

# Simulácia zvarovania heterogénneho zvarového spoja v programe Sysweld

Radoslav Koňár, Ing., PhD.\*

Katedra technologického inžinierstva, Strojnícka fakulta,  
Žilinská univerzita v Žiline,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.  
E-mail: radoslav.konar@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2799

## Welding simulation of a heterogeneous weld joint in the programme Sysweld

**Abstract:** The article deals with the analysis and subsequent simulation of a heterogeneous butt weld joint. Specifically, it is a combination of S355 steel and AISI316 anti-corrosion steel. The welding simulation was based on a real experiment, during which several quantities were measured and analyzed, which served to define the boundary conditions for the simulation. The result of the analysis is the calculation of temperature fields and deformations for a heterogeneous joint, as well as monitoring the influence of different steels on the welding process and heat propagation.

**Keywords:** welding simulation, stainless steel, heterogeneous weld joint, weld analysis, Sysweld

## ÚVOD

Zváranie patrí medzi veľmi rýchlo rozvíjajúce sa technológie výroby nerozoberateľných spojov. Uplatňuje sa pri výrobe zložitých technologických uzlov, ale aj pri výrobe jednoduchých konštrukcií. Častokrát zváranie v strojárskom priemysle zastupuje hlavnú úlohu aj pri opravách rôznych strojných súčastí. Z hľadiska zastúpených základných materiálov v zvarovom spoji sa spoje delia na homogénne a heterogénne. V mnohých aplikačných prípadoch je výhodné použitie heterogénnych zvarových spojov. Heterogénne spoje sú využívané pri výrobe, ako aj pri rôznych opravách. Heterogénny zvarový spoj predstavuje zvarový spoj medzi rôznorodými základnými materiálmi. V tomto prípade je veľmi dôležitá správna voľba prídavného materiálu. Kombinácia antikoročná-konštrukčná oceľ sa častokrát používa vo výrobe. Čím väčšia je vzájomná rozpustnosť ocelí v tuhom stave s vyhovujúcimi mechanickými vlastnosťami, tým viac sú vhodnejšie na zváranie [1, 2, 8].

Pri návrhu kombinácie a správania sa zvarového spoja vyrobeného z rôznych materiálov je možné ešte pred samotným zvarovaním predbežne posúdiť úžitkové vlastnosti zvaru pomocou numerickej simulácie. Jedným z programov umožňujúcich vytváranie takýchto výpočtov je program *Sysweld*. Z výsledkov numerickeho výpočtu programu *Sysweld* je možné analyzovať štruktúrne zmeny, deformácie, zvyškové napätia a tvrdosti.

Predložený článok sa zaoberá prípravou okrajových podmienok pre simuláciu, ako aj výsledky simulácie

zvarovania heterogénneho tupého zvarového spoja technológiou *TIG*.

## 1 SYSWELD

Program *Sysweld* patrí medzi moderné simulačné programy. Je zameraný na oblasť zvarovania a tepelného spracovania. Ide o program, pracujúci na základe metódy konečných prvkov (*MKP*), čo dovoľuje riešiť konštrukčne a technologicky náročné úlohy z oblasti zvarovania. Z matematickeho hľadiska je metóda *MKP* využívaná k nájdeniu aproximovaného riešenia parciálnych diferenciálnych a integrálnych rovníc (napr. rovnica vedenia tepla) pomocou *PC*.

Programom *Sysweld* možno riešiť oblúkové (*MMA*, *MIG/MAG*, *TIG*, *ZPT*), odporové (bodové, švové zváranie), vysokoenergetické (laserový, elektrónový lúč), trecie spôsoby zvarovania, ako aj tepelné spracovanie materiálov. Po vhodnom zadení vstupných dát, geometrie a okrajových podmienok, možno po procese simulácie získať výsledky ako deformácie, zvyškové napätia, tvrdosť *HV*, rozloženie materiálových fáz, veľkosť a tvar teplom ovplyvnenej oblasti.

Simulačný program *Sysweld* umožňuje definovať tri typy tepelných zdrojov:

- trojrozmerný dvojelipsoidný *Goldakov model*,
- trojrozmerný kónický *Gaussov model*,
- dvojrozmerný *Gaussov model*.

Pre matematické definovanie tepelných zdrojov vznikajúcich pri oblúkových spôsoboch zvarovania je najvhodnejšie použiť dvojelipsoidný *Goldakov model*.

Proces simulácie je rozdelený do troch krokov:

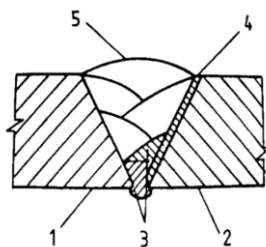
- príprava MKP modelu,
- nadefinovanie simulačného projektu - vstupné dáta a okrajové podmienky simulácie,
- zobrazenie a analýza výsledkov [3, 4].

## 2 ZVAROVÉ SPOJE FERITICKÝCH A AUSTENITICKÝCH OCEĹÍ

Ak vytvorený zvarový spoj bude v prevádzke do teploty 350°C, zvara sa austenitickými elektródami, ktoré umožňujú vytvoriť plastický zvarový kov s vysokou húževnatosťou. Pre zváranie je taktiež možnosť využiť elektródy, ktoré dávajú nízkolegovaný zvarový kov s veľmi nízkym obsahom uhlíka.

Zvarový spoj ktorý bude v prevádzke pracovať pri teplotách vyšších ako 350 °C, sa zvara takým postupom, ktorý vytvára kov tvoriaci bariéru proti difúzií uhlíka do austenitickej ocele. Ideálne je zvarať s elektródami s vyšším obsahom niklu ako 30 hm. %. Koreňová vrstva sa obyčajne zvara s elektródami 38 hm. % Ni, 20 hm. % Cr, aby sa zabránilo vzniku trhlín. Výplň zvaru sa zvara elektródami s vysokým obsahom Ni, alebo s elektródami 38 hm. % Ni, 18 hm. % Cr [3].

Ďalšou možnosťou je aplikovať vysokolegované prídavné materiály typu 24Cr-13Ni iba pre naváranie protifúznej bariéry na strane feritického materiálu (2 vrstvy), naopak pre výplň zvaru sa používajú elektródy zloženia 18 hm. % Cr, 8 hm. % Ni, najlepšie s veľmi nízkym obsahom uhlíka (0,03 hm. % C), ktoré svojou húževnatosťou odolávajú vzniku trhlín. Pri zváraní výplne zvaru austenitickými elektródami na báze 18 hm. % Cr, 8 hm. % Ni sa zvarový spoj nemusí predhrievať. Na obr. 1 je zobrazený príklad spôsobu zvárania s využitím poduškovania [3].



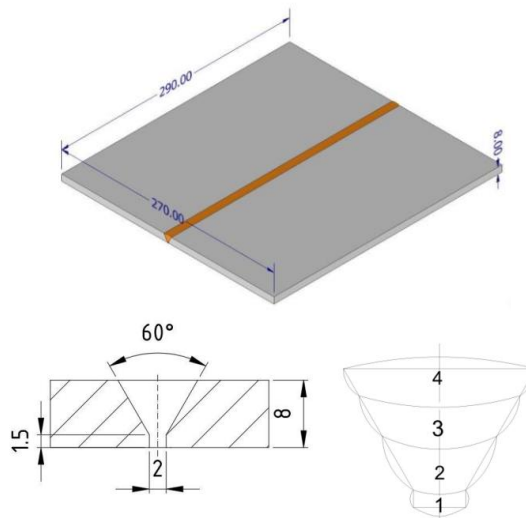
Obr. 1. Zváranie ocelí rozdielnych štruktúrnych báz s využitím poduškovania: 1 - austenitická oceľ, 2 - konštrukčná oceľ, 3 - koreň (zvarový kov typu 24 Cr-13Ni), 4 - poduška (zvarový kov typu 24 Cr-13Ni), 5 - zvarový kov 18 hm. % Cr, 8 hm. % Ni

## 3 EXPERIMENTÁLNE ZVÁRANIE HETEROGÉNEHO SPOJA

Metóda pre zváranie heterogénej experimentálnej vzorky bola zvolená technológia TIG (141). Ako ochranná atmosféra bol použitý Argón 4.6 (Linde UN 1006, GA260). Rovnaká ochranná atmosféra bola

použitá aj na ochranu koreňa zvarového spoja. Základnými materiálmi sú konštrukčná oceľ S355 a antikoročná oceľ AISI316.

Pre zváranie bol zvolený prídavný materiál typu OK Tigrod 309L a priemerom drôtu Ø2,4 mm. Rozmery experimentálnej vzorky boli 290x270x8 mm. Schéma vzorky a postupu zvárania je na obr. 2.



Obr. 2. Experimentálna vzorka (hore) a schéma postupu zvárania (dole) [8]

Vzorka bola zozváraná technológiou TIG ručne. Pre zváranie bol použitý zdroj IWELD TIG 2400 AC/DC PFC v polarite DC-. Priemer volfrámovej elektródy bol Ø2,4 mm. Prietok ochrannej atmosféry Argónu 4.6 pri zváraní bol 12 l·min<sup>-1</sup>. Prietok pre koreňovú ochranu bol nastavený na 1·min<sup>-1</sup>. Vzorka pripravená na zváranie je na obr. 3.



Obr. 3. Experimentálna vzorka pripravená na zváranie

Parametre zvárania sú uvedené v tab. 1.

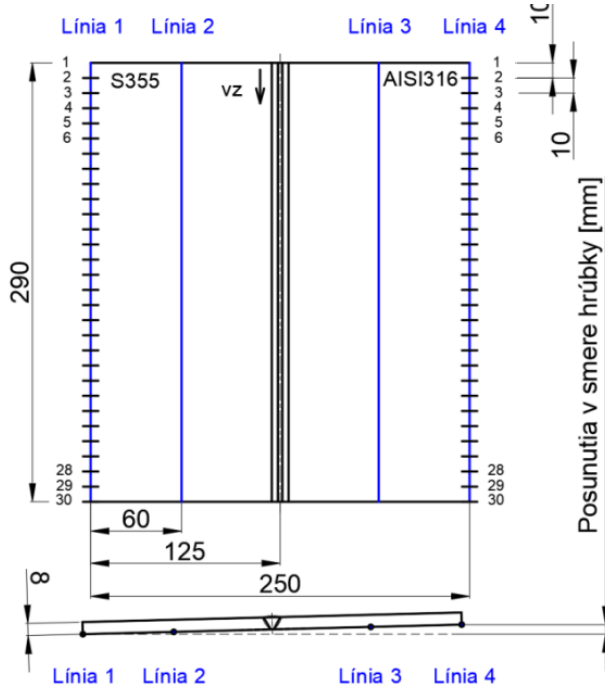
Tab. 1. Parametre zvárania

Húsenica	$I_z$ [A]	$U_z$ [V]	$v_z$ [mm·s <sup>-1</sup> ]	$t_z$ [s]	$L_z$ [mm]
1 (koreň)	105	10,5	1,16	250	290
2 (výplň)	160	11	1,17	248	290
3 (výplň)	160	11	1,39	209	290
4 (krycia)	160	11	1,21	240	290

Po zozváraní a ochladnutí experimentálnej vzorky bola vykonaná analýza zvarového spoja, a to:

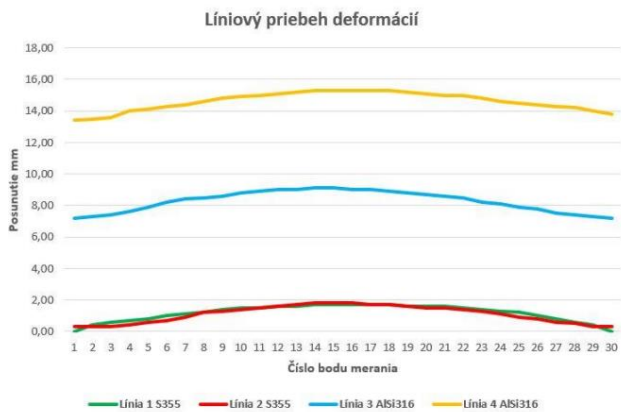
- meranie deformácií zvarového spoja,
- analýza makroštruktúry zvaru a jej digitalizácia,
- meranie tvrdosti.

Po dozváraní experimentálnej vzorky a jej následnom vychladnutí bolo potrebné určiť línie merania deformácií. Postup merania je zobrazený na obr. 4.



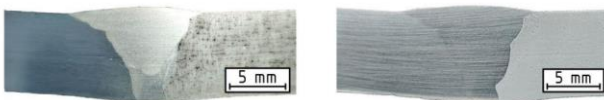
Obr. 4. Postup merania deformácií

Priebeh deformácií bol spracovaný do grafu na obr. 5.



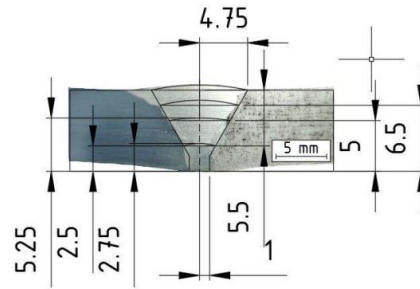
Obr. 5. Liniový priebeh deformácií

Ďalším krokom analýzy experimentálnej vzorky je analýza a digitalizácia makroštruktúry. Digitalizácia makroštruktúry je dôležitá pre prípravu MKP modelu pre simuláciu. Makroštruktúra bola odobratá v reze kolmom na os zvaru. Makroštruktúra je zobrazená na obr. 6.



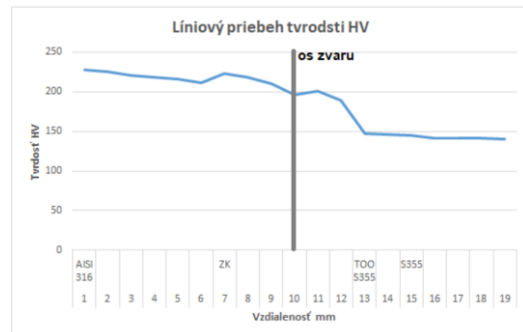
Obr. 6. Makroštruktúra zvarového spoja: leptadlo Villela-Bain (vľavo), leptadlo 5% Nital (vpravo)

Digitalizácia bola vyhotovená v programe AutoCAD po nastavení mierky na základe hrúbky materiálu.



Obr. 7. Digitalizácia makroštruktúry zvarového spoja v programe AutoCAD

Poslednou analýzou na experimentálnej vzorke bolo meranie tvrdosti. Línia merania a jednotlivé vpichy sú zobrazené na obr. 8. Zobrazenie je na reálnej pozývanej vzorke zvarového spoja. Vpichy boli umiestnené vo vzdialenosti 1 mm od seba. Línia merania bola rovnobežná s povrchom materiálu v smere kolmom na os zvaru v hĺbke 4 mm.



Obr. 8. Výsledky merania tvrdosti HV10

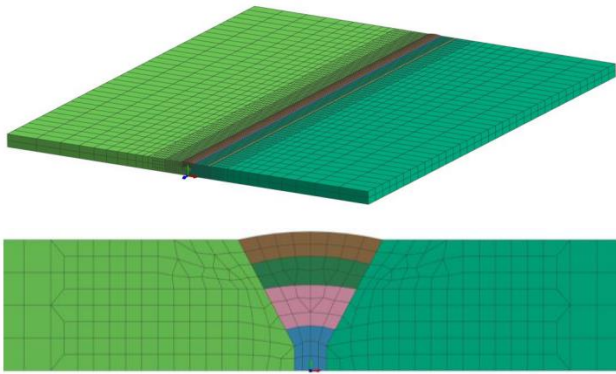
## 4 SIMULÁCIA ZVÁRANIA

Numerická simulácia je zložená z:

- tvorby MKP modelu,
- zadefinovanie okrajových podmienok a vstupných dát pre simuláciu,
- zobrazenie výsledkov simulácie a numerické výpočty.

Pred samotným začatím simulácie bolo potrebné vytvoriť MKP model zvarového spoja. Model bol vytvorený na základe digitalizovanej makroštruktúry. Digitalizovaná makroštruktúra je potrebná hlavne z dôvodu tvaru a plochy jednotlivých húseníc. Tvorba MKP modelu bola v programe VisualMesh. Vytvorený nasieťovaný MKP model mal 280 1D elementov, 13376 2D elementov a 47460 3D

elementov. Celkovo bol model *MKP* zložený z 61116 elementov. Model je zobrazený na obr. 9.

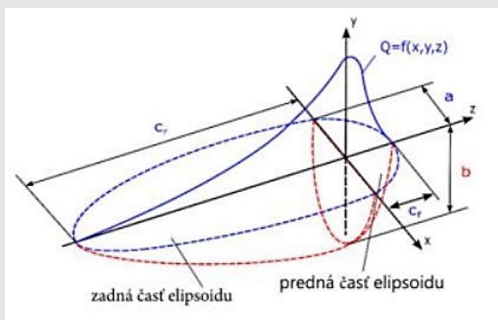


Obr. 9. *MKP* model pre simuláciu [8]

Na základe počtu vrstiev zvarového spoja boli nadefinované štyri *Goldakove modely* zdroja tepla, každý pre jednu zvarovú húsenicu. Parametre *Goldakových* modelov sú v tab. 2.

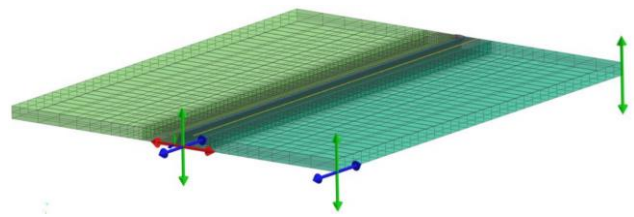
Tab. 2. Parametre *Goldakových* modelov [8]

Parameter	Prvá vrstva	Druhá vrstva	Tretia vrstva	Štvrtá vrstva
Tepelný príkon [J·mm <sup>-1</sup> ]	1650	1700	1550	1375
Dĺžka $c_f + c_r$ [mm]	10	10	10	10
Šírka $2 \cdot a$ [mm]	3,5	8	9	9,5
Hĺbka $b$ [mm]	1,8	1,3	1,2	1,5
Posunutie zdroja X; Y; Z [mm]	-4,5; 0,5	-4,5; 0; -3	-4,5; 0; -1,5	-4,5; 0; 0,5
Rýchlosť zvarovania [mm·s <sup>-1</sup> ]	1,16	1,17	1,39	1,21
Začiatok zvarovania [s]	0	710	1640	3090



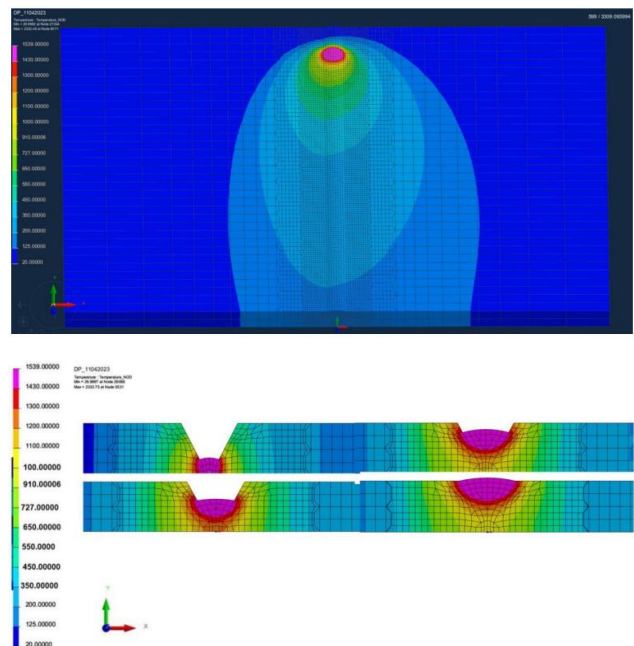
Pre simuláciu a výpočet deformácií a zvyškových napätí bolo potrebné zadefinovať okrajové podmienky pre mechanickú analýzu. Nakoľko bolo

potreba aby úloha bola staticky určitá, tak boli vo zvolených bodoch odobraté stupne voľnosti. Na obr. 10 je schéma odobratia stupňov voľnosti.

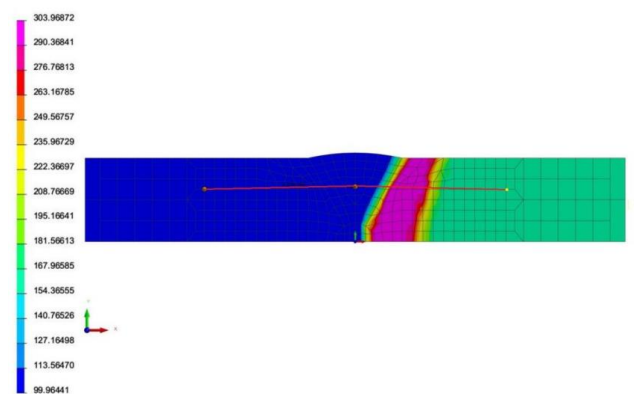


Obr. 10. Definovanie uloženia pre mechanickú analýzu

Výsledkom teplotnej a metalurgickej analýzy boli výsledky nestacionárnych teplotných polí, ktoré sú prvým dôležitým výpočtom pre riešenie nasledujúcej mechanickej analýzy. Teplotné polia sú vypočítané na základe zaťaženia modelu *Goldakovými* modelmi zdrojov tepla.



Obr. 11. Výsledky teplotných polí (*AISI316* - vľavo, *S355* - vpravo) [8]

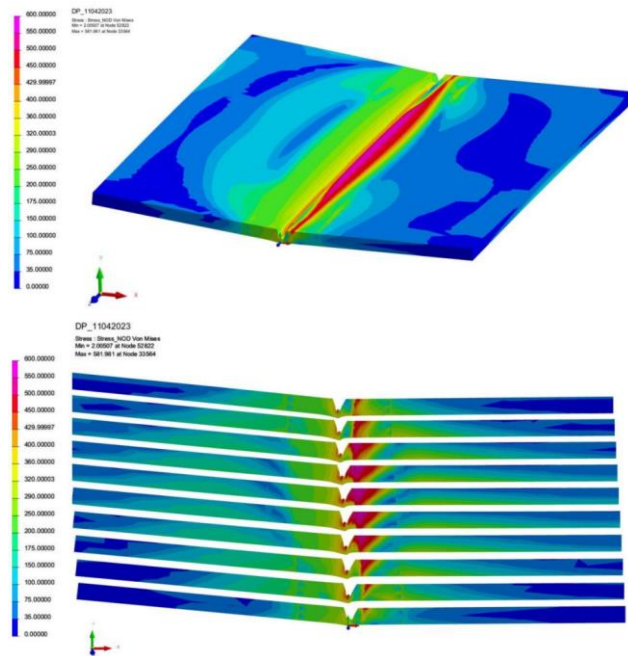


Obr. 12. Vypočítaná tvrdosť zvarového spoja v *HV* (*AISI316* - vľavo, *S355* - vpravo) [8]

Simulačný program Sysweld umožňuje vypočítať výslednú tvrdosť na základe podielu jednotlivých štruktúrnych zložiek. Nadefinovaná línia merania

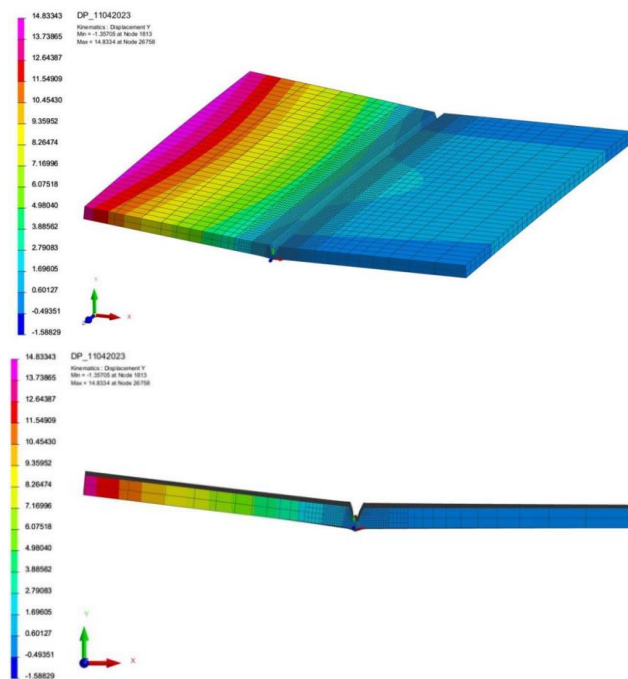
tvrdosti HV v jednotlivých uzlových bodoch je grafický zobrazená na obr. 13. Vzdialenosti umiestnení jednotlivých bodov a hĺbka merania boli totožné s meraním na experimentálnej vzorke.

Výsledkom výpočtu mechanickej analýzy bolo zobrazenie zvyškových napätí a deformácií zvarového spoja.

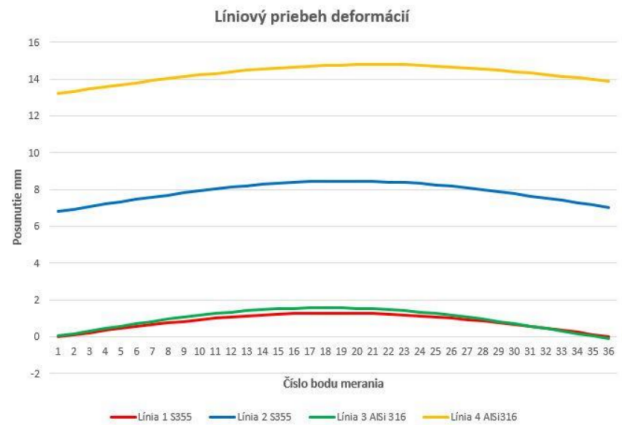


Obr. 13. Grafické zobrazenie rozloženia von Misesového napätia po zváraní a ochladiení spoja (AISI316 – vľavo, S355 - vpravo) [8]

Posledným zobrazeným výsledkom mechanickej analýzy bolo zobrazenie deformácií. Celkové deformácie zvarového spoja sú na obr. 13 a líniový priebeh deformácií na obr. 14.



Obr. 13. Grafické zobrazenie deformácií (AISI316 - vľavo, S355 - vpravo) [8]



Obr. 14. Líniový priebeh deformácií [8]

## ZÁVER

Článok rieši numerickú simuláciu heterogénneho spoja, ktorá vychádza z reálneho experimentu. Výsledkom experimentálnych prác a numerických simulácií sú teplotné polia, tvrdosť, redukované von Misesové zvyškové napätia a deformácie. Na výsledkoch teplotných polí je možné vidieť nesymetriu teplôt, čo je spôsobené rôznymi fyzikálnymi vlastnosťami zváraných materiálov. Z výsledkov je zrejmé, že austenitická oceľ má voči konštrukčnej oceli nižšiu tepelnú vodivosť. Namerané hodnoty tvrdosti podľa *Vickersa* dosahovali svoje maximá v oblasti *TOO* ocele S355JR a to 147 a 146 HV. Vypočítané hodnoty mali taktiež svoje maximá v rovnakej oblasti, avšak boli podstatne vyššie, čo je spôsobené odlišným chemickým zložením reálnej ocele a ocele z databázy programu, ktorá je tvorená pre maximálne hodnoty jednotlivých chemických prvkov. Pri porovnaní nameraných výsledkov deformácií s výsledkami zo simulácie bola zistená veľmi vysoká zhoda. Líniové priebehy deformácií z nameraných hodnôt a z vypočítaných hodnôt mali taktiež zhodný trend vývoja. Nadefinované okrajové podmienky, ktorých správnosť bola overená s reálnym experimentom, je možné použiť pre simulácie konštrukčne zložitých zvarencov, kde bude možné predikovať vlastnosti a správanie sa materiálov, ale aj celej konštrukcie.

## Pod'akovanie

Príspevok vznikol vďaka podpore projektov VEGA 1/0150/08 a KEGA 008ŽU-4/2022.

## LITERATÚRA

- [1] ORSZÁGH, V. - ORSZÁGH, P. (1998): *Zváranie TIG oceli a neželezných kovov*. Bratislava: Polygrafia SAV, 300 s., ISBN 80-88780-21-7.
- [2] LEŽDÍK, V. - MIČIAN, M. - PATEK, M. (2016): *Schvalovanie postupov zvárania kovových materiálov a plastov*. Turany: Inštitút kvality a vzdelavania, s.r.o., 204 s., ISBN 978-80-969599-2-1.

- [3] SUO, L. et al. (2023): *Modeling of welding residual stress in a dissimilar metal butt-welded joint between P92 ferritic steel and SUS304 austenitic stainless steel*. In: *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 23, pp. 4938-4954, ISSN 2238-7854
- [4] MARTINEC, J. - ŠVEIDLER, Z. - JANOVEC, J. (2014) : *Korozivzdorné materiály - základní typy ocelí a doporučení pro jejich svařitelnost*. [online]. [cit. 2024-08-03]. Dostupné na: <http://old.konstrukce.cz/clanek/korozivzdorne-materialy-zakladnitypy-oceli-a-doporuceni-pro-jejich-svaritelnost/>
- [5] MORAVEC, J. a kol. (2020): *Technológia 1*. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 411 s., ISBN 978-80-554-1731-8.
- [6] WINCZEK, J. et al. (2019): *Theoretical and Experimental Investigation of Temperature and Phase Transformation During SAW Overlaying*. In: *Applied Science*, Vol. 9, No. 7, Article No. 1472, ISSN 20763417.
- [8] MATEJÍK, L. (2014): *Zváranie heterogénneho zvarového spoja technológiou TIG*. [diplomová práca] Žilina: ŽU v Žiline, Strojnícka fakulta, Katedra technologického inžinierstva, 61 s.