22,2	-21,6	-17,8	-14,9	-18,0	-18,9
1. Krycí max	-25,7	-32,6	-16,6	-14,2	-14,7	-19,1	-18,0
2. Krycí min	-31,6	-32,2	-32,3	-31,2	-32,2	-32,6	-35,8
2. Krycí max	-44,2	-46,6	-41,0	-36,5	-35,3	-31,3	-40,9
Rozdíl Kořen	-10,3	-16,0	-16,5	-11,6	-8,9	-1,2	-11,2
Rozdíl 1. Krycí	-6,7	-10,3	5,0	3,6	0,2	-1,0	0,9
Rozdíl 2. krycí	-12,6	-14,3	-8,6	-5,3	-3,2	1,3	-5,1

Tabulka P4.3: Teplotní cykly – Rozdíl [%] simulace č.5

Rozdíl [%] - Simulace č. 5 (Teplotní cykly)								
	TM2	TM3	TM4	TM5	TM6	TM7	TM8	Průměr
Kořen min	-2,7%	-2,3%	-2,0%	-2,7%	-2,0%	-2,3%	-3,8%	-2,6%
Kořen max	-5,9%	-6,4%	-6,5%	-6,5%	-6,4%	-1,0%	-6,4%	-5,6%
1. Krycí min	-20,1%	-22,7%	-22,1%	-18,9%	-16,3%	-19,0%	-19,5%	-19,8%
1. Krycí max	-11,2%	-11,3%	-4,6%	-5,4%	-6,8%	-8,6%	-6,7%	-7,8%
2. Krycí min	-29,7%	-30,0%	-30,0%	-29,2%	-29,9%	-30,1%	-31,9%	-30,1%
2. Krycí max	-17,6%	-14,3%	-15,6%	-17,0%	-18,9%	-13,0%	-18,5%	-16,4%
Rozdíl Kořen	-6,3%	-6,8%	-7,0%	-7,1%	-7,3%	-0,8%	-6,8%	-6,0%
Rozdíl 1. Krycí	-5,0%	-5,4%	1,9%	2,1%	0,1%	-0,8%	0,5%	-0,9%
Rozdíl 2. krycí	-8,7%	-6,6%	-5,6%	-4,9%	-4,0%	1,0%	-4,7%	-4,8%

**P4.2. Deformace**



Obrázek P4.2: Deformace simulace č.5

Tabulka P4.4: Deformace simulace č.5

Poloha		Deformace - Simulace č. 5 [mm]					
		Y					
		-140	-100	-50	50	100	140
X	-240	3,04	1,83	0,33	0,41	1,93	3,15
	-150	4,72	3,54	2,12	2,13	3,55	4,74
	-50	5,83	4,65	3,20	3,15	4,59	5,79
	50	5,87	4,67	3,20	3,11	4,55	5,75
	150	4,81	3,57	2,09	1,93	3,36	4,57
	240	3,16	1,86	0,23	0,00	1,57	2,83
Max. Simulace č. 5		5,87	4,67	3,20	3,15	4,59	5,79

Tabulka P4.5: Deformace – Rozdíl [mm] simulace č.5

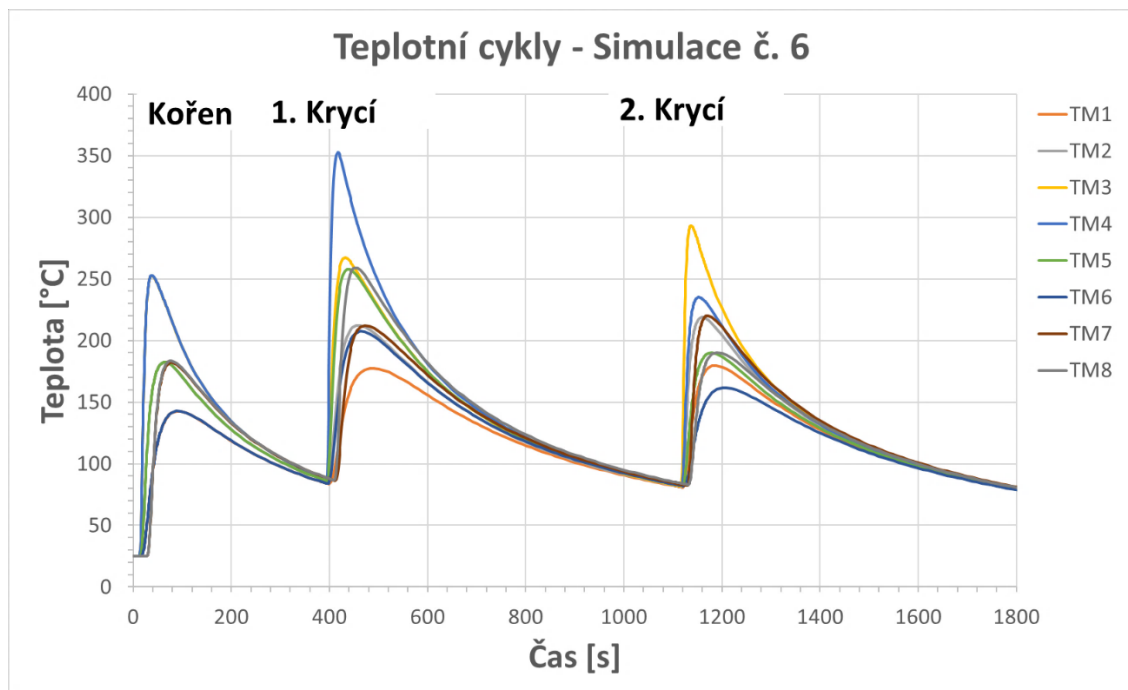
Poloha		Rozdíl [mm] - Simulace č. 5 (Deformace)					
		Y					
		-140	-100	-50	50	100	140
X	-240	-0,80	-0,34	0,17	0,41	-0,08	-0,46
	-150	-0,97	-0,54	-0,04	-0,01	-0,48	-0,90
	-50	-1,09	-0,68	-0,20	-0,32	-0,86	-1,28
	50	-0,99	-0,63	-0,23	-0,50	-1,00	-1,42
	150	-0,72	-0,43	-0,11	-0,47	-0,91	-1,30
	240	-0,45	-0,19	0,06	-0,20	-0,64	-1,02

Tabulka P4.6: Deformace – Rozdíl [%] simulace č.5

Poloha		Rozdíl [%] - Simulace č. 5 (Deformace)					
		Y					
		-140	-100	-50	50	100	140
X	-240	-20,9%	-15,7%	103,5%	dělení 0	-4,0%	-12,8%
	-150	-17,1%	-13,3%	-1,8%	-0,6%	-12,0%	-16,0%
	-50	-15,7%	-12,7%	-5,8%	-9,2%	-15,8%	-18,1%
	50	-14,4%	-11,8%	-6,7%	-13,9%	-18,0%	-19,8%
	150	-13,0%	-10,8%	-4,9%	-19,5%	-21,4%	-22,1%
	240	-12,5%	-9,2%	37,3%	-100,0%	-28,9%	-26,5%
Průměr. Rozdíl		-15,6%	-12,3%	-4,8%	-10,8%	-16,7%	-19,2%

## Příloha 5 – Výsledky simulace č. 6

### P5.1. Teplotní cykly



Obrázek P5.1: Teplotní cykly simulace č.6

Tabulka P5.1: Teplotní cykly simulace č.6

	Teplotní cykly - Simulace č. 6 [°C]							
	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM6	TM7	TM8
Kořen min	25	25	25	25	25	25	25	25
Kořen max	142,6	182,2	252,4	252,7	182,4	142,8	182,3	183,6
1. Krycí min	81,5	81,9	82,1	82,7	82,9	82,8	83,7	84,7
1. Krycí max	177,5	212,1	267,1	352,4	257,7	207,3	212,1	259,0
2. Krycí min	80,8	81,3	81,6	82,1	82,2	82,0	82,1	83,0
2. Krycí max	179,5	218,8	293,3	235,0	190,0	161,6	220,2	190,3
Rozdíl Kořen	117,6	157,2	227,4	227,7	157,4	117,8	157,3	158,6
Rozdíl 1. Krycí	96,0	130,2	185,0	269,7	174,9	124,5	128,4	174,3
Rozdíl 2. krycí	98,7	137,5	211,7	152,9	107,9	79,6	138,0	107,3

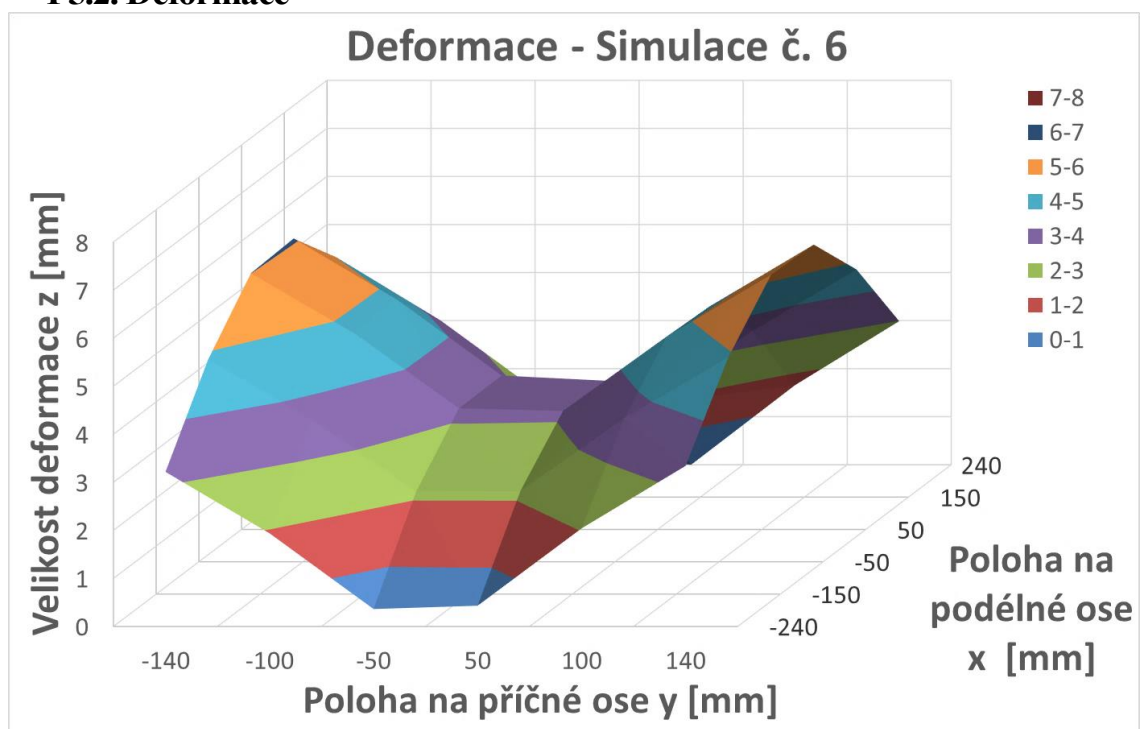
Tabulka P5.2: Teplotní cykly – Rozdíl [°C] simulace č.6

		Rozdíl [°C] - Simulace č. 6 (Teplotní cykly)						
		TM2	TM3	TM4	TM5	TM6	TM7	TM8
Kořen min		-0,7	-0,6	-0,5	-0,7	-0,5	-0,6	-1
Kořen max		-5,3	-8,8	-9,3	-6,7	-4,7	3,9	-6,5
1. Krycí min		-12,4	-15,6	-14,9	-11,1	-8,3	-11,5	-12,3
1. Krycí max		-16,5	-21,4	-8,9	-6,5	-7,3	-10,8	-10,3
2. Krycí min		-25,1	-25,6	-25,7	-24,6	-25,6	-26,2	-29,3
2. Krycí max		-32,5	-32,3	-27,9	-25,3	-25,1	-21,0	-31,0
Rozdíl Kořen		-4,6	-8,2	-8,8	-6,0	-4,2	4,5	-5,5
Rozdíl 1. Krycí		-4,1	-5,8	6,0	4,7	1,0	0,7	2,0
Rozdíl 2. krycí		-7,4	-6,7	-2,2	-0,6	0,5	5,1	-1,7

Tabulka P5.3: Teplotní cykly – Rozdíl [%] simulace č.6

		Rozdíl [%] - Simulace č. 6 (Teplotní cykly)							
		TM2	TM3	TM4	TM5	TM6	TM7	TM8	Průměr
Kořen min		-2,7%	-2,3%	-2,0%	-2,7%	-2,0%	-2,3%	-3,8%	-2,6%
Kořen max		-2,8%	-3,4%	-3,5%	-3,5%	-3,2%	2,2%	-3,4%	-2,5%
1. Krycí min		-13,2%	-16,0%	-15,3%	-11,9%	-9,1%	-12,1%	-12,7%	-12,9%
1. Krycí max		-7,2%	-7,4%	-2,5%	-2,5%	-3,4%	-4,9%	-3,8%	-4,5%
2. Krycí min		-23,6%	-23,9%	-23,8%	-23,1%	-23,8%	-24,1%	-26,1%	-24,1%
2. Krycí max		-12,9%	-9,9%	-10,6%	-11,7%	-13,4%	-8,7%	-14,0%	-11,6%
Rozdíl Kořen		-2,8%	-3,5%	-3,7%	-3,7%	-3,5%	2,9%	-3,3%	-2,5%
Rozdíl 1. Krycí		-3,0%	-3,0%	2,3%	2,7%	0,8%	0,5%	1,2%	0,2%
Rozdíl 2. krycí		-5,1%	-3,1%	-1,4%	-0,6%	0,7%	3,8%	-1,6%	-1,0%

### P5.2. Deformace



Obrázek P5.2: Deformace Simulace č.6

Tabulka P5.4: Deformace simulace č.6

Poloha		Deformace - Simulace č. 6 [mm]					
		Y					
		-140	-100	-50	50	100	140
X	-240	3,22	1,94	0,36	0,43	2,04	3,34
	-150	4,89	3,64	2,14	2,14	3,67	4,93
	-50	6,00	4,75	3,19	3,14	4,69	5,97
	50	6,05	4,77	3,20	3,09	4,64	5,93
	150	4,99	3,68	2,10	1,93	3,46	4,74
	240	3,33	1,95	0,22	0,00	1,66	2,99
Max. Simulace č. 6		6,05	4,77	3,20	3,14	4,69	5,97

Tabulka P5.5: Deformace – Rozdíl [mm] simulace č.6

Poloha		Rozdíl [mm] - Simulace č. 6 (Deformace)					
		Y					
		-140	-100	-50	50	100	140
X	-240	-0,63	-0,23	0,20	0,43	0,03	-0,27
	-150	-0,80	-0,45	-0,03	0,00	-0,37	-0,71
	-50	-0,91	-0,58	-0,20	-0,33	-0,76	-1,09
	50	-0,80	-0,52	-0,23	-0,52	-0,90	-1,24
	150	-0,53	-0,33	-0,09	-0,47	-0,82	-1,12
	240	-0,28	-0,10	0,06	-0,20	-0,55	-0,86

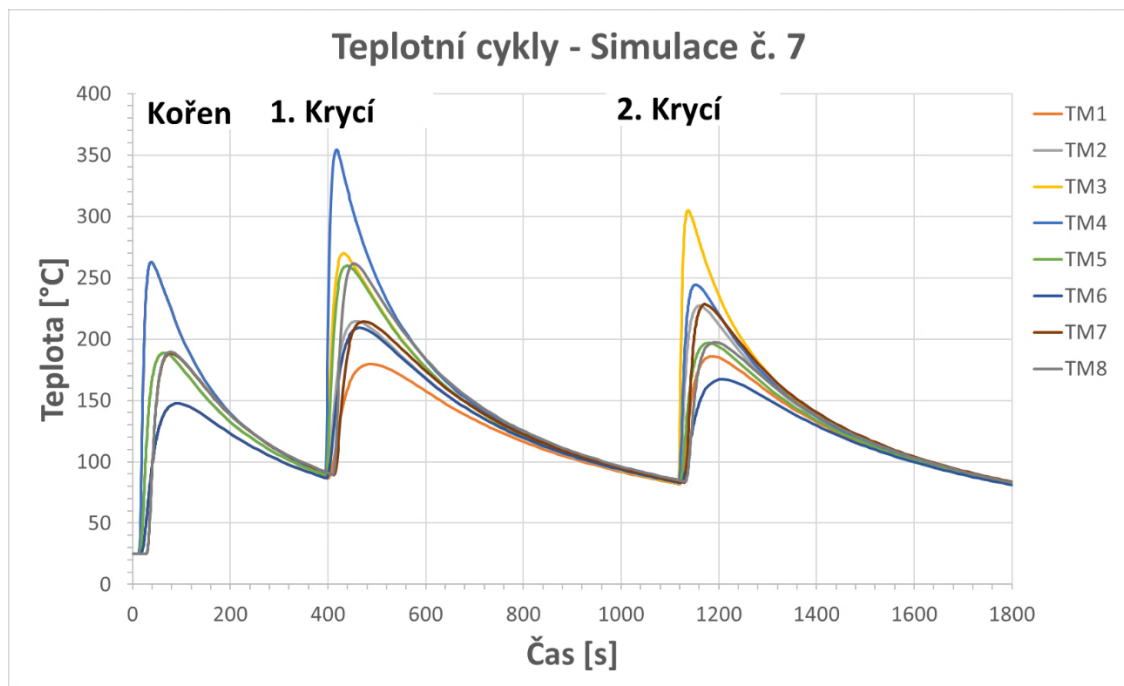


Tabulka P5.6: Deformace – Rozdíl [%] simulace č.6

Poloha		Rozdíl [%] - Simulace č. 6 (Deformace)					
		Y					
		-140	-100	-50	50	100	140
X	-240	-16,4%	-10,8%	121,3%	dělení 0	1,6%	-7,5%
	-150	-14,1%	-10,9%	-1,2%	0,1%	-9,2%	-12,6%
	-50	-13,2%	-10,9%	-5,9%	-9,4%	-13,9%	-15,5%
	50	-11,7%	-9,9%	-6,7%	-14,3%	-16,3%	-17,3%
	150	-9,6%	-8,1%	-4,3%	-19,6%	-19,2%	-19,2%
	240	-7,9%	-4,8%	34,9%	-100,0%	-25,0%	-22,3%
<b>Průměr. Rozdíl</b>		-12,1%	-9,2%	-4,5%	-10,8%	-13,7%	-15,7%

## Příloha 6 – Výsledky simulace č. 7

### P6.1. Teplotní cykly



Obrázek P6.1: Teplotní cykly simulace č.7

Tabulka P6.1: Teplotní cykly simulace č.7

	Teplotní cykly - Simulace č. 7 [°C]							
	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM6	TM7	TM8
Kořen min	25	25	25	25	25	25	25	25
Kořen max	147,5	188,6	262,5	262,8	188,8	147,6	188,7	189,8
1. Krycí min	82,5	82,9	83,1	83,7	83,8	83,8	84,7	85,7
1. Krycí max	179,6	214,4	269,7	354,1	259,7	209,3	214,4	261,3
2. Krycí min	81,8	82,3	82,5	83,1	83,1	82,9	83,1	84,0
2. Krycí max	185,8	227,1	304,9	244,3	196,9	167,2	228,3	197,3
Rozdíl Kořen	122,5	163,6	237,5	237,8	163,8	122,6	163,7	164,8
Rozdíl 1. Krycí	97,1	131,6	186,6	270,4	175,8	125,5	129,7	175,6
Rozdíl 2. krycí	104,0	144,8	222,4	161,3	113,8	84,3	145,2	113,3

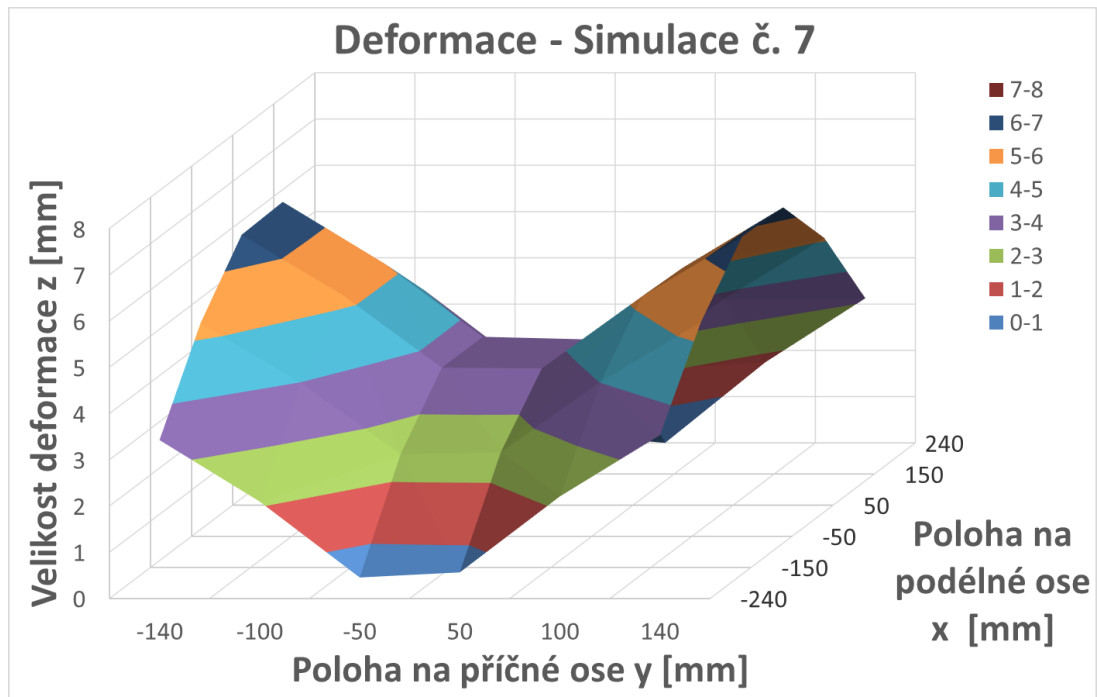
Tabulka P6.2: Teplotní cykly – Rozdíl [°C] simulace č.7

		Rozdíl [°C] - Simulace č. 7 (Teplotní cykly)						
		TM2	TM3	TM4	TM5	TM6	TM7	TM8
Kořen min		-0,7	-0,6	-0,5	-0,7	-0,5	-0,6	-1
Kořen max		1,1	1,3	0,8	-0,3	0,1	10,3	-0,3
1. Krycí min		-11,4	-14,6	-13,9	-10,2	-7,3	-10,5	-11,3
1. Krycí max		-14,2	-18,8	-7,2	-4,5	-5,3	-8,5	-8,0
2. Krycí min		-24,1	-24,7	-24,7	-23,7	-24,7	-25,2	-28,3
2. Krycí max		-24,2	-20,7	-18,6	-18,4	-19,5	-12,9	-24,0
Rozdíl Kořen		1,8	1,9	1,3	0,4	0,6	10,9	0,7
Rozdíl 1. Krycí		-2,7	-4,2	6,7	5,6	2,0	2,0	3,3
Rozdíl 2. krycí		-0,1	4,0	6,2	5,3	5,2	12,3	4,3

Tabulka P6.3: Teplotní cykly – Rozdíl [%] simulace č.7

		Rozdíl [%] - Simulace č. 7 (Teplotní cykly)							
		TM2	TM3	TM4	TM5	TM6	TM7	TM8	Průměr
Kořen min		-2,7%	-2,3%	-2,0%	-2,7%	-2,0%	-2,3%	-3,8%	-2,6%
Kořen max		0,6%	0,5%	0,3%	-0,2%	0,1%	5,8%	-0,2%	1,0%
1. Krycí min		-12,1%	-15,0%	-14,2%	-10,8%	-8,0%	-11,0%	-11,6%	-11,8%
1. Krycí max		-6,2%	-6,5%	-2,0%	-1,7%	-2,5%	-3,8%	-3,0%	-3,7%
2. Krycí min		-22,7%	-23,0%	-22,9%	-22,2%	-22,9%	-23,2%	-25,2%	-23,2%
2. Krycí max		-9,6%	-6,4%	-7,1%	-8,6%	-10,4%	-5,4%	-10,8%	-8,3%
Rozdíl Kořen		1,1%	0,8%	0,6%	0,2%	0,5%	7,2%	0,4%	1,5%
Rozdíl 1. Krycí		-2,0%	-2,2%	2,5%	3,3%	1,6%	1,5%	1,9%	1,0%
Rozdíl 2. krycí		-0,1%	1,8%	4,0%	4,8%	6,6%	9,2%	4,0%	4,3%

**P6.2. Deformace**



Obrázek P6.2: Deformace simulace č.7

Tabulka P6.4: Deformace simulace č.7

Poloha		Deformace - Simulace č. 7 [mm]					
		Y					
		-140	-100	-50	50	100	140
X	-240	3,43	2,10	0,46	0,57	2,21	3,53
	-150	5,28	4,00	2,45	2,49	4,03	5,31
	-50	6,52	5,23	3,64	3,63	5,19	6,48
	50	6,56	5,24	3,64	3,59	5,14	6,44
	150	5,34	3,98	2,34	2,23	3,79	5,10
	240	3,46	2,02	0,19	0,00	1,74	3,12
Max. Simulace č. 7		6,56	5,24	3,64	3,63	5,19	6,48

Tabulka P6.5: Deformace – Rozdíl [mm] simulace č.7

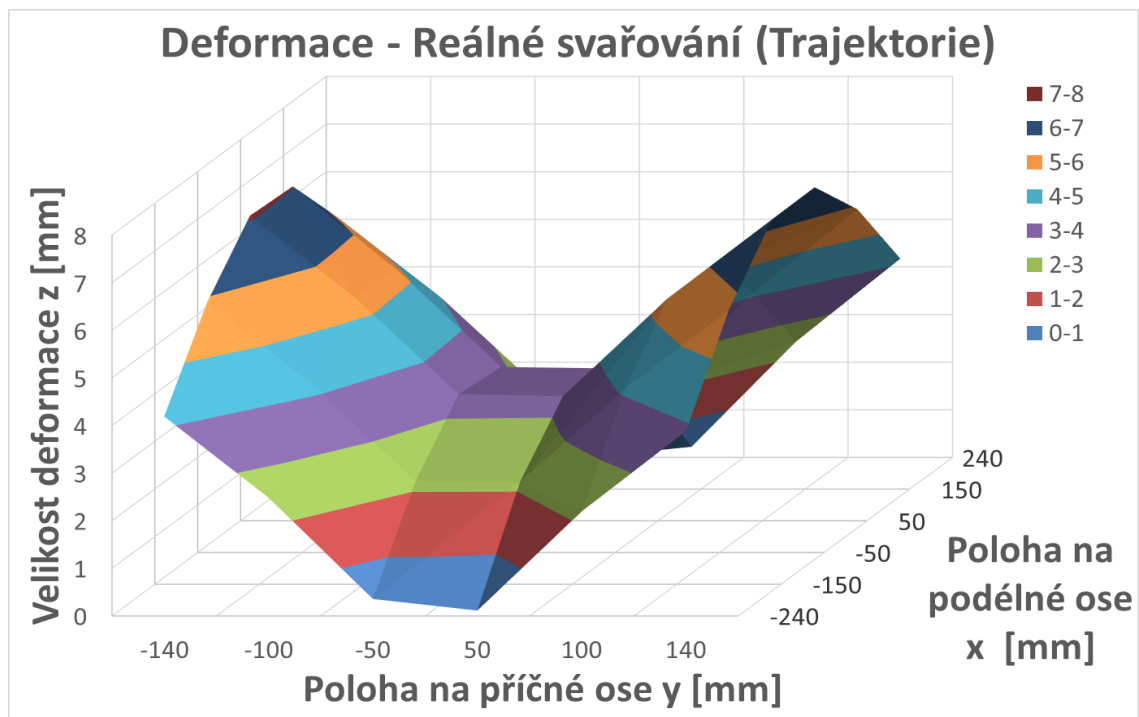
Poloha		Rozdíl [mm] - Simulace č. 7 (Deformace)					
		Y					
		-140	-100	-50	50	100	140
X	-240	-0,42	-0,07	0,29	0,57	0,20	-0,08
	-150	-0,41	-0,09	0,29	0,35	-0,01	-0,34
	-50	-0,40	-0,10	0,25	0,16	-0,27	-0,59
	50	-0,30	-0,05	0,21	-0,03	-0,41	-0,73
	150	-0,18	-0,02	0,15	-0,17	-0,49	-0,76
	240	-0,15	-0,04	0,02	-0,20	-0,47	-0,72

Tabulka P6.6: Deformace – Rozdíl [%] simulace č.7

Poloha		Rozdíl [%] - Simulace č. 7 (Deformace)					
		Y					
		-140	-100	-50	50	100	140
X	-240	-11,0%	-3,4%	177,7%	dělení 0	9,9%	-2,3%
	-150	-7,1%	-2,2%	13,3%	16,4%	-0,3%	-5,9%
	-50	-5,7%	-1,8%	7,4%	4,7%	-4,9%	-8,3%
	50	-4,4%	-1,0%	6,0%	-0,7%	-7,4%	-10,2%
	150	-3,2%	-0,6%	6,7%	-7,1%	-11,4%	-12,9%
	240	-4,2%	-1,8%	13,9%	-100,0%	-21,2%	-18,7%
<b>Průměr. Rozdíl</b>		-5,9%	-1,8%	8,4%	3,3%	-5,9%	-9,7%

## Příloha 7 – Změna trajektorie svařování

### P7.1. Reálné svařování



Obrázek P7.1: Deformace – Reálné svařování (Trajektorie)

Tabulka P7.1: Deformace – Reálné svařování (Trajektorie)

Poloha		Deformace - Reálné svařování (Trajektorie) [mm]					
		Y					
Poloha		-140	-100	-50	50	100	140
X	-240	4,19	2,48	0,36	0,11	2,19	3,88
	-150	5,91	4,22	2,17	2,16	4,10	5,76
	-50	7,07	5,37	3,33	3,28	5,33	6,99
	50	7,02	5,27	3,23	3,20	5,29	7,00
	150	5,74	4,04	2,03	2,04	4,13	5,88
	240	3,88	2,15	0,00	0,22	2,43	4,17
Max.		7,07	5,37	3,33	3,28	5,33	7,00

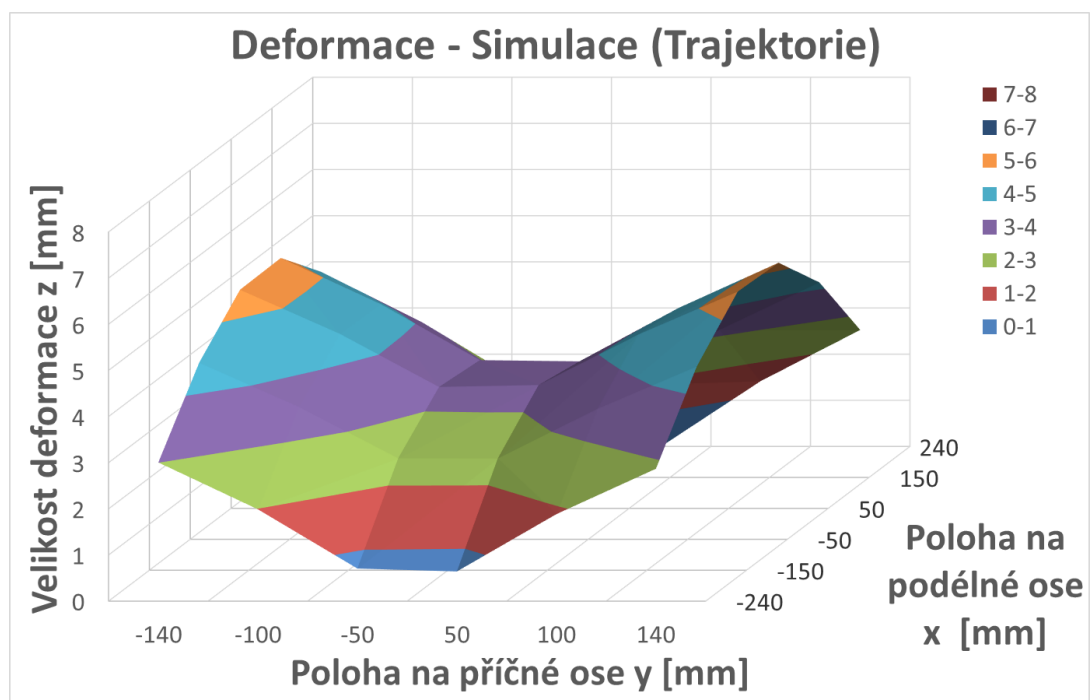
Tabulka P7.2: Deformace – Rozdíl [mm] Reálné svařování (Trajektorie)

Poloha		Rozdíl [mm] - Reálné svařování (Trajektorie) (Deformace)					
		Y					
Poloha		-140	-100	-50	50	100	140
X	-240	0,34	0,31	0,19	0,11	0,19	0,27
	-150	0,23	0,14	0,01	0,02	0,06	0,12
	-50	0,16	0,04	-0,07	-0,18	-0,12	-0,07
	50	0,17	-0,03	-0,20	-0,41	-0,25	-0,16
	150	0,22	0,04	-0,17	-0,36	-0,15	0,01
	240	0,27	0,09	-0,17	0,02	0,22	0,33

Tabulka P7.3: Deformace – Rozdíl [%] Reálné svařování (Trajektorie)

Poloha		Rozdíl [%] - Reálné svařování (Trajektorie) (Deformace)					
		Y					
		-140	-100	-50	50	100	140
X	-240	8,8%	14,2%	117,0%	dělení 0	9,2%	7,4%
	-150	4,0%	3,4%	0,5%	0,8%	1,5%	2,2%
	-50	2,3%	0,8%	-2,0%	-5,3%	-2,2%	-1,1%
	50	2,4%	-0,6%	-5,9%	-11,4%	-4,6%	-2,3%
	150	3,9%	0,9%	-7,6%	-15,0%	-3,4%	0,2%
	240	7,4%	4,6%	-100,0%	12,5%	10,0%	8,5%
Průměr. Rozdíl		4,8%	3,9%	-3,7%	-7,7%	1,7%	2,5%

## P7.2. Simulace



Obrázek P7.2: Deformace – Reálné svařování (Trajektorie)

Tabulka P7.4: Deformace – Simulace (Trajektorie)

Poloha		Deformace - Simulace (Trajektorie) [mm]					
		Y					
		-140	-100	-50	50	100	140
X	-240	3,00	1,99	0,71	0,64	1,89	2,87
	-150	4,50	3,55	2,43	2,42	3,50	4,42
	-50	5,41	4,46	3,30	3,34	4,43	5,37
	50	5,43	4,43	3,21	3,18	4,35	5,32
	150	4,45	3,37	2,08	1,99	3,20	4,23
	240	2,84	1,66	0,15	0,00	1,42	2,52
Max.		5,43	4,46	3,30	3,34	4,43	5,37

Tabulka P7.5: Deformace – Rozdíl [mm] Simulace (Trajektorie)

Poloha		Rozdíl [mm] - Simulace (Trajektorie) (Deformace)					
		Y					
		-140	-100	-50	50	100	140
X	-240	-0,42	-0,11	0,25	0,08	-0,32	-0,66
	-150	-0,79	-0,45	-0,03	-0,07	-0,53	-0,89
	-50	-1,11	-0,77	-0,34	-0,29	-0,75	-1,11
	50	-1,13	-0,82	-0,43	-0,40	-0,79	-1,11
	150	-0,90	-0,61	-0,26	-0,24	-0,59	-0,88
	240	-0,63	-0,36	-0,04	0,00	-0,33	-0,60

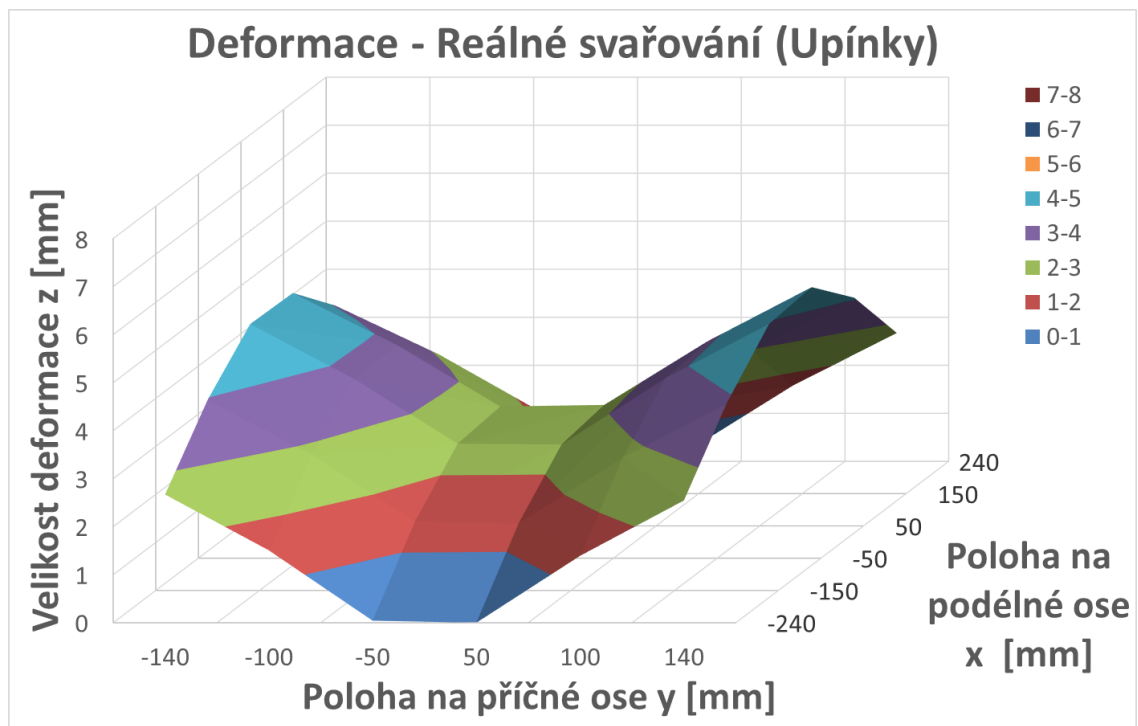
Tabulka P7.6: Deformace – Rozdíl [%] Simulace (Trajektorie)

Poloha		Rozdíl [%] - Simulace (Trajektorie) (Deformace)					
		Y					
		-140	-100	-50	50	100	140
X	-240	-12,3%	-5,1%	55,3%	13,8%	-14,6%	-18,8%
	-150	-14,9%	-11,2%	-1,0%	-2,8%	-13,2%	-16,8%
	-50	-17,0%	-14,8%	-9,4%	-7,9%	-14,5%	-17,2%
	50	-17,2%	-15,6%	-11,8%	-11,2%	-15,4%	-17,3%
	150	-16,8%	-15,3%	-11,2%	-10,9%	-15,5%	-17,2%
	240	-18,1%	-17,7%	-21,4%	0,0%	-18,7%	-19,2%
Průměr. Rozdíl		-16,1%	-13,3%	-8,4%	-8,2%	-15,3%	-17,7%



## Příloha 8 – Použití upínek pro omezení deformace

### P8.1. Reálné svařování



Obrázek P8.1: Deformace – Reálné svařování (Upínky)

Tabulka P8.1: Deformace – Reálné svařování (Upínky)

Poloha		Deformace - Reálné svařování (Upínky) [mm]					
		Y					
Poloha		-140	-100	-50	50	100	140
X	-240	2,67	1,51	0,04	0,00	1,39	2,55
	-150	3,97	2,84	1,44	1,41	2,77	3,89
	-50	4,88	3,74	2,39	2,37	3,75	4,88
	50	4,85	3,77	2,49	2,52	3,85	4,97
	150	3,91	2,90	1,68	1,75	3,00	4,08
	240	2,54	1,51	0,27	0,24	1,58	2,67
Max.		4,88	3,77	2,49	2,52	3,85	4,97

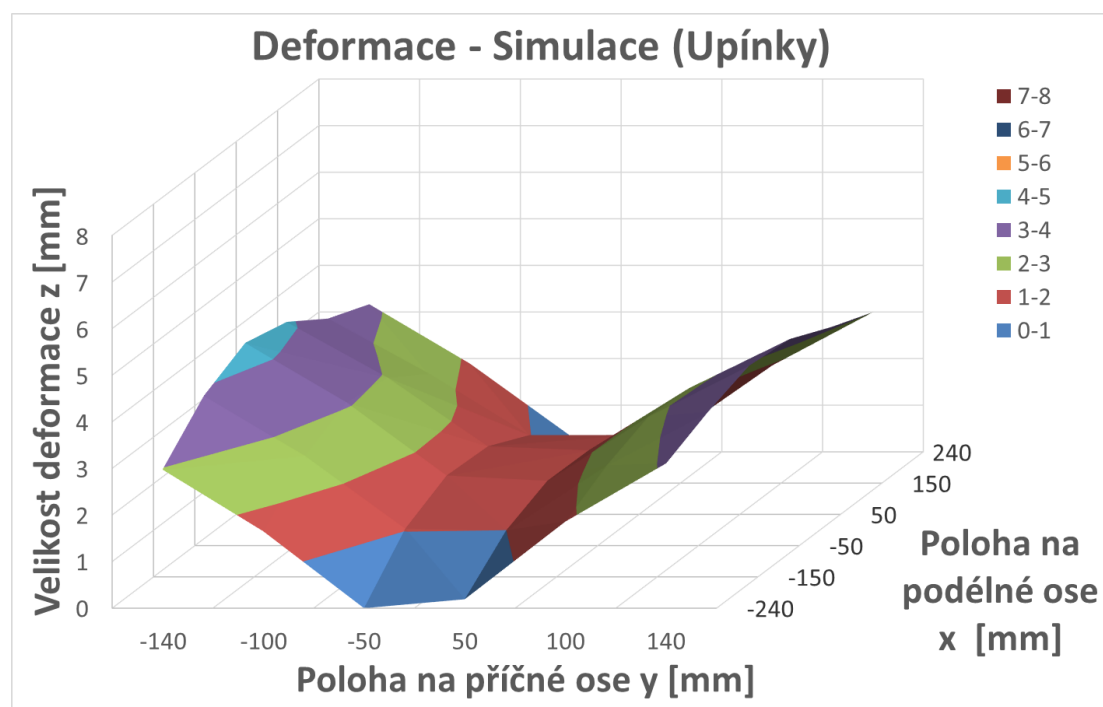
Tabulka P8.2: Deformace – Rozdíl [mm] Reálné svařování (Upínky)

Poloha		Rozdíl [mm] - Reálné svařování (Upínky) (Deformace)					
		Y					
Poloha		-140	-100	-50	50	100	140
X	-240	-1,18	-0,67	-0,12	0,00	-0,62	-1,07
	-150	-1,72	-1,24	-0,72	-0,73	-1,27	-1,75
	-50	-2,04	-1,59	-1,01	-1,10	-1,70	-2,19
	50	-2,01	-1,53	-0,94	-1,09	-1,70	-2,19
	150	-1,61	-1,11	-0,52	-0,65	-1,28	-1,78
	240	-1,08	-0,54	0,10	0,04	-0,63	-1,17

Tabulka P8.3: Deformace – Rozdíl [%] Reálné svařování (Upínky)

Poloha		Rozdíl [%] - Reálné svařování (Upínky) (Deformace)					
		Y					
		-140	-100	-50	50	100	140
X	-240	-30,6%	-30,6%	-73,9%	0,0%	-30,6%	-29,6%
	-150	-30,2%	-30,4%	-33,3%	-34,1%	-31,4%	-31,1%
	-50	-29,5%	-29,9%	-29,7%	-31,7%	-31,2%	-31,0%
	50	-29,3%	-28,8%	-27,5%	-30,3%	-30,6%	-30,6%
	150	-29,1%	-27,7%	-23,6%	-27,0%	-30,0%	-30,4%
	240	-29,8%	-26,3%	60,8%	19,0%	-28,5%	-30,5%
Průměr. Rozdíl		-29,7%	-29,0%	-28,5%	-30,7%	-30,4%	-30,5%

## P8.2. Simulace



Obrázek P8.2: Deformace – Reálné svařování (Upínky)

Tabulka P8.4: Deformace – Simulace (Upínky)

Poloha		Deformace - Simulace (Upínky) [mm]					
		Y					
		-140	-100	-50	50	100	140
X	-240	2,97	1,65	0,00	0,19	1,86	3,11
	-150	3,89	2,60	1,04	1,00	2,40	3,53
	-50	4,35	3,08	1,51	1,39	2,77	3,86
	50	4,13	2,94	1,46	1,38	2,71	3,77
	150	3,53	2,35	1,03	1,03	2,29	3,35
	240	3,17	1,89	0,34	0,35	1,85	3,00
Max.		4,35	3,08	1,51	1,39	2,77	3,86

Tabulka P8.5: Deformace – Rozdíl [mm] Simulace (Upínky)

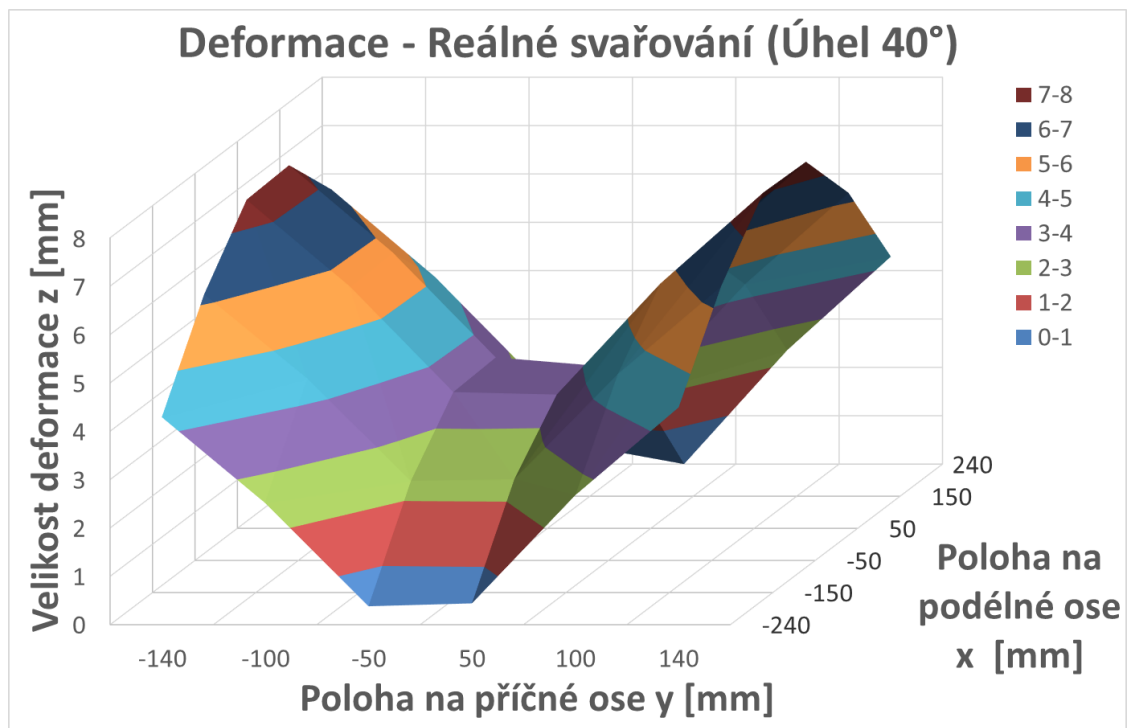
Poloha		Rozdíl [mm] - Simulace (Upínky) (Deformace)					
		Y					
		-140	-100	-50	50	100	140
X	-240	-0,45	-0,45	-0,46	-0,37	-0,35	-0,42
	-150	-1,39	-1,39	-1,42	-1,49	-1,63	-1,78
	-50	-2,17	-2,15	-2,14	-2,24	-2,42	-2,62
	50	-2,43	-2,30	-2,18	-2,21	-2,42	-2,67
	150	-1,82	-1,63	-1,31	-1,20	-1,50	-1,75
	240	-0,30	-0,12	0,15	0,35	0,11	-0,13

Tabulka P8.6: Deformace – Rozdíl [%] Simulace (Upínky)

Poloha		Rozdíl [%] - Simulace (Upínky) (Deformace)					
		Y					
		-140	-100	-50	50	100	140
X	-240	-13,2%	-21,3%	-100,0%	-66,1%	-15,7%	-12,0%
	-150	-26,4%	-34,8%	-57,7%	-60,0%	-40,4%	-33,5%
	-50	-33,3%	-41,0%	-58,7%	-61,6%	-46,7%	-40,5%
	50	-37,0%	-43,9%	-59,9%	-61,6%	-47,2%	-41,5%
	150	-34,0%	-40,9%	-56,1%	-53,8%	-39,7%	-34,3%
	240	-8,6%	-6,2%	79,1%	0,0%	6,4%	-4,1%
Průměr. Rozdíl		-25,4%	-31,4%	-58,1%	-59,3%	-30,5%	-27,6%

## Příloha 9 – Změna úhlu rozevření z 60° na 40°

### P9.1. Reálné svařování



Obrázek P9.1: Deformace – Reálné svařování (Úhel 40°)

Tabulka P9.1: Deformace – Reálné svařování (Úhel 40°)

Poloha		Deformace - Reálné svařování (Úhel 40°) [mm]					
		Y					
		-140	-100	-50	50	100	140
X	-240	4,29	2,51	0,38	0,44	2,68	4,49
	-150	6,17	4,42	2,31	2,35	4,52	6,34
	-50	7,46	5,66	3,48	3,43	5,72	7,61
	50	7,51	5,71	3,53	3,36	5,69	7,58
	150	6,34	4,54	2,37	2,11	4,39	6,28
	240	4,49	2,67	0,39	0,00	2,36	4,29
Max.		7,51	5,71	3,53	3,43	5,72	7,61

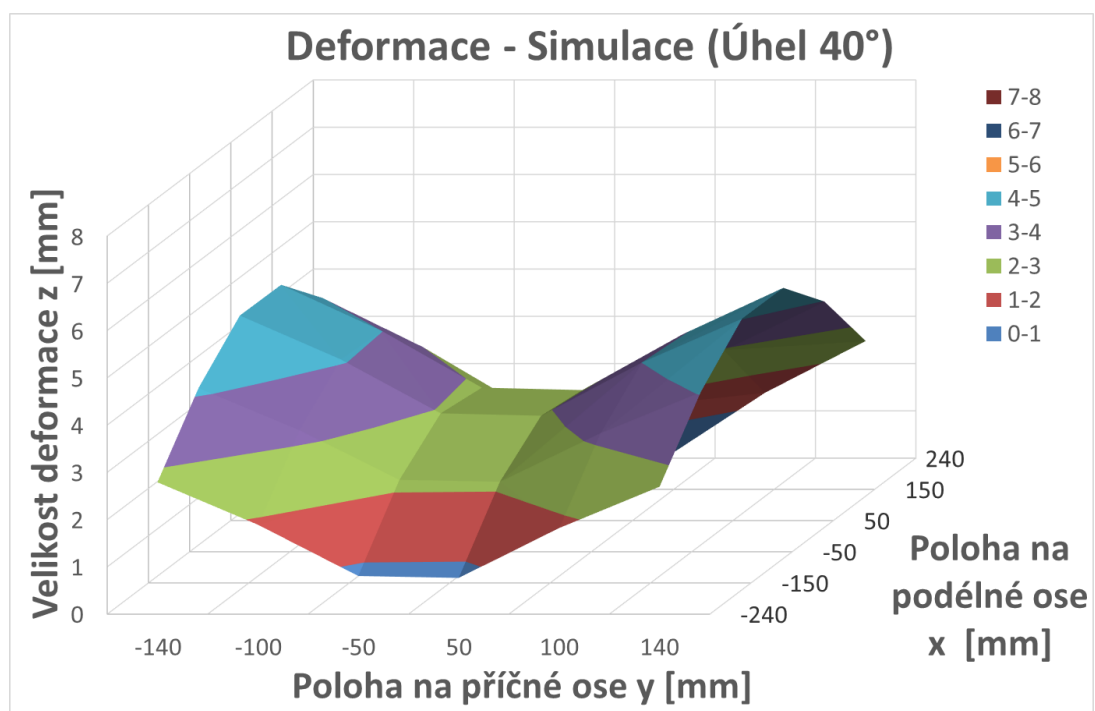
Tabulka P9.2: Deformace – Rozdíl [mm] Reálné svařování (Úhel 40°)

Poloha		Rozdíl [mm] - Reálné svařování (Úhel 40°) (Deformace)					
		Y					
		-140	-100	-50	50	100	140
X	-240	0,44	0,34	0,22	0,44	0,67	0,88
	-150	0,48	0,34	0,15	0,21	0,48	0,69
	-50	0,55	0,34	0,09	-0,04	0,27	0,55
	50	0,65	0,41	0,10	-0,26	0,15	0,41
	150	0,82	0,53	0,17	-0,30	0,11	0,41
	240	0,87	0,62	0,22	-0,20	0,15	0,44

Tabulka P9.3: Deformace – Rozdíl [%] Reálné svařování (Úhel 40°)

Poloha		Rozdíl [%] - Reálné svařování (Úhel 40°) (Deformace)					
		Y					
		-140	-100	-50	50	100	140
X	-240	11,5%	15,8%	132,0%	dělení 0	33,3%	24,3%
	-150	8,5%	8,4%	6,8%	9,7%	11,8%	12,3%
	-50	7,9%	6,3%	2,6%	-1,0%	4,9%	7,7%
	50	9,5%	7,8%	3,0%	-7,1%	2,6%	5,8%
	150	14,8%	13,2%	7,9%	-12,4%	2,5%	7,1%
	240	24,1%	30,0%	135,0%	-100,0%	6,8%	11,6%
Průměr. Rozdíl		12,7%	13,6%	5,1%	-2,7%	10,3%	11,4%

## P9.2. Simulace



Obrázek P9.2: Deformace – Reálné svařování (Úhel 40°)

Tabulka P9.4: Deformace – Simulace (Úhel 40°)

Poloha		Deformace - Simulace (Úhel 40°) [mm]					
		Y					
		-140	-100	-50	50	100	140
X	-240	2,79	1,89	0,81	0,77	1,82	2,70
	-150	4,13	3,24	2,18	2,14	3,17	4,04
	-50	5,00	4,07	2,93	2,88	4,00	4,93
	50	4,99	4,01	2,81	2,76	3,94	4,92
	150	4,05	3,01	1,76	1,72	2,95	3,97
	240	2,55	1,44	0,03	0,00	1,39	2,48
Max.		5,00	4,07	2,93	2,88	4,00	4,93

Tabulka P9.5: Deformace – Rozdíl [mm] Simulace (Úhel 40°)

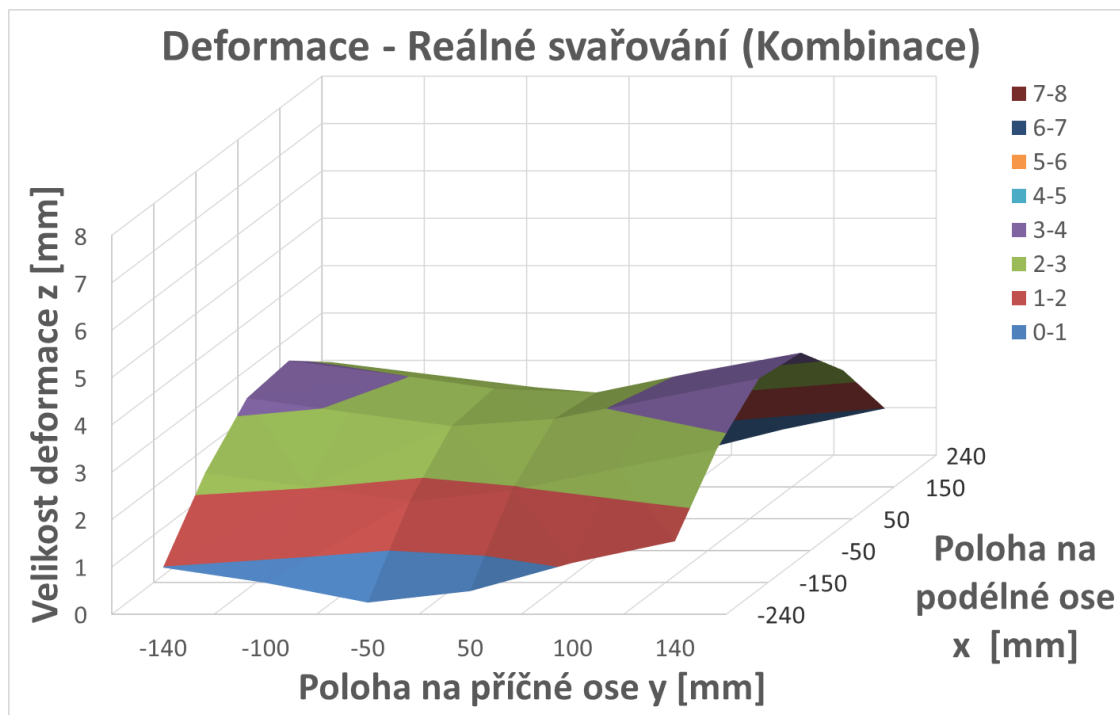
Poloha		Rozdíl [mm] - Simulace (Úhel 40°) (Deformace)					
		Y					
		-140	-100	-50	50	100	140
X	-240	-0,64	-0,21	0,35	0,20	-0,39	-0,84
	-150	-1,15	-0,76	-0,27	-0,35	-0,86	-1,27
	-50	-1,52	-1,15	-0,72	-0,75	-1,19	-1,55
	50	-1,57	-1,23	-0,83	-0,83	-1,20	-1,51
	150	-1,30	-0,97	-0,58	-0,51	-0,84	-1,13
	240	-0,91	-0,58	-0,16	0,00	-0,36	-0,65

Tabulka P9.6: Deformace – Rozdíl [%] Simulace (Úhel 40°)

Poloha		Rozdíl [%] - Simulace (Úhel 40°) (Deformace)					
		Y					
		-140	-100	-50	50	100	140
X	-240	-18,6%	-9,8%	77,2%	35,5%	-17,5%	-23,7%
	-150	-21,8%	-18,9%	-11,0%	-14,0%	-21,3%	-23,9%
	-50	-23,3%	-22,1%	-19,6%	-20,7%	-22,9%	-23,9%
	50	-23,9%	-23,5%	-22,8%	-23,0%	-23,3%	-23,5%
	150	-24,2%	-24,3%	-24,8%	-22,8%	-22,2%	-22,2%
	240	-26,3%	-28,6%	-84,4%	0,0%	-20,4%	-20,7%
Průměr. Rozdíl		-23,0%	-21,2%	-19,5%	-20,1%	-21,3%	-23,0%

## Příloha 10 – Kombinace předchozích opatření

### P10.1. Reálné svařování



Obrázek P10.1: Deformace – Reálné svařování (Kombinace)

Tabulka P10.1: Deformace – Reálné svařování (Kombinace)

Poloha		Deformace - Reálné svařování (Kombinace) [mm]					
		Y					
		-140	-100	-50	50	100	140
X	-240	0,99	0,66	0,25	0,49	1,08	1,54
	-150	2,31	2,02	1,71	1,95	2,40	2,82
	-50	3,22	2,92	2,63	2,78	3,21	3,63
	50	3,34	3,05	2,75	2,67	3,11	3,51
	150	2,64	2,37	2,10	1,59	2,04	2,46
	240	1,54	1,25	0,95	0,00	0,54	0,98
Max.		3,34	3,05	2,75	2,78	3,21	3,63

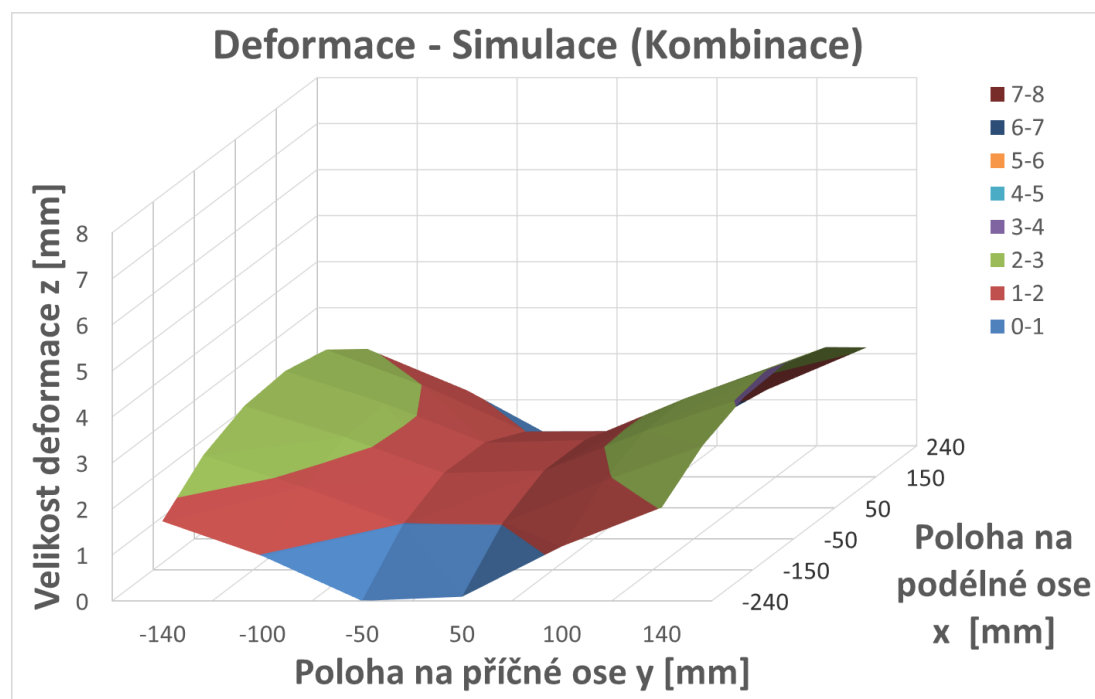
Tabulka P11.2: Deformace – Rozdíl [mm] Reálné svařování (Kombinace)

Poloha		Rozdíl [mm] - Reálné svařování (Kombinace) (Deformace)					
		Y					
		-140	-100	-50	50	100	140
X	-240	-2,86	-1,51	0,08	0,49	-0,93	-2,07
	-150	-3,38	-2,06	-0,45	-0,19	-1,64	-2,83
	-50	-3,69	-2,41	-0,76	-0,69	-2,24	-3,43
	50	-3,51	-2,24	-0,68	-0,95	-2,44	-3,66
	150	-2,89	-1,64	-0,09	-0,81	-2,24	-3,40
	240	-2,08	-0,80	0,78	-0,20	-1,67	-2,86

Tabulka P11.3: Deformace – Rozdíl [%] Reálné svařování (Kombinace)

Poloha		Rozdíl [%] - Reálné svařování (Kombinace) (Deformace)					
		Y					
		-140	-100	-50	50	100	140
X	-240	-74,4%	-69,4%	50,1%	dělení 0	-46,0%	-57,4%
	-150	-59,4%	-50,4%	-20,7%	-8,7%	-40,7%	-50,1%
	-50	-53,4%	-45,2%	-22,5%	-19,8%	-41,1%	-48,6%
	50	-51,3%	-42,4%	-19,9%	-26,2%	-43,9%	-51,1%
	150	-52,3%	-40,9%	-4,2%	-33,6%	-52,2%	-58,0%
	240	-57,4%	-38,9%	472,6%	-100,0%	-75,6%	-74,4%
Průměr. Rozdíl		-58,0%	-47,9%	-16,8%	-22,1%	-49,9%	-56,6%

## P10.2. Simulace



Obrázek P10.2: Deformace – Reálné svařování (Kombinace)

Tabulka P10.4: Deformace – Simulace (Kombinace)

Poloha		Deformace - Simulace (Kombinace) [mm]					
		Y					
		-140	-100	-50	50	100	140
X	-240	1,73	0,98	0,00	0,09	1,18	2,03
	-150	2,49	1,81	0,99	1,03	1,93	2,70
	-50	2,89	2,22	1,43	1,48	2,34	3,07
	50	2,97	2,27	1,42	1,47	2,38	3,13
	150	2,76	1,96	0,99	1,00	1,99	2,82
	240	2,11	1,20	0,03	0,02	1,22	2,14
Max.		2,97	2,27	1,43	1,48	2,38	3,13



Tabulka P10.5: Deformace – Rozdíl [mm] Simulace (Kombinace)

Poloha		Rozdíl [mm] - Simulace (Kombinace) (Deformace)					
		Y					
		-140	-100	-50	50	100	140
X	-240	-1,70	-1,12	-0,46	-0,48	-1,02	-1,50
	-150	-2,79	-2,19	-1,47	-1,46	-2,10	-2,60
	-50	-3,63	-3,01	-2,21	-2,15	-2,85	-3,41
	50	-3,58	-2,98	-2,22	-2,11	-2,76	-3,30
	150	-2,58	-2,02	-1,35	-1,24	-1,80	-2,28
	240	-1,36	-0,81	-0,16	0,02	-0,52	-0,99

Tabulka P10.6: Deformace – Rozdíl [%] Simulace (Kombinace)

Poloha		Rozdíl [%] - Simulace (Kombinace) (Deformace)					
		Y					
		-140	-100	-50	50	100	140
X	-240	-49,5%	-53,5%	-100,0%	-84,1%	-46,4%	-42,6%
	-150	-52,8%	-54,8%	-59,8%	-58,7%	-52,0%	-49,1%
	-50	-55,7%	-57,5%	-60,6%	-59,1%	-54,9%	-52,6%
	50	-54,6%	-56,8%	-60,9%	-58,9%	-53,7%	-51,3%
	150	-48,3%	-50,7%	-57,8%	-55,4%	-47,6%	-44,7%
	240	-39,2%	-40,2%	-83,8%	dělení 0	-30,0%	-31,6%
Průměr. Rozdíl		-50,0%	-52,2%	-59,8%	-58,0%	-47,4%	-45,3%