

E xperimentální 2005 A nalyza N apětí

A DEVELOPMENT OF THE HOLE DRILLING METHOD TO PLASTICITY FOR A THIN PLATE

ROZVOJ METODY VRTÁNÍ OTVORU DO OBLASTI PRUŽNĚ PLASTICKÝCH DEFORMACÍ V TENKÉ STĚNĚ

Karel Švaříček¹, Miloš Vlk²

The hole drilling method is a popular method for the residual stresses measuring. This method is developed only for elastic material properties. However, the stress concentration near the drilled hole can cause plasticity. This paper describes a development to the plasticity by using a neural network. The function of the neural network is an approximator between measured strains and evaluated residual stresses. The neural network is trained by values strains - stresses (inputs - outputs) obtained by a finite element method by using the program ANSYS. This development is performed for the thin plate.

Keywords

Residual stresses, hole-drilling method, neural network, plasticity, FEM

Zbytková napětí, metoda vrtání otvoru, neuronová síť, plasticita, MKP

Úvod

Zbytková napětí jsou napětí, která působí v součásti trvale bez vnějšího zatěžování jako důsledek předchozích technologických pochodů. Při vnějším silovém působení mohou tato zbytková napětí mít škodlivý nebo i užitečný vliv. Abychom mohli např. rozhodnout o tom, jak velké může být vnější zatížení, o volbě dalších technologií nebo kvalitativně posoudit mezní stav, je velmi důležité znát tato zbytková napětí. Pro měření zbytkové napjatosti existuje celá řada metod. Jednou z nejpoužívanějších pro svoji jednoduchost, přesnost a malé poškození měřené součásti je metoda vrtání otvoru, která je považována za semidestruktivní. Tato metoda umožňuje analyzovat makroskopickou rovinnou zbytkovou napjatost.

V současnosti je podstatným omezením metody vrtání otvoru možnost jejího použití pouze v oblasti pružných deformací. Avšak v důsledku koncentrace napětí v okolí vrtaného otvoru, dochází k pružně plastickým deformacím pro jednoosou napjatost teoreticky již při nominálním zbytkovém napětí rovném 0,33 násobku napětí na mezi kluzu. Pro smykovou a rovinnou rovnoměrnou napjatost teoreticky při 0,5 násobku napětí na mezi kluzu. Americká norma ASTM E 837-01 [3] uvádí, že zbytkové napětí nesmí překročit 1/2 napětí na mezi kluzu.

¹ Ing. Karel Švaříček: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně; Technická 2, 616 69 Brno, tel.: +420-5-41142804, e-mail: svaricek@umt.fme.vutbr.cz

² Doc. Ing. Miloš Vlk, CSc.: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně; Technická 2, 616 69 Brno, tel.: +420-5-41142886; e-mail: vlk@fme.vutbr.cz

Tento článek pojednává o prohloubení metody vrtání otvoru do oblasti, kdy dochází k pružně plastickým deformacím pro průchozí otvor v tenké stěně. Toto bude provedeno za pomoci neuronové sítě, která se předem natrénuje přiměřenou množinou tréninkových hodnot napětí / deformace. Tréninková množina bude stanovena numericky pomocí metody konečných prvků (MKP) v programu ANSYS. Rozsah zbytkových napětí, pro které budou vypočteny uvolněné deformace, bude volen do napětí na mezi kluzu s dostatečnou hustotou přírůstků v obou směrech rovnoběžných s povrchem. Neuronová síť, která zde bude plnit funkci aproximátoru, bude vytvořena pomocí programu MATLAB.

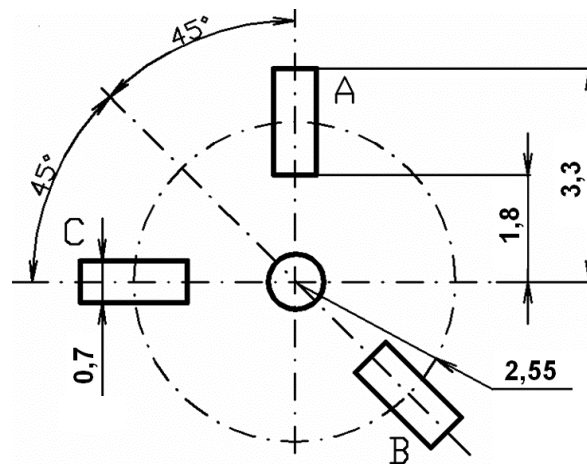
Metoda vrtání otvoru v současnosti

Metoda vrtání otvoru je založena na měření uvolněné deformace, která vznikne odvrátáním malého otvoru a je úměrná velikosti zbytkového napětí. Aby bylo možno určit dvě hlavní zbytková napětí a jejich směr, je k tomu zapotřebí změřit deformace ve třech různých směrech. Tyto deformace jsou obvykle měřeny pomocí tenzometrické růžice nalepené v místě měření před zahájením vlastního odvrátávání. Vztah mezi změřenou deformací a zbytkovým napětím je při splnění základních předpokladů (homogenní, izotropní, lineárně elastický materiál) lineární. Průměry otvorů se pohybují v rozmezí od 1 do 4 mm a hloubka otvoru se obvykle realizuje maximálně do 0,4 násobku středního průměru tenzometrické růžice.

Vztah mezi měřenou uvolněnou radiální deformací a napětím je dle [1]:

$$\varepsilon_r = -\frac{1+\mu}{2E}a(\sigma_I + \sigma_{II}) - \frac{b}{2E}(\sigma_I - \sigma_{II})\cos 2\alpha \quad (1)$$

- kde: ε_r je měřená uvolněná radiální deformace
 a, b jsou kalibrační koeficienty
 σ_I, σ_{II} jsou hlavní zbytková napětí
 α je úhel natočení měřené radiální deformace ε_r od osy σ_I hl. souř. syst.
 μ a E jsou materiálové charakteristiky



Obr. 1: Tenzometrická růžice RY 61 S firmy HBM

S využitím transformačních vztahů pro tři tenzometrické růžice:

$$P = \frac{\sigma_A + \sigma_C}{2}, \quad Q = \frac{\sigma_A - \sigma_C}{2}, \quad T = \tau_{AC} \quad (2)$$

$$p = \frac{\varepsilon_A + \varepsilon_C}{2}, \quad q = \frac{\varepsilon_A - \varepsilon_C}{2}, \quad t = \frac{\varepsilon_A + \varepsilon_C - 2\varepsilon_B}{2} \quad (3)$$

kde indexy A, B, C značí jednotlivé tenzometry tenzometrické růžice, získáme užitím (1) tři rovnice:

$$aP = -\frac{E}{1+\mu} p \quad (4)$$

$$bQ = -Eq \quad (5)$$

$$bT = -Et \quad (6)$$

z nichž po určení transformovaných napětí P, Q a T můžeme určit hledané zbytkové napětí a úhel jejich natočení takto:

$$\sigma_I, \sigma_{II} = P \pm \sqrt{Q^2 + T^2} \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \operatorname{arctg}\left(\frac{-T}{-Q}\right) = \frac{1}{2} \operatorname{arctg}\left(\frac{t}{q}\right) \quad (8)$$

Výše uvedené vztahy platí mimo jiné za předpokladu, že zbytkové napětí je v odvrátaném objemu homogenní a to jak po hloubce tak i v rovinách rovnoběžných s povrchem. Pokud je zbytkové napětí podstatně nehomogenní po hloubce materiálu, je nutno použít některou z metod pro určování nehomogenního zbytkového napětí po hloubce - např. integrální metodu uvedenou v [5] a [7]. Jinak určené zbytkové napětí podle vztahů (2) až (8) je rovno ekvivalentnímu konstantnímu zbytkovému napětí po hloubce a ne skutečnému.

Dalšími předpoklady jsou vrtaný otvor centrický se středem tenzometrické růžice, geometrie otvoru tvaru válce a rovinnost povrchu tělesa.

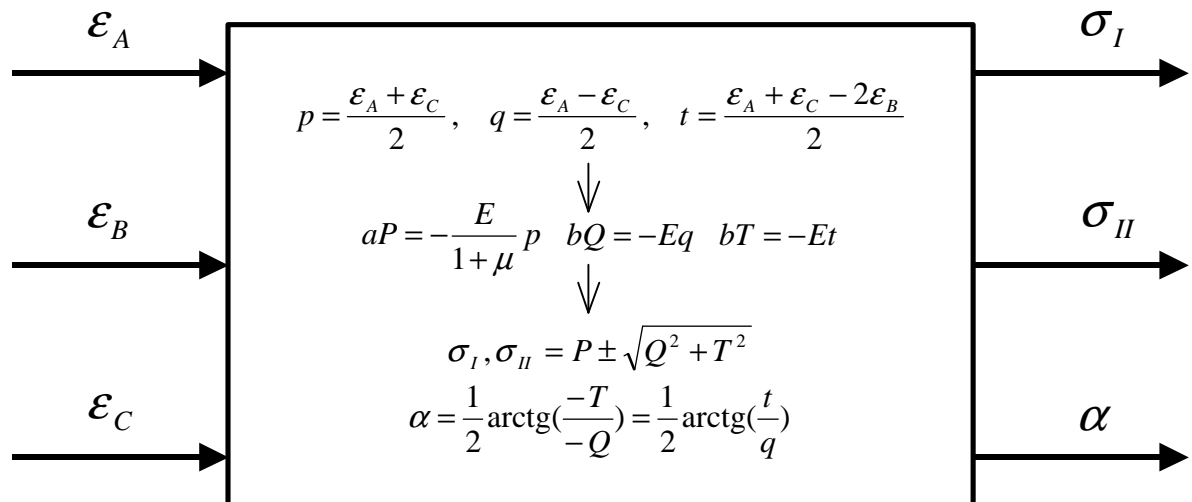
Dále je vhodné zavést předpoklad o dostatečně velkých rozměrech tělesa (tloušťka, šířka), aby těmito rozměry nebyla ovlivněna uvolněná deformace resp. kalibrační koeficienty a a b .

Nehomogenita zbytkového napětí po hloubce je tedy již úspěšně vyřešena. Nehomogenita zbytkového napětí v rovinách rovnoběžných s povrchem lze mnohdy považovat v tak malé odvrátané ploše za homogenní nebo lze řešit za předpokladu lineárně se měnícího napětí například dle [2]. Excentricita otvoru je úspěšně řešena jinými autory a odchylky ve tvaru geometrie otvoru lze pravděpodobně považovat za nepodstatné. Potom výrazným omezením této metody zůstává její použitelnost do hodnot zbytkových napětí rovných $\frac{1}{2}$ napětí na mezi kluzu.

Rozšíření metody vrtání otvoru do oblasti pružně plastických deformací

Pro případ, kdy dochází k pružně plastickým deformacím, již nelze odvodit jednoduché lineární vztahy mezi změřenou deformací a zbytkovým napětím jak bylo uvedeno výše. Rozšíření této metody do oblasti pružně plastických deformací by bylo možné například za pomoci aproximace dostatečného množství naměřených resp. vypočtených dvojic hodnot napětí / deformace. Tuto aproximaci bychom mohli provést např. vhodně zvolenou funkcí s neznámými koeficienty nebo za pomoci neuronové sítě. V dalším se zaměříme na použití

neuronové sítě. Vztahy mezi deformací a napětím (obr. 2) budou tedy nahrazeny neuronovou sítí (obr. 4).



Obr. 2: Algoritmus výpočtu zbytkového napětí pomocí metody vrtání otvoru v lineární oblasti

Předpoklady při určování zbytkového napětí v pružně plastické oblasti a cíl řešení

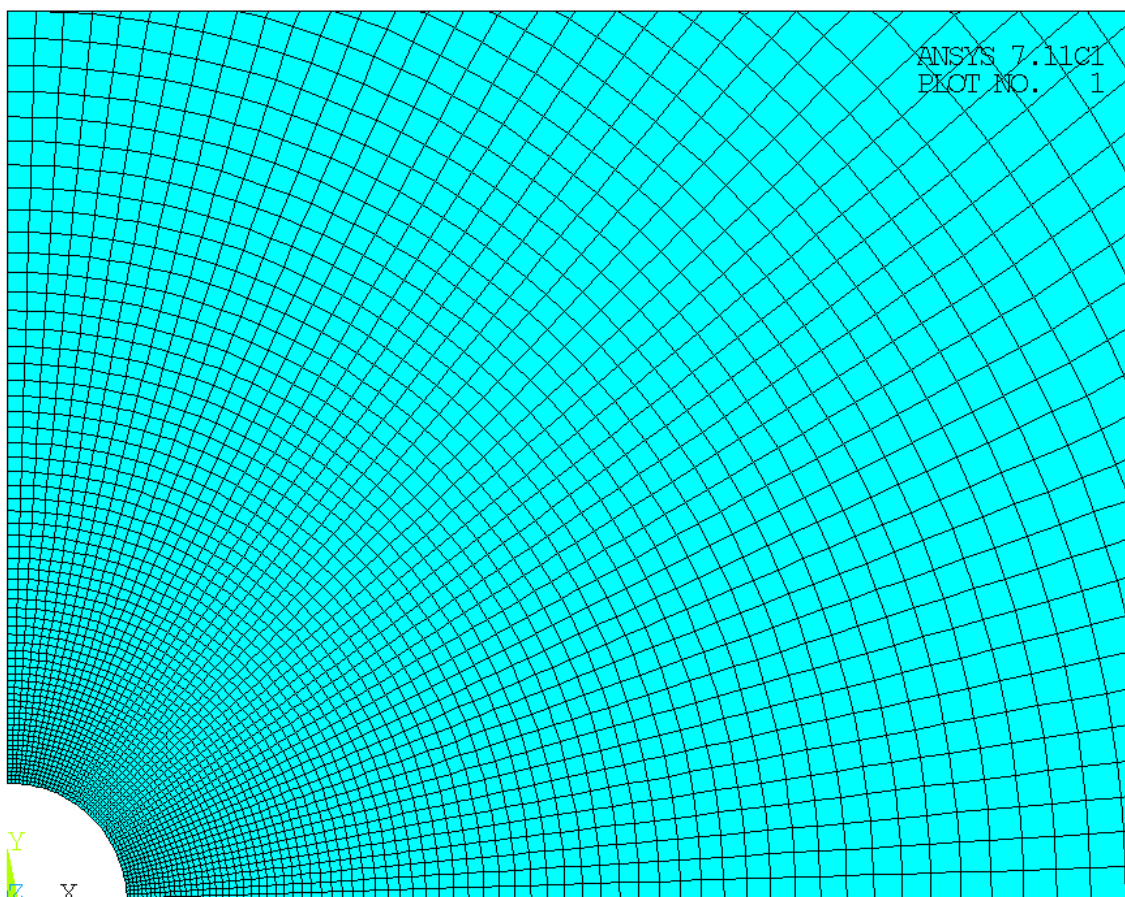
Závažnou otázkou bude na kolik nezávisle proměnných se omezíme. Budeme považovat za konstantní následující veličiny: průměr otvoru (1,6 mm), typ a velikost tenzometrické růžice (RY 61 S), materiálové charakteristiky homogenního izotropního materiálu (bilineární závislost $\sigma = f(\varepsilon)$ - $E_{el} = 210\,000$ MPa, $E_{pl} = 90\,000$ MPa, $Re = 450$ MPa, $\mu = 0,3$). Dále budeme předpokládat průchozí otvor v tenké stěně, dostatečně velké rozměry tělesa, aby vypočtené výsledky nebyly rozměry ovlivněny a homogenní zbytkové napětí v rovině kolmé k ose otvoru. Nezávisle proměnnými tedy budou pouze naměřené deformace ve třech různých směrech.

Cílem tedy je navrhnout neuronovou síť (typ, topologii, aktivační funkce, váhové a prahové koeficienty) takovou, aby odchylky výstupů této neuronové sítě od požadovaných výstupů tréninkové množiny, která bude určena pomocí MKP a bude dostatečně popisovat reálný stav, byly minimální. Stejně tak odchylka požadovaných výstupů od skutečných pro testovací množinu (tj. pro množinu na kterou nebyla neuronová síť trénována) by měla být minimální.

MKP model

Pro výpočet uvolněných deformací pro simulované zbytkové napětí byl vytvořen vhodný dvojrozměrný MKP model odpovídající rovině povrchu tělesa. Vhodnost tohoto modelu byla ověřena provedením citlivostní analýzy na určení velikosti tělesa, počtu elementů a na určení střední hodnoty deformace ve směru osy tenzometrické mřížky přes jeho plochu. Podrobnější rozbor návrhu MKP modelu je proveden v [4] a [5], zde jsou použity stejné postupy. Pro lepší konvergenci výpočtu je použito deformačního zatížení namísto silového.

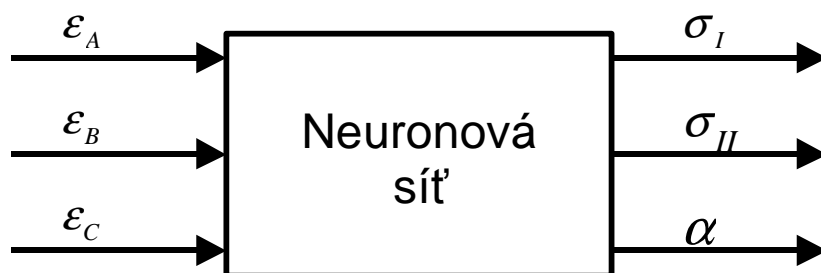
MKP model a výpočet byl proveden v programu ANSYS. Geometrie a topologie prvků tohoto modelu je znázorněna na obr. 3. Takto vytvořený model obsahuje 7 500 prvků a 23 000 uzlů.



Obr. 3: Geometrie a topologie prvků MKP modelu

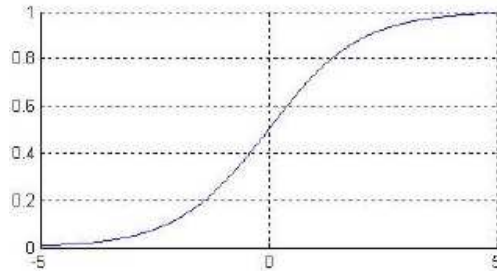
Model neuronové sítě – vstupy, výstupy, typ, topologie a aktivační funkce

Nezávisle proměnné (vstupy) budou tři měřené deformace ($\varepsilon_A, \varepsilon_B, \varepsilon_C$) a závisle proměnné (výstupy) budou dvě hlavní napětí a úhel jejich natočení ($\sigma_I, \sigma_{II}, \alpha$) tak jak ukazuje obr. 4.



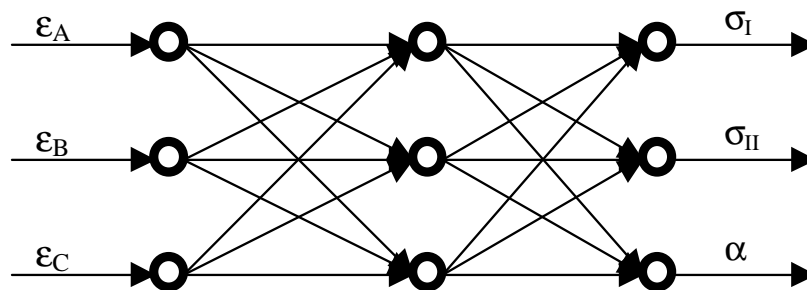
Obr. 4: Neuronová síť pro určování zbytkového napětí

Vzhledem k tomu, že neuronovou síť budeme využívat jako aproximátoru, lze použít dopředné úplné vícevrstvé neuronové sítě se třemi vrstvami neuronů a aktivačními funkcemi tvaru sigmoidy (obr. 5). Pro výstupní vrstvu, na které požadujeme konkrétní hodnoty použijeme funkci lineární závislosti.



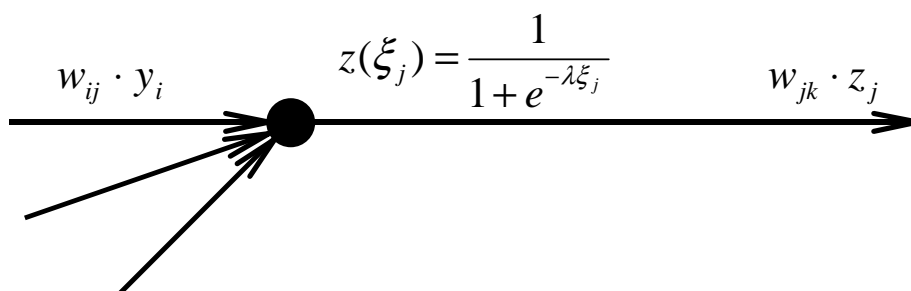
Obr. 5: Graf standardní sigmoidy

Rozhodující bude počet neuronů skryté vrstvy. Čím bude počet neuronů v této vrstvě vyšší, bude po natrénování odchylka od tréninkové množiny na výstupu menší, může se tím však zvýšit odchylka od testovací množiny. Výchozí struktura neuronové sítě pro určování homogenní napjatosti po hloubce materiálu a průchozí otvor je znázorněna na obr. 6.



Obr. 6: Topologie neuronové sítě pro určování zbytkového napětí

Obr. 7 ukazuje činnost neuronu a synapsí (spojů neuronů) např. skryté vrstvy. Zatímco neuron plní činnost aktivační funkce zde např. sigmoidy, synapse přenáší vzruchy (hodnoty aktivačních funkcí) na další neurony s váhovým koeficientem w . Vytvoření, trénování a simulace neuronové sítě je provedeno pomocí programu MATLAB.

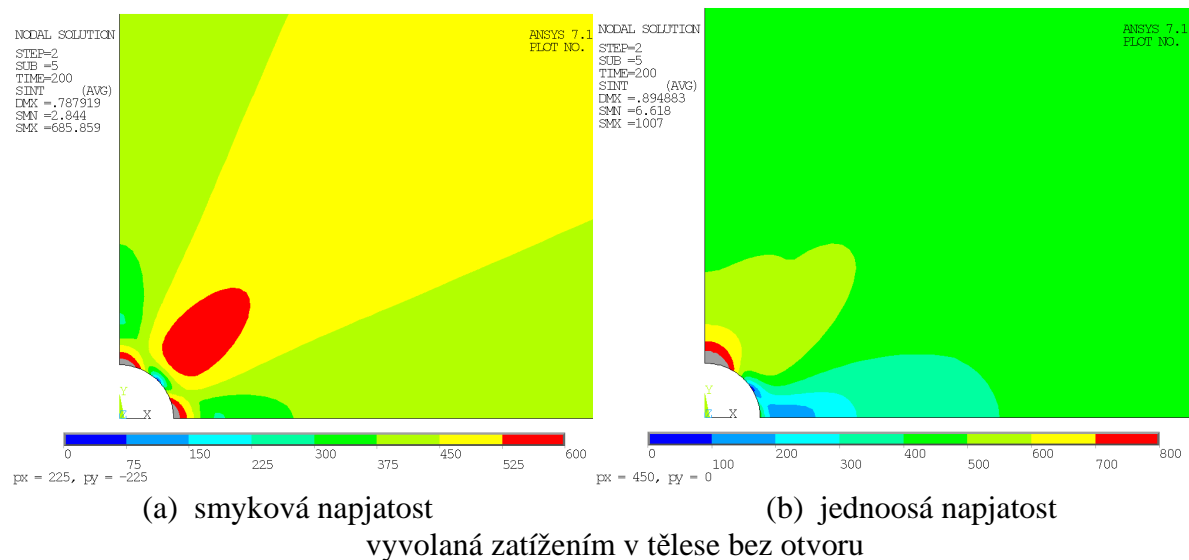


Obr. 7: Znázornění jednoho neuronu neuronové sítě

- w_{ij} jsou hledané váhové koeficienty
- y, z jsou aktivační funkce (sigmoidy – viz obr. 5)
- λ je parametr strmosti sigmoidy – určuje nelineární nárůst sigmoidy v okolí nuly, tj. míru rozhodnosti neuronu. Obvykle se uvažuje $\lambda = 1$.
- $\xi_j = \sum_i w_{ij} y_i + b_j$
- b je hledaný prahový koeficient.

Tréninková množina

Tréninková množina je stanovena výpočtem pomocí uvedeného MKP modelu. Pro různá zatížení byly určeny deformace. Deformační zatížení byla volena tak, aby vypočtené uvolněné deformace ve směru hlavních os tvořily pole s rovnoměrným krokem $60 \mu\text{m}/\text{m}$ této uvolněné deformace. Hodnota maximálního zatížení byla volena tak, aby se zbytkové napětí (napětí v tělese bez otvoru) co nejvíce blížilo napětí na mezi kluzu. Deformace je určována pro různá natočení – od 0 do 180 stupňů. Pro rovnoměrnou napjatost je deformace určena jen pro úhel 0 stupňů – pro ostatní směry při této napjatosti jsou deformace stejné a zahrnutím těchto hodnot do tréninkové množiny bychom dostali nejednoznačné řešení. Takto vytvořená tréninková množina tvoří 1750 šestic (3 vstupy, 3 výstupy).



Obr. 8: Redukované napětí pružně – plasticky deformujícího se tělesa s otvorem při zatížení odpovídající nominálnímu redukovanému napětí rovnému napětí na mezi kluzu

Trénování neuronové sítě

Cílem trénování je nalézt optimální váhové a prahové koeficienty neuronové sítě a tím minimalizovat celkovou chybu neuronové sítě $E(\mathbf{w})$. Chyba sítě $E_l(\mathbf{w})$ vzhledem k l -tému tréninkovému vzoru je úměrná součtu mocnin odchylek skutečných hodnot na výstupu neuronové sítě od požadovaných hodnot na výstupu (od hodnot z tréninkové množiny) u tohoto vzoru.

$$E_l(\mathbf{w}) = \frac{1}{2} \sum_l \left[\left\| \mathbf{z}(\boldsymbol{\varepsilon}_l, \mathbf{w}) - \boldsymbol{\sigma}_l \right\|^2 \right] \quad (9)$$

- Kde:
- $\mathbf{z}(\boldsymbol{\varepsilon}_l, \mathbf{w})$ je vektor skutečných výstupů z neuronové sítě
 - \mathbf{w} je matice všech váhových a prahových koeficientů
 - $\boldsymbol{\varepsilon}_l$ je vektor $(\varepsilon_A, \varepsilon_B, \varepsilon_C)$ vstupních hodnot
 - $\boldsymbol{\sigma}_l$ je vektor $(\sigma_I, \sigma_{II}, \alpha)$ požadovaných výstupů (tréninkové množiny).

Celková chyba $E(\mathbf{w})$ sítě je pak definována jako součet všech odchylek jednotlivých tréninkových vzorů $E_i(\mathbf{w})$. Před trénováním jsou váhy a prahové koeficienty nastaveny náhodně, blízko nuly. K trénování neuronové sítě je použita gradientní metoda Backpropagation.

Během trénování neuronové sítě se ukázalo, že je vhodné použít čtvrtý vstup, kterým je odhad úhlu natočení hlavních napětí určený z uvolněných deformací podle vztahu (8) platného v lineární oblasti. Toto přispělo ke zvýšení přesnosti výstupů z neuronové sítě (určovaných zbytkových napětí a úhlu jejich natočení).

Postupným zvyšováním počtu neuronů ve skryté vrstvě a opakovaným trénováním byl určen dostatečný počet neuronů skryté vrstvy na 40. Vyšší počet těchto neuronů poskytl přesnější natrénování, ovšem chyba při simulaci testovací množiny se tím výrazně zvyšovala. Průměrná odchylka požadovaných výstupů od skutečných pro tréninkovou množinu je 0,8 MPa, resp. 0,1° a maximální odchylka je 11 MPa, resp. 1,5°. Maximální odchylka (11 MPa) je při hodnotě redukováného zbytkového napětí rovném 95% napětí na mezi kluzu. Několik hodnot požadovaných výstupů a výstupů natrénované sítě je uvedeno v tab. 1.

Požadované napětí na výstupu neuronové sítě			Skutečné napětí na výstupu neuronové sítě			Odchylka požadovaného a skutečného výstupu		
σ_1	σ_2	α	σ_1	σ_2	α	$\Delta\sigma_1$	$\Delta\sigma_2$	$\Delta\alpha$
[MPa]	[MPa]	[1]	[MPa]	[MPa]	[1]	[MPa]	[MPa]	[1]
447	117	0	448	118	0	1	1	0
447	117	11	448	119	11	1	2	0
447	117	23	448	116	23	1	1	0
447	117	34	447	116	34	0	1	0
447	117	45	445	116	45	2	1	0
447	117	56	445	117	56	2	0	0
447	117	68	446	116	68	1	1	0
447	117	79	448	118	78	1	1	1
87	-339	0	84	-340	0	3	1	0
87	-339	11	88	-339	12	1	0	1
87	-339	23	89	-337	22	2	2	1
87	-339	34	82	-342	34	5	3	0
87	-339	45	76	-344	45	11	5	0
87	-339	56	83	-342	56	4	3	0
87	-339	68	91	-338	67	4	1	1
87	-339	79	87	-340	79	0	1	0
411	9	11	409	7	11	2	2	0
411	9	0	411	9	0	0	0	0
411	9	11	408	8	11	3	1	0
411	9	23	411	9	23	0	0	0
411	9	34	412	8	34	1	1	0
411	9	45	413	10	45	2	1	0
411	9	56	412	8	56	1	1	0
411	9	68	412	10	67	1	1	1
411	9	79	409	7	79	2	2	0

Tab. 1: Porovnání požadovaných a skutečných výstupů neuronové sítě tréninkové množiny

Ověření neuronové sítě simulací testovací množinou

Pro ověření zda takto vytvořená a natrénovaná neuronová síť má dostatečnou predikci, byly provedeny další výpočty se zatížením, které vyvolalo takové zbytkového napětí, které neobsahuje tréninková množina. Zatížení byla volena tak, aby uvolněné deformace byly v polovině intervalů uvolněných deformací pro trénování sítě (očekávána největší chyba). Určené deformace byly položeny na vstup sítě a byly porovnány výsledky výstupů sítě („změřené“ zbytkové napjatosti) a požadovaných výstupů (skutečné zbytkové napjatosti). Část těchto výsledků ukazuje tabulka 2. Testovací množina obsahuje 1350 vektorů (vstupů a výstupů). Průměrná odchylka požadovaných výstupů od skutečných pro testovací množinu je 0,8 MPa, resp. 0,1° a maximální odchylka je 21 MPa, resp. 1,4°. Maximální odchylka (21 MPa) je při hodnotě redukováného zbytkového napětí rovném 99% napětí na mezi kluzu.

Požadované napětí na výstupu neuronové sítě			Skutečné napětí na výstupu neuronové sítě			Odchylka požadovaného a skutečného výstupu		
σ_1	σ_2	α	σ_1	σ_2	α	$\Delta\sigma_1$	$\Delta\sigma_2$	$\Delta\alpha$
[MPa]	[MPa]	[1]	[MPa]	[MPa]	[1]	[MPa]	[MPa]	[1]
443	49	0	442	46	1	1	3	1
443	49	15	443	53	15	0	4	0
443	49	30	442	48	30	1	1	0
443	49	45	432	43	45	11	6	0
443	49	60	439	52	60	4	3	0
443	49	75	444	51	74	1	2	1
190	-276	0	186	-278	0	4	2	0
190	-276	15	191	-275	15	1	1	0
190	-276	30	190	-277	30	0	1	0
190	-276	45	192	-278	45	2	2	0
190	-276	60	191	-277	60	1	1	0
190	-276	75	189	-278	75	1	2	0
-51	-446	0	-49	-446	1	2	0	1
-51	-446	15	-55	-444	15	4	2	0
-51	-446	30	-45	-440	30	6	6	0
-51	-446	45	-30	-436	45	21	10	0
-51	-446	60	-49	-442	60	2	4	0
-51	-446	75	-57	-443	75	6	3	0
430	350	0	430	350	0	0	0	0
430	350	15	430	350	15	0	0	0
430	350	30	430	350	30	0	0	0
430	350	45	430	350	45	0	0	0
430	350	60	431	349	60	1	1	0
430	350	75	431	349	75	1	1	0

Tab. 2: Porovnání požadovaných a skutečných výstupů neuronové sítě testovací množiny

Závěr

Jedním z největších omezení metody vrtání otvoru je možnost jejího použití k měření zbytkových napětí přibližně jen do ½ napětí na mezi kluzu. Tento článek rozvíjí použitelnost této metody do oblastí, kdy dochází v okolí vrtaného otvoru k pružně plastickým deformacím a to až do hodnot zbytkových napětí odpovídajících napětím na mezi kluzu. Je zde ukázáno, že použití neuronové sítě k tomuto rozvoji coby aproximátoru množiny hodnot určených uvolněných deformací a odpovídajících hledaných zbytkových napětí je možným řešením. Neuronová síť byla mj. vytvořena pro případ průchozího otvoru v tenké stěně. Maximální odchylka požadovaných výstupů (zbytkových napětí) z neuronové sítě od skutečných výstupů (zbytkových napětí) z neuronové sítě je pro tréninkovou množinu 11 MPa, resp. 1,5° a pro testovací množinu, tj. pro hodnoty na které neuronová síť nebyla natrénována 21 MPa, resp. 1,4°. Lze říci, že toto jsou přijatelné odchylky pro praxi a neuronová síť otevírá nový směr rozvoje metody vrtání otvoru do oblastí pružně plastických deformací a tím umožňuje měření vyšších hladin zbytkových napětí než doposud bylo možné.

Literatura

- [1] Schajer, G.S.: *Measurement of Non-Uniform Residual Stresses Using the Hole-Drilling Method. Part I, II*, Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 110, pp. 338-349, 1988
- [2] Luh, G.C. and Hwang, R.M.: *Measuring Non-Uniform Residual Stress in Thin Plates by a Proposed Hole-Drilling Strain Gauge Method*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 15, No. 2, pp. 103-113, 1999
- [3] ASTM Designation E 837-01, *Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain Gage Method*, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States, 2001, pp. 1-10
- [4] Švaříček, K.: *Determination of the Calibration Coefficients through the FEM for Measurement of the Uniform Residual Stress by the Hole-Drilling Method*, Experimental Stress Analysis 2003, 41st International Conference, pp. 101-102, 2003
- [5] Švaříček K., Vlk M.: *Rozvoj odvrtávací metody pro měření zbytkové napjatosti*, Grant FRVŠ, číslo projektu: 1529/2004, 2005
- [6] Švaříček K., Vlk M.: *Zhodnocení použitelnosti ASTM E 837 – 01 pro tenzometrickou růžici RY 61 S*, sborník 7. konf. Applied Mechanics 2005, Hrotovice, s. 105-106, 2005
- [7] Švaříček K., Vlk M.: *Porovnání procedury ASTM E 837-01 a integrální metody pro výpočet zbytkové napjatosti nehomogenní po hloubce*, sborník 11. konf. Inženýrská mechanika 2005, Svratka, 2005