

About Calculation of Imperfections for Welding Simulations

Ladislav Novotný and Adan Vega Saenz

?

Abstract—Many metal structures are assembled from thin plate with welded supports. However welded joints, which require large heat input, may incur significant distortion in the finished plate. Distortion of the welded assembly is largely affected by residual stress generated in the weld and is dependent on the constraints imposed by the geometry of the welded structure. Welded components are typically subjected to several types of deformation. Most of these types of deformation result from the shrinkage of the weld metal during cooling. The ideal straight geometry may be changed by imperfections to enable buckling behavior. Real component shapes contain various imperfections. Finite element mesh may contain imperfections too. When the simple weld model shapes are used, the shape of the result distortion is predictable. The imperfections are created in the same shape as predicted. The sufficient magnitude of an imperfection is about 1/100 of result distortion, or it respects model dimension. When the complex weld model shapes are used, it is not easy to predict the correct imperfection shape. For general purpose as well, the common procedure for calculation of correct imperfections shapes is required. Thermal source is time-dependent, moves along the weld line. For welding distortions and residual stress simulations, nonlinear mechanical analysis is required. Nonlinearities are caused by both nonlinear behaviour of the material and geometrical nonlinearity. Usually, the element birth technique is used to simulate weld material additions. This article present possibility of calculations of geometrical imperfection. Algorithm to consider imperfections has been developed and implemented in a thermo-elastic-plastic analysis within a finite element analysis framework..

Index Terms—finite element method, imperfection, welding distortions, welding simulation.

ÚVOD

PREZENTOVANÁ simulácia metódou konečných prvkov reprezentuje reálny experiment. Jednalo sa o zváranie dvoch plechov dĺžky 500 mm, šírky 250 mm a hrúbky 4 mm elektrickým oblúkom jednou zvarovou húsenicou. Zvárané plechy boli z ocele DH-36 zvárané elektródou o priemere 1 mm z konvenčného materiálu s relatívne vysokou teplotou fázovej transformácie 560 °C.

Manuscript received December 14, 2011 accepted December 20, 2011. This work was supported in part by the Scientific Grant Agency of the Ministry of Education of Slovak Republic and the Academy of Sciences under grant 1/0453/10.

Ing. Ladislav Novotný, PhD. is with Faculty of Mechanical Engineering, Technical University of Kosice, Letna 9, 042 00 Kosice, Slovak republic (e-mail: ladislav.novotny@gmail.com).

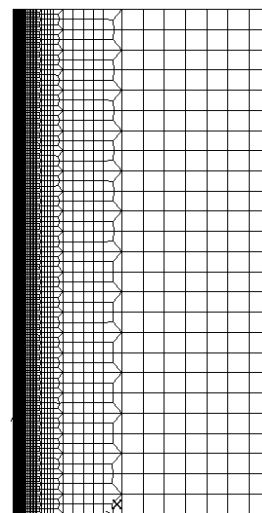
Dr. Adan Vega Saenz is with the School of Mechanical Engineering, Technological University of Panama.

Počas ručného zvárania boli oceľové plechy položené na drevených paletách, pri zváraní bola použitá keramická podložka na stabilizáciu zvarového kúpeľa. Parametre zvárania boli:

- rýchlosť zvárania 2.7 mm s-1
- zvarací prúd 150 A
- napätie pri zváraní 18 V

I. KONEČNOPRVKOVÝ MODEL BEZ IMPERFEKCIÍ

Konečnoprvková sieť pozostávala z 21200 prvkov (objemové 20 uzlové prvky), 10283 uzlov. Mapovaná sieť bola zhusťovaná smerom k zvarovej čiare. Prvky reprezentujúce zvar a jeho okolie boli tvorené uniformnou sieťou. Symetrické okrajové podmienky boli predpísané uzlom ležiacim v rovine symetrie, čo umožnilo simulácie na polovici modelu.



Obr.1.: Konečnoprvková sieť

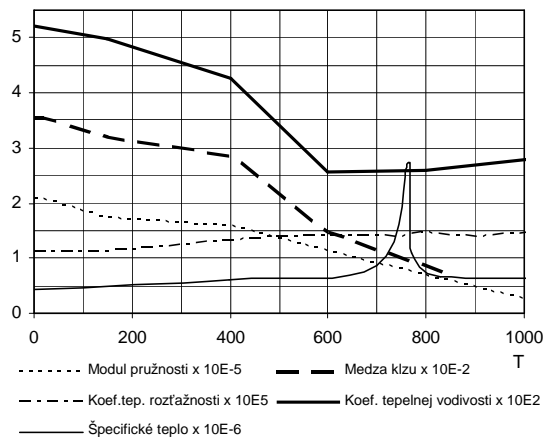
Poloha tepelného toku bola časovo závislá–pohyblivá pozdĺž zvarovej čiary. Predpísaný tepelný tok bol

$$h = \frac{\eta IU}{A},$$

kde $\eta = 0.75$ je súčiniteľ účinnosti pri zváraní, A je plocha pôsobenia zvarového oblúka. Bol použitý Von Misesov elasto-plastický materiálový model s kinematickým spevnením. Materiálové vlastnosti boli teplotne závislé (obr.2).

Pri teplotnej analýze (nestacionárna analýza šírenia tepla)

bola použitá Newmarková metóda, konštantný časový krok. Následná mechanická analýza uvažovala s teplotnými poľami vypočítanými pri teplotnej analýze.

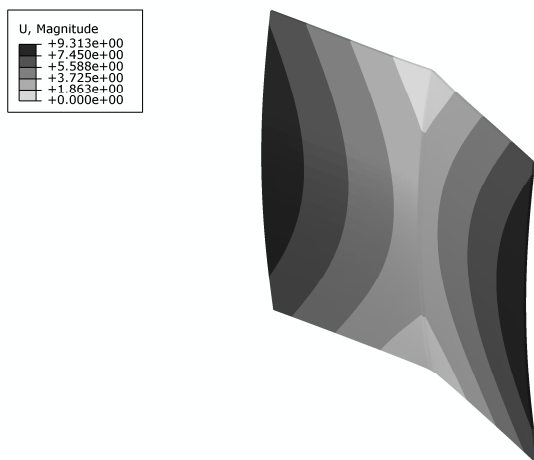


Obr.2.: Experimentálne získané materiálové vlastnosti

Pri riešení tejto nelineárnej úlohy bola použitá Newton-Raphsonová metóda.

Výsledky riešení modelu bez imperfekcií

Teplotné polia boli časovo závislé. Miesto maximálnej hodnoty teploty záviselo a posúvalo sa s miestom pôsobenia teplotného toku.



Obr.3.: Výsledná deformácia

Obr. 3 znázorňuje priebeh výsledného posunutia–pretvorenia v poslednom časovom kroku simulácie (po zvarení, vychladnutí).

II. KONEČNOPRVKOVÝ MODEL S IMPERFEKCIAMI

Tvar a veľkosť imperfekcií sú veľmi dôležité pri skúmaní správania sa štíhlych konštrukcií pri simulácii zvarovania. Pre zložitejšie tvary zvarovaných konštrukcií bol vytvorený nasledujúci postup vytvárania imperfekcií. V princípe, za imperfekcie pre simulácie zvarovania boli zvolené lineárne

kombinácie vlastných tvarov z lineárnej stabilitnej analýzy. Pričom zaťažením pre lineárnu stabilitnú analýzu bolo stiahnutie v prvkoch reprezentujúcich zvarovú húsenicu vypočítane v lineárnej statickej analýze.

Zaťažením pre lineárnu statickú analýzu bolo teplotné pole. Zjednodušené teplotné pole bolo vytvorené teplotnou analýzou stacionárneho šírenia tepla predpísaním nižšej teploty uzlom prvkov predstavujúcich zvarovú húsenicu v porovnaní so zvyšnými uzlami (zvyškom modelu).

A. Princíp výpočtu lineárnej stability

Lineárna kombinácia vlastných tvarov z lineárnej stabilitnej analýzy môže byť použitá ako imperfekcia pre nelineárnu analýzu.

Uvažujme s maticou počiatkových napätí – linearizovaný systém

$$(\mathbf{K} + \mathbf{K}_\sigma) \mathbf{d} = \mathbf{f}.$$

Pri kritickom zaťažení dôjde k bifurkačnému bodu na zaťažovacej krivke zaťaženie–posunutie. Sú možné dve rôzne rovnovážne stavy pri dvoch nekonečne malých virtuálnych posunutíach–tvare bez vybočenia a tvar s vybočením–bez zmeny vonkajšieho zaťaženia \mathbf{f} .

Lineárna stabilitná analýza vedie k riešeniu problému vlastných čísel

$$(\mathbf{K} + \lambda \mathbf{K}_\sigma) \mathbf{r} = \mathbf{0}.$$

Triviálne riešenie $\mathbf{r} = \mathbf{0}$ pre ľubovoľné hodnoty λ nie je zaujímavé. Netriviálne riešenia $\mathbf{r}_i \neq \mathbf{0}$ sú len ak

$$\det(\mathbf{K} + \lambda \mathbf{K}_\sigma) = 0. \quad (1)$$

To predstavuje rovnicu n -tého rádu pre λ , ktorá má n riešení (koreňov)–vlastných čísel λ_i . Pre každé vlastné číslo λ_i má rovnica (1) jedno riešenie (vlastný vektor)

$$(\mathbf{K} + \lambda_i \mathbf{K}_\sigma) \mathbf{r}_i = \mathbf{0},$$

pričom

λ_i je koeficient (násobiteľ), ktorým musíme zvýšiť, alebo znížiť zaťaženie na vyvolanie vybočenia (v i tom vlastnom tvare),

\mathbf{r}_i je i -ty vlastný tvar,

\mathbf{K} je konvenčná matica tuhosti,

\mathbf{K}_σ je matica počiatkových napätí,

\mathbf{d}_i je vektor uzlových posunutí pre i -ty vlastný tvar,

\mathbf{f} je vektor predpísaného zaťaženia.

Pre výpočet len relevantných vlastných čísel a vlastných tvarov môžeme využiť posunutie s

$$(\mathbf{K} + (\lambda_i - s) \mathbf{K}_\sigma) \mathbf{r}_i = \mathbf{0}. \quad (2)$$

Vlastné tvary sú navzájom ortogonálne vzhľadom na matice \mathbf{K} a \mathbf{K}_σ ,

$$\mathbf{r}_i^T \mathbf{K} \mathbf{r}_j = 1,$$

$$\mathbf{r}_i^T \mathbf{K}_\sigma \mathbf{r}_j = \lambda.$$

B Výpočet imperfekcií pre simuláciu zvarovania

Stacionárna analýza šírenia tepla

Uniformná nižšia teplota bola predpísaná uzlom prvkov reprezentujúcim zvarový materiál. Uniformná vyššia teplota bola predpísaná uzlom prvkov platní. Hodnota vyššej aj nižšej teploty bola irelevantná, nakoľko v následnej stabilitej analýze vlastné tvary budú normované. Teplota bola predpísaná všetkým uzlom modelu.

Lineárna statická analýza

Teplotné zaťaženie z stacionárnej analýzy šírenia tepla bolo použité ako teplotné zaťaženie pre výpočet predpätia kvôli stiahnutiu zvarovej časti. Veľkosť tohto predpätia bola opäť irelevantná (nakoľko nasledujúcej lineárnej stabilitej analýze sú vlastné tvary normované). Symetrické okrajové podmienky boli predpísané uzlom nachádzajúcim sa v rovine symetrie.

Analýza lineárnej stability, modely s imperfekciami

Metódou iterácie podpriestoru bolo počítaných prvých 20 vlastných tvarov. Kvôli výpočtu prvých nezáporných vlastných čísel a vlastných tvarov bolo použité posunutie (rovnica 2). Prvých dvadsať vlastných tvarov je zobrazených na obr. 4. Vlastné tvary sú normované, imperfekcie sú vytvorené ako násobok posunutí príslušného vlastného tvaru.

Jednotlivé súčinitele môžu byť vyjadrené

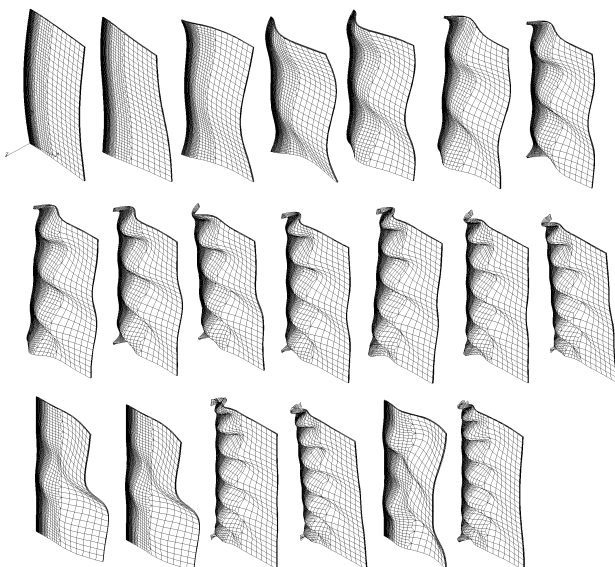
$$c_i = \frac{u_i^{\text{Imp}}}{u_i^{\text{Norm}}},$$

kde

c_i je koeficient pre i -ty vlastný tvar,

u_i^{Imp} je maximálna hodnota posunutia pre i -ty tvar imperfekcie,

u_i^{Norm} je maximálna hodnota posunutia pre i -ty normovaný vlastný tvar.



Obr.4: Rôzne módy vlastných tvarov

Výsledný tvar s imperfekciami môže byť vytvorený pripočítaním lineárnej kombinácie posunutí uzlov v jednotlivých vlastných tvaroch k súradniciam uzlov perfektného modelu (modelu bez imperfekcií). Súradnice uzlov modelu boli teda pozmenené imperfekciami

$$\mathbf{x}^{\text{IMP}} = \mathbf{x} + c_i \mathbf{r}_i,$$

pričom

\mathbf{x}^{IMP} je vektor uzlových súradníc modelu s imperfekciami,

\mathbf{x} je vektor uzlových súradníc modelu bez imperfekcií,

\mathbf{r}_i je vektor posunutí i -tého vlastného tvaru.

Týmto postupom boli do modelu zavedené geometrické imperfekcie.

Modely s imperfekciami

Boli vytvorené tri rôzne modely s imperfekciami. Líšili sa počtom uvažovaných vlastných tvarov ako aj veľkosťou (mierkou) príslušného vlastného tvaru.

Model 1

V tomto modeli bol zahrnutý len vlastný tvar číslo 1. Maximálna veľkosť posunutia v imperfekcii je $u_1^{\text{Imp}} = 0.5$ mm. Koeficient c_1 bol $c_1 = 3.4409194$.

Model 2

Bolo v ňom aplikovaných prvých 5 vlastných tvarov, pričom maximálne posunutie pre jednotlivé imperfekcie bolo 0.5mm

$$u_1^{\text{Imp}} = u_2^{\text{Imp}} = u_3^{\text{Imp}} = u_4^{\text{Imp}} = u_5^{\text{Imp}} = 0.5 \text{ mm}.$$

Model 3

Tento model obsahoval prvých 20 vlastných tvarov. Maximálna výchylka posunutia pre prvý vlastný tvar bola 0.5mm

$$u_1^{\text{Imp}} = 0.5 \text{ mm}.$$

Maximálne posunutia uzlov pre vyššie vlastné tvary boli menšie.

III. SIMULÁCIA ZVÁRANIA – MODEL S IMPERFEKCIAMI, VÝSLEDKY RIEŠENÍ

Boli použité rovnaké parametre výpočtov ako na modeli bez imperfekcií. Rozdiel bol len v tvare siete (rozdielne súradnice uzlov prvkov).

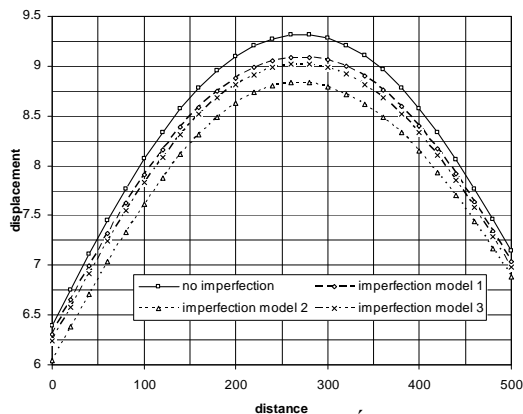
Maximálne hodnoty výsledných posunutí po simulácií zvarovania sú uvedené v tab.1.

	Max. výsledné posunutie [mm]
Model 0 (bez imperfekciami)	9.313
model 1 (s imperfekciami)	9.090
model 2 (s imperfekciami)	8.834
model 3 (s imperfekciami)	9.019

Tab.1.: Maximálne hodnoty posunutí po simulácií zvarovania

Obr.5 zobrazuje závislosť výsledných posunutí pozdĺž

vonkajšej hrany (rovnobežnej so zvarovou čiarou).



Obr.5.: Výsledná deformácia pozdĺž vonkajšej hrany

Malé rozdiely sú tiež v mieste maxím posunutí. Rozdiely teda nie sú len vo veľkosti, ale aj tvare deformácie. Pre lepšie zobrazenie rozdielov tvarov výsledných deformácií boli vypočítané rozdiely výsledkov výpočtov na modeli bez imperfekcií a jednotlivých modelov s imperfekciami ako

$$\Delta u_{im} = u_{im}^{Imp.model} - k_{im} \cdot u^{unimperf.model},$$

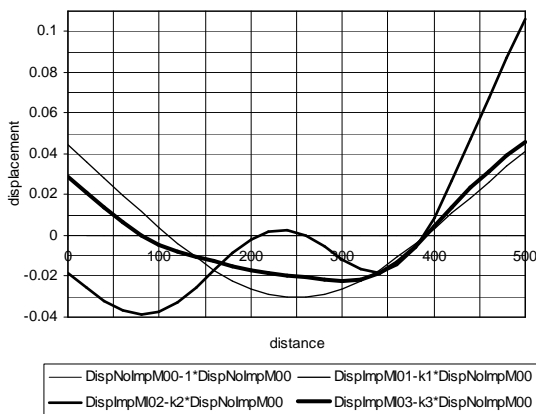
$$\Delta u_{im} = u_{im}^{Imp.model} - \frac{\int_l u_{im}^{Imp.model} dl}{\int_l u^{unimperf.model} dl} \cdot u^{unimperf.model},$$

kde im je číslo modelu s imperfekciami $im = 1, 2, 3$,

$u_{im}^{Imp.model}$ sú výsledné deformácie na im -tom modeli s imperfekciami, $u^{unimperf.model}$ sú výsledné posunutia na

modeli bez imperfekcií, l je krivka pozdĺž vonkajšej hrany (hrana rovnobežná so zvarovou čiarou). Výsledné rozdiely v tvare posunutí pre jednotlivé modely s imperfekciami v porovnaní s modelom bez imperfekcií sú zobrazené na obr.6.

Vypočítané parametre k_{im} pre zobrazenie boli $k_0 = 1$, $k_1 = 0.97915$, $k_2 = 0.94876$, $k_3 = 0.97082$.



Obr.6.: Rozdiely v tvare výsledných deformácií pozdĺž vonkajšej hrany

IV. ZÁVER

Pri modeloch s jednoduchou geometriou nie je nevyhnutné vytváranie imperfekcií. Dobre výsledky sú dosiahnuté v tomto prípade aj na konečnoprvkovej sieti bez imperfekcií. Imperfekcie je vhodné vytvárať na konečnoprvkových modeloch zložitejších tvarov. Prvý vlastný tvar je určujúci pre stabilitné správanie a výslednú distorziu po zvaraní, avšak zahrnutie vlastných tvarov vyššieho rádu môže spresniť vypočítaný tvar výslednej deformácie. Imperfekcie tvorené z vlastných tvarov vyššieho radu musia byť aplikované do konečnoprvkovej siete s rozdielnou váhou – súčiniteľmi pre jednotlivé tvary. Možno konštatovať, že aplikácia väčšieho počtu vlastných tvarov pri tvorbe imperfekcií spresňuje výpočet výslednej deformácie pri simulácii zvarovania metódou konečných prvkov.

EFERENCES

- [1] H. K. D. H. Bhadeshia, "Modelling of Phase Transformations in Steel Weld Metal," *Proceedings of ECOMAP '98* (Environment Concious Innovative Materials Processing), Kyoto, Japan, published by the High Temperature Society of Japan, 1998, pp. 35-44.
- [2] C. M. Davies, R. C. Wimpory, M. Béreš, M. P. Lightfoot, D. Dye, E. Oliver, N. P. O'Dowd, G. J. Bruce, K. M. Nikbin, "The Effect of Residual Stress and Microstructure on Distortion in Thin Welded Steel Plates," in *Proceedings of PVP2007 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference*, July 22-26, 2007, San Antonio, Texas.
- [3] D. Deng, H. Murakawa, "Prediction of welding distortion and residual stress in a thin plate butt-welded joint," *Computational Materials Science*, 2008, 43(2), pp. 353-365. 10.1016/j.commatsci.2007.12.006.
- [4] P. Élestős, "Thermal stresses at the extrusion of an infinite cylinder," in *International Journal of Mechanics and Solids*, vol.1,no.1, 2006.
- [5] K. Masubuchi, "Analysis of welded structures: residual stresses, distortion, and their consequences," 1980 *Pergamon Press*, Oxford.
- [6] P. Novák, J. Meško, M. Žmindák, "Thermal cycle and residual stresses in weld deposite," in *Machine modeling and simulations*. Žilina, 2009.
- [7] M. Tsunori, C. M. Davies, D. Dye, K. M. Nikbin, "Numerical Modelling of Residual Stress and Distortion in Thin Welded Steel Plates," in *Proceedings of PVP2008 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference*, July 27th-31st 2008, Chicago, Illinois, USA.