



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

**NUMERICKÁ SIMULACE ODVRTÁVACÍ METODY
PRO ZJIŠŤOVÁNÍ ZBYTKOVÉ NAPJATOSTI**

**NUMERICAL SIMULATION OF THE HOLE DRILLING
METHOD FOR RESIDUAL STRESS MEASUREMENT**

Zkrácená verze PhD Thesis

Obor

Inženýrská mechanika

Autor práce

Ing. Dávid Halabuk

Školitel

doc. Ing. Tomáš Návrat, Ph.D.

Brno 2022

Kľúčové slová

zvyškové napätia, odvrtavacia metóda, výpočtové modelovanie, metóda konečných prvkov, chyby vyhodnotených zvyškových napätí, korekcia vyhodnotených zvyškových napätí

Keywords

residual stresses, hole-drilling method, numerical simulation, finite element method, error of evaluated residual stresses, correction of evaluated residual stresses

Miesto uloženia práce

Vysoké učení technické v Brně
Fakulta strojního inženýrství
Technická 2896/2
616 69 Brno

Obsah

Úvod	5
1 Vymedzenie riešenej problematiky a ciele dizertačnej práce.....	5
2 Súčasný stav poznania	6
2.1 Zvyškové napätia	6
2.2 Odvrtavacia metóda	6
2.3 Vyhodnotenie homogénnych zvyškových napätí	8
2.4 Vyhodnotenie nehomogénnych zvyškových napätí	8
3 Výpočtový model odvrtavacej metódy	9
4 Kalibračné koeficienty pre odvrtavaciu metódu.....	10
5 Meranie zvyškových napätí vo valcových telesách	11
6 Meranie zvyškových napätí na telesách s nenulovým zvyškovým napätím pôsobiacim v smere kolmom na povrch meraného telesa.....	14
7 Meranie homogénnych zvyškových napätí pri uvažovaní plastických deformácií v okolí odvrtaného otvoru	17
Záver	27
Zoznam použitej literatúry	28
Životopis autora.....	29
Abstrakt	30
Abstract	30

Úvod

V technickej praxi je pri navrhovaní a posudzovaní funkčnosti či životnosti komponentov potrebné zohľadniť množstvo rôznych faktorov. Jedným z takýchto faktorov sú aj zvyškové napätia, ktoré môžu byť prítomné v materiáli daného komponentu.

Jednou z najpoužívanejších metód na meranie zvyškových napätí je odvrťavacia metóda, ktorá je založená na vyvrtaní malého otvoru do posudzovaného telesa, vďaka čomu dôjde k prerozdeleniu zvyškových napätí a k vzniku deformácií v okolí odvrťaného otvoru. Tieto deformácie sú zmerané a na ich základe je spätne dopočítané zvyškové napätie, ktoré v danom mieste pôsobilo. Odvrťavacia metóda funguje pri splnení predpokladov, pre ktoré je odvodená, veľmi dobre a je schopná relatívne presne určiť zvyškové napätia v malých hĺbkach pod povrchom skúmaného telesa. Pri praktických aplikáciách tejto metódy, ale často dochádza k prípadom, kedy nie sú splnené všetky požadované predpoklady, a preto môže pri meraní dochádzať k chybnému vyhodnoteniu zvyškových napätí.

1 Vymedzenie riešenej problematiky a ciele dizertačnej práce

Aby mohla byť odvrťavacia metóda korektne používaná pre meranie zvyškových napätí v technickej praxi, je dôležité vedieť, do akej miery sú vyhodnotenú zvyškové napätia ovplyvnené odchýlením sa od ideálneho stavu, pre ktorý je táto metóda odvodená a vymedziť tak hranice, v rámci ktorých môže byť táto metóda spoľahlivo používaná. Hlavným cieľom dizertačnej práce bolo preto preskúmanie stavov, kedy nie je splnený niektorý z požadovaných predpokladov odvrťavacej metódy, zistenie vplyvu nesplnenia tohto predpokladu na vyhodnotenie zvyškových napätí a prípadné navrhnutie postupu, ako by bolo možné odvrťavaciu metódu modifikovať tak, aby bol eventuálny negatívny vplyv minimalizovaný alebo úplne eliminovaný.

Na riešenie vytýčených problémov bolo používané výpočtové modelovanie pomocou metódy konečných prvkov. Preto musel byť najskôr vytvorený výpočtový model umožňujúci simuláciu odvrťavacej metódy pre rôzne geometrické a materiálové konfigurácie meraného telesa pri uvažovaní rôznych pôsobiacich zvyškových napätí.

Pretože pri vyhodnocovaní zvyškových napätí z pomerných deformácií meraných pomocou tenzometrickej ružice sú potrebné kalibračné koeficienty, ďalším cieľom bolo určenie týchto koeficientov pre všetky metódy vyhodnocovania zvyškových napätí, tenzometrické ružice a geometrie odvrťavaného otvoru používané v tejto práci.

S viacerými z predpokladov odvrťavacej metódy sa už v minulosti zaoberalo mnoho autorov, preto sa dizertačná práca zameriava na tie, ktoré ešte neboli uspokojivo vyriešené alebo existuje pochybnosť o správnosti ich riešenia a zároveň sú v dnešnej dobe častým predmetom diskusií. Konkrétne sa jednalo o:

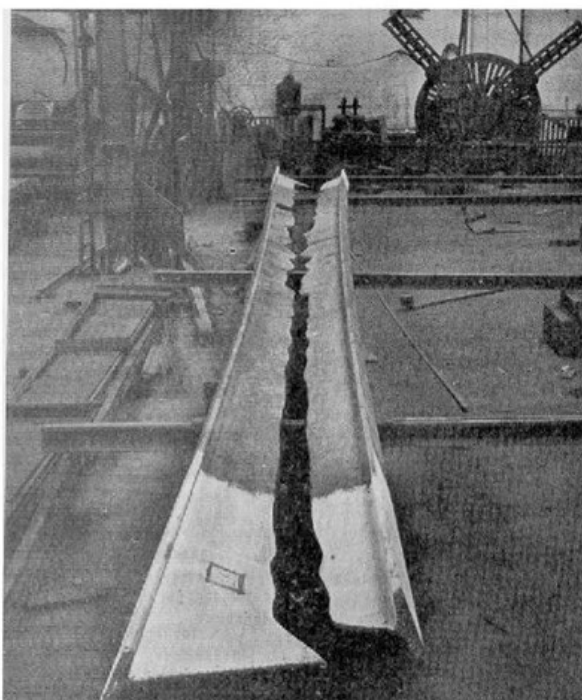
- predpoklad o rovinnosti povrchu meraného telesa,
- predpoklad o nanajvyš dvojsovej napätosti s orientáciou zvyškových napätí v rovinách rovnobežných s povrchom meraného telesa,
- a predpoklad, že pri odvrťaní otvoru nedochádza v meranom materiáli k tvorbe plastických deformácií.

2 Súčasný stav poznania

2.1 Zvyškové napätia

Zvyškové napätia sú napätia, ktoré pôsobia v telese bez prítomnosti vonkajšieho zaťaženia. Môžu byť spôsobené predchádzajúcimi technologickými operáciami pri výrobe alebo spracovaním daného komponentu. Taktiež môžu byť dôsledkom predchádzajúceho zaťaženia telesa, ktoré bolo dostatočne veľké na to, aby vyvolalo v telese trvalé deformácie [1].

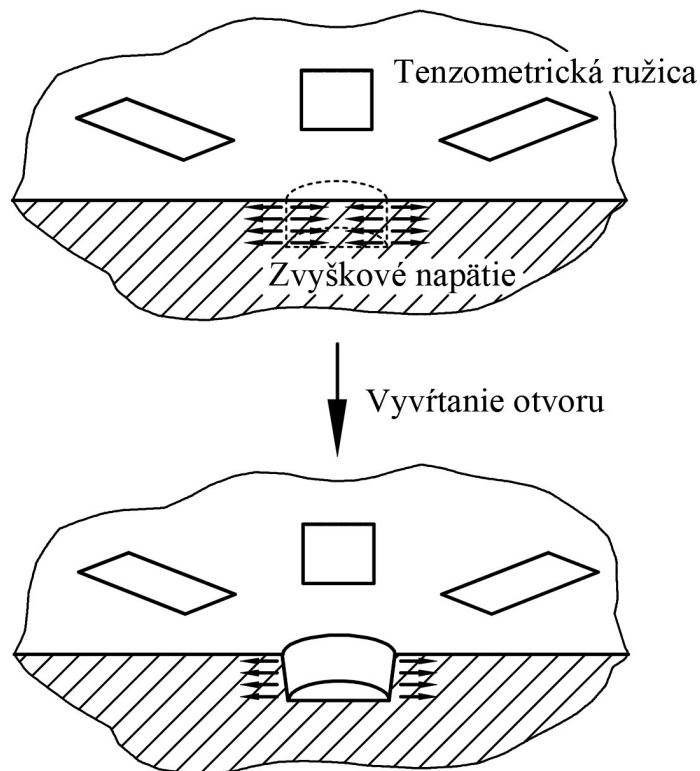
Prítomnosť zvyškového napätia môže mať ako pozitívny, tak aj negatívny vplyv, ktorý je závislý na veľkosti, orientácii a rozložení zvyškových napätí, preto je dôležité vedieť tieto napätia s dostatočnou mierou presnosti merať (Obr. 1) [2]. V súčasnosti existuje viacero rozličných metód na meranie zvyškových napätí, založených na rozličných princípoch.



Obr. 1 Prasknutie nosníku vďaka prítomným zvyškovým napätiam [3]

2.2 Odvrtavacia metóda

Odvrtavacia metóda je jednou z často používaných metód slúžiacich na meranie zvyškových napätí v malých vzdialenostiach pod povrchom telesa, pretože jej zásah do skúmaného telesa je minimálny, metóda je pomerne presná a samotné meranie nie je potrebné vykonávať v laboratórnych podmienkach [4]. Táto metóda je založená na vyvrtaní otvoru malého priemeru do skúmaného telesa (priemer 1–4 mm, hĺbka 0,5–2 mm), čo má za následok prerozdelenie zvyškových napätí, ich čiastočné uvoľnenie a vznik deformácií v okolí odvrtného otvoru (obr. 2). Deformácie sú zmerané najčastejšie pomocou tenzometrickej ružice alebo v niektorých prípadoch aj opticky a na ich základe je spätne dopočítané zvyškové napätie, ktoré pôsobilo v mieste odvrtného otvoru [5].



Obr. 2 Znáročnenie princípu odvrtavacej metódy [6]

Aby platili vzťahy, na základe ktorých je odvodená odvrtavacia metóda a bolo tak zaručené jej korektné použitie, musia byť splnené nasledovné predpoklady [4, 5]:

- meraný materiál je homogénny, izotropný, lineárne pružný,
- v meranom telese je nanajvýš dvojsová napätosť, pričom zvyškové napätie musí byť orientované v rovinách rovnobežných s povrchom telesa (napätie orientované v smere kolmom na povrch telesa musí byť nulové),
- pri odvrtaní otvoru nedochádza v meranom materiáli k tvorbe plastických deformácií,
- zvyškové napätie je v dostatočnej vzdialenosti od vyvrtaného otvoru homogénne v rovinách rovnobežných s povrchom meraného telesa,
- merané teleso má rovinný povrch,
- otvor je do telesa vyvrtaný centricky vzhľadom k stredu tenzometrickej ružice,
- vyvrtaný otvor má valcový tvar s osou kolmou na povrch meraného telesa,
- vyvrtaný otvor je v dostatočnej vzdialenosti od okraja meraného telesa, od otvorov, drážok alebo iných geometrických nespojitostí,
- hrúbka meraného telesa je dostatočne veľká, pokiaľ je vrtaný slepý otvor alebo dostatočne malá, pokiaľ je vrtaný priečhodný otvor,
- okolie odvrtavaného otvoru nie je tepelne ovplyvnené odvrtávaním,
- a procesom vrtania otvoru nie sú do telesa vnášané ďalšie zvyškové napätia.

2.3 Vyhodnotenie homogénnych zvyškových napätí

Pokiaľ sú zvyškové napätia určované v telesách s väčšou hrúbkou, je do meraného telesa vrtný nepriechodný otvor, pričom k odvrtniu finálnej hĺbky väčšinou dochádza po niekoľkých krokoch. Po každom i -tom prírastku hĺbky otvoru sú zmerané pomerné deformácie z jednotlivých tenzometrických mriežok $\varepsilon_{A,i}$, $\varepsilon_{B,i}$ a $\varepsilon_{C,i}$, ktoré môžu byť upravené do podoby [7]:

$$p_i = \frac{\varepsilon_{C,i} + \varepsilon_{A,i}}{2} \quad q_i = \frac{\varepsilon_{C,i} - \varepsilon_{A,i}}{2} \quad t_i = \frac{\varepsilon_{C,i} + \varepsilon_{A,i} - 2\varepsilon_{B,i}}{2} \quad (1)$$

Pri pôsobení homogénneho zvyškového napätia, tzn. napätia ktoré je s hĺbkou odvrtného otvoru približne konštantné, je možné spočítať parametre P , Q a T ako [7]:

$$P = -\frac{E}{(1 + \mu)} \frac{\sum_i (\bar{a}_i \cdot p_i)}{\sum_i \bar{a}_i^2} \quad Q = -E \frac{\sum_i (\bar{b}_i \cdot q_i)}{\sum_i \bar{b}_i^2} \quad T = -E \frac{\sum_i (\bar{b}_i \cdot t_i)}{\sum_i \bar{b}_i^2} \quad (2)$$

kde E je modul pružnosti meraného materiálu v ťahu, μ je Poissonov pomer a \bar{a} , \bar{b} sú kalibračné konštanty nezávislé na meranom materiáli. Pre výpočet napätí σ_A , σ_C a τ_{AC} pôsobiacich v smere tenzometrických mriežok A a C, hlavných napätí σ_I a σ_{II} a uhlu natočenia hlavného napätia σ_I od tenzometrickej mriežky A je následne možné použiť rovnice [7]:

$$\sigma_A = P - Q \quad \sigma_C = P + Q \quad \tau_{AC} = T \quad (3)$$

$$\sigma_{I,II} = P \pm \sqrt{Q^2 + T^2} \quad \beta = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{-T}{-Q} \right) \quad (4)$$

2.4 Vyhodnotenie nehomogénnych zvyškových napätí

V technickej praxi sa často objavujú prípady, kedy nie je zvyškové napätie po hĺbke odvrtného otvoru konštantné. Z toho dôvodu bolo v minulosti navrhnutých niekoľko metód, ktoré sú schopné vyhodnotiť aj nehomogénne zvyškové napätia po hĺbke odvrtného otvoru. Jednou z takýchto metód je integrálna metóda, ktorá je implementovaná aj v norme ASTM E837-20 [7]. Táto metóda je založená na predpoklade, že pomerné deformácie merané na povrchu telesa pri odvrtní určitej hĺbky otvoru sú rovné súčtu jednotlivých vplyvov čiastkových zvyškových napätí pôsobiacich vo všetkých predchádzajúcich odvrtných hĺbkach. Parametre P_j , Q_j a T_j definujúce napätie pôsobiace v j -tom prírastku hĺbky otvoru môžu byť spočítané pomocou rovníc:

$$p_i = \frac{(1 + \mu)}{E} \sum_{j=1}^{j=i} \bar{a}_{ij} P_j \quad q_i = \frac{1}{E} \sum_{j=1}^{j=i} \bar{b}_{ij} Q_j \quad t_i = \frac{1}{E} \sum_{j=1}^{j=i} \bar{b}_{ij} T_j \quad (5)$$

kde \bar{a}_{ij} a \bar{b}_{ij} sú kalibračné koeficienty vyjadrujúce vplyv zvyškových napätí pôsobiacich v j -tom prírastku hĺbky pri i -tom odvrtnom prírastku hĺbky na pomerné deformácie merané na povrchu telesa. Napätia pôsobiace v smere tenzometrických mriežok, hlavné napätia a uhol β , môžu byť následne spočítané pre každú odvrtnú hĺbku pomocou obdobných rovníc ako pri výpočte homogénnych zvyškových napätí.

3 Výpočtový model odvrtavacej metódy

Konečnoprvkový model určený na simuláciu odvrtavacej metódy bol vytvorený v programe ANSYS, pričom k simulácii samotného odvrtavania dochádzalo pomocou postupného deaktivovania konečných prvkov predstavujúcich odvrtavaný prírastok hĺbky otvoru.

Model geometrie pozostával z telesa v ktorom bolo simulované zvyškové napätie a z telies, ktoré predstavovali tenzometrické mriežky tenzometrickej ružice a slúžili na vyhodnocovanie pomerných deformácií. Základné rozmery simulovaného telesa je možné vidieť na obr. 3. Nakoľko bola geometria, zaťaženie ako aj výsledky symetrické, výpočtový model pozostával len z $\frac{1}{4}$ celého posudzovaného telesa.

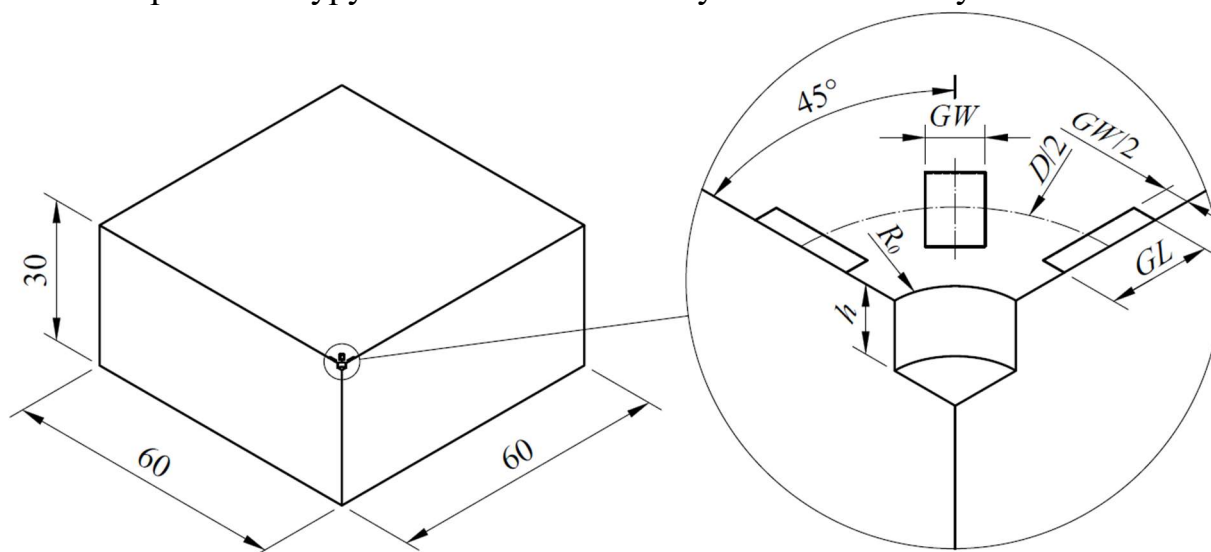
V závislosti na druhu analýzy boli pri simuláciách používané dva modely materiálov odvrtavaného telesa. Pri analýzach, kde nebol skúmaný vplyv plastických deformácií vznikajúcich v okolí odvrtavaného otvoru na vyhodnotené zvyškové napätia, bol použitý lineárne pružný izotropný model materiálu definovaný modulom pružnosti v ťahu E a Poissonovým pomerom μ . Pri simuláciách pružne-plastického správania materiálu, bol použitý bilineárny izotropný model materiálu s kinematickým spevnením, ktorý vyžaduje okrem modulu pružnosti a Poissonovho pomeru aj medzi klzu materiálu R_e a tangenciálny modul spevnenia E_T . Materiál telies predstavujúcich tenzometrické mriežky mal lineárne pružné izotropné správanie, pričom modul pružnosti týchto telies bol nastavený na malú hodnotu, aby ich tuhosť neovplyvňovala pomerné deformácie na povrchu vyhodnocovaného telesa.

Napätie v simulovanom telese, ktoré modelovalo skúmané zvyškové napätie, bolo vytvorené pomocou tlaku zadaného na okrajové plochy telesa pred vytvorením odvrtavaného otvoru. Na plochy ležiace v rovinách symetrií boli zadané nulové posuvy v normálovom smere na tieto roviny a nulový posuv bol taktiež zadaný do jedného bodu na spodnej ploche modelu, aby bol zamedzený pohyb simulovaného telesa ako celku. Pretože pri meraní zvyškových napätí sú tenzometrické mriežky prilepené k povrchu meraného telesa, bol medzi telesami predstavujúcimi tenzometrické mriežky a odvrtavaným telesom nastavený kontakt typu *Bonded*, ktorý vytvoril medzi telesami pevné spojenie.

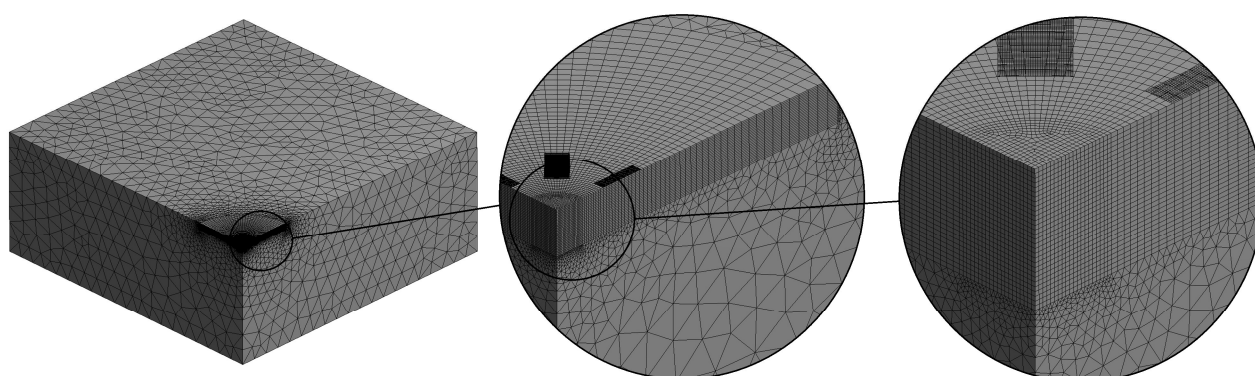
V oblasti odvrtaného otvoru, ako aj v jeho okolí, bola vytvorená jemná pravidelná sieť tvorená kvadratickými prvkami SOLID186. Veľkosť konečných prvkov sa postupne smerom od odvrtavaného otvoru zväčšovala a v dostatočnej vzdialenosti, kde nedochádzalo k ovplyvňovaniu výsledkov potrebných pre vyhodnocovanie, bola vytvorená voľná sieť (obr. 4). Telesá, ktoré predstavovali tenzometrické mriežky, boli tvorené zo škrupinových kvadratických prvkov typu SHELL281.

Na vyhodnotenie pomerných deformácií z telies predstavujúcich tenzometrické mriežky bol pripravený skript, ktorý po každom prírastku odvrtanej hĺbky otvoru spočítal priemernú hodnotu pomerných deformácií z týchto telies a po skončení simulácie zapísal výsledné hodnoty do textového súboru. Pri simuláciách zahrňujúcich plastické deformácie v okolí odvrtaného otvoru bolo ukladané celé pole pomerných deformácií v okolí odvrtavaného otvoru, ktoré bolo následne spracované

v programe MATLAB, aby mohli byť efektívne vyhodnotené hodnoty pomerných deformácií pre rôzne typy a natočenia uvažovaných tenzometrických ružíc.



Obr. 3 Základné rozmery simulovaného telesa (prevzaté a upravené z [6])



Obr. 4 Sieť konečných prvkov výpočtového modelu

4 Kalibračné koeficienty pre odvrťavaciu metódu

Pre výpočet homogénneho ako aj nehomogénneho zvyškového napätia sú potrebné kalibračné koeficienty, ktoré sú závislé na použitej tenzometrickej ružici a geometrii odvrťavaného otvoru. Pretože pri odvrťavaní nepriechodného otvoru musia byť tieto kalibračné koeficienty počítané pomocou metódy konečných prvkov, bol na tento účel využitý výpočtový model opísaný v predchádzajúcej kapitole.

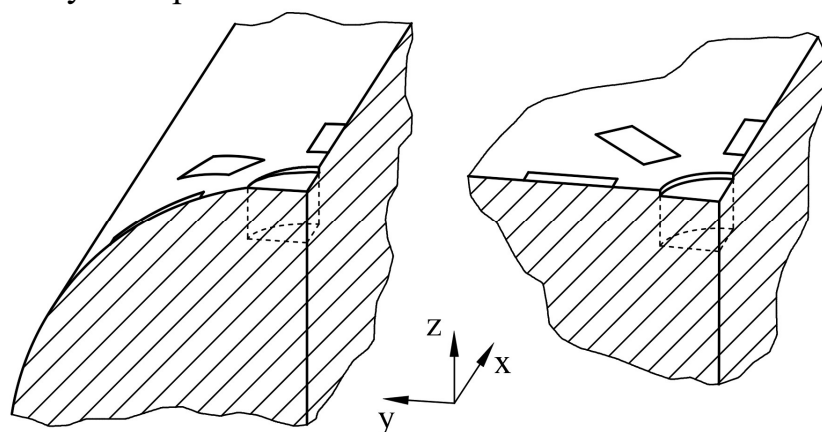
Kalibračné koeficienty pre výpočet homogénneho zvyškového napätia boli počítané pre viaceré tenzometrické ružice a geometrie odvrťavaného otvoru, čo následne umožnilo vytvorenie zobecneného vzťahu pre určenie kalibračných koeficientov v danom rozsahu hĺbok a priemerov odvrťavaného otvoru, a to pre 6 najčastejšie používaných tenzometrických ružíc.

Pretože pri simuláciách nehomogénneho zvyškového napätia bola v tejto práci uvažovaná len jedna tenzometrická ružica a jedna geometria odvrťavaného otvoru, bola pomocou výpočtového modelu spočítaná len jedna sada kalibračných koeficientov určených na výpočet nehomogénneho zvyškového napätia pomocou integrálnej metódy.

5 Meranie zvyškových napätí vo valcových telesách

V praktických aplikáciách sa často objavujú prípady, kedy je potrebné merať zvyškové napätie vo valcových súčiastkach. Odvrtavacia metóda je ale odvodená len pre telesá s rovinným povrchom, preto môže pri jej použití na telesá so zakriveným povrchom dohádzať ku chybné vyhodnoteným zvyškovým napätiam.

Problematikou merania zvyškových napätí v telesách so zakriveným povrchom sa v minulosti už zaoberalo niekoľko autorov [8, 9]. Všetci títo autori ale používajú pri simuláciách odvrtavacej metódy postup, pri ktorom aplikujú zaťaženie do odvrtavaného otvoru. Tento postup je bežne používaný pri simuláciách telies s rovinným povrchom, ale pri odvrtávaní otvoru na valcových telesách je správnosť tohto postupu otázna, pretože odvrtávaný otvor nemá valcový tvar a nedochádza k rovnomernému úberu materiálu po celom obvode otvoru (obr. 5). Cieľom práce preto bolo posúdiť vplyv valcového povrchu telesa na vyhodnocovanie zvyškových napätí pri simulovaní odvrtavacej metódy bez aplikovania zaťaženia do odvrtavaného otvoru.



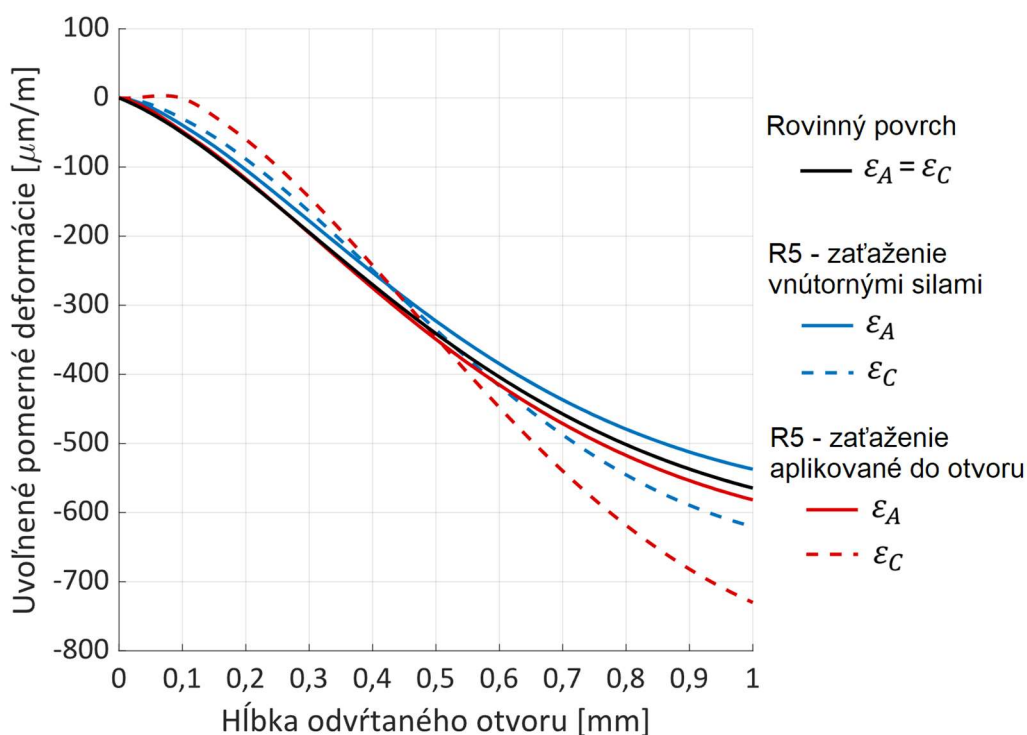
Obr. 5 Odvrtávanie prvého prírastku hĺbky otvoru na valcovom telese (vľavo) a telese s rovinným povrchom (vpravo)

Aby mohla byť daná problematika riešená, musel byť výpočtový model opísaný v kap. 3 mierne upravený. Okrem geometrie telesa v ktorom bolo simulované zvyškové napätie, bol upravený aj tvar telies predstavujúcich tenzometrické mriežky, aby tieto telesá kopírovali valcový povrch skúmaného telesa.

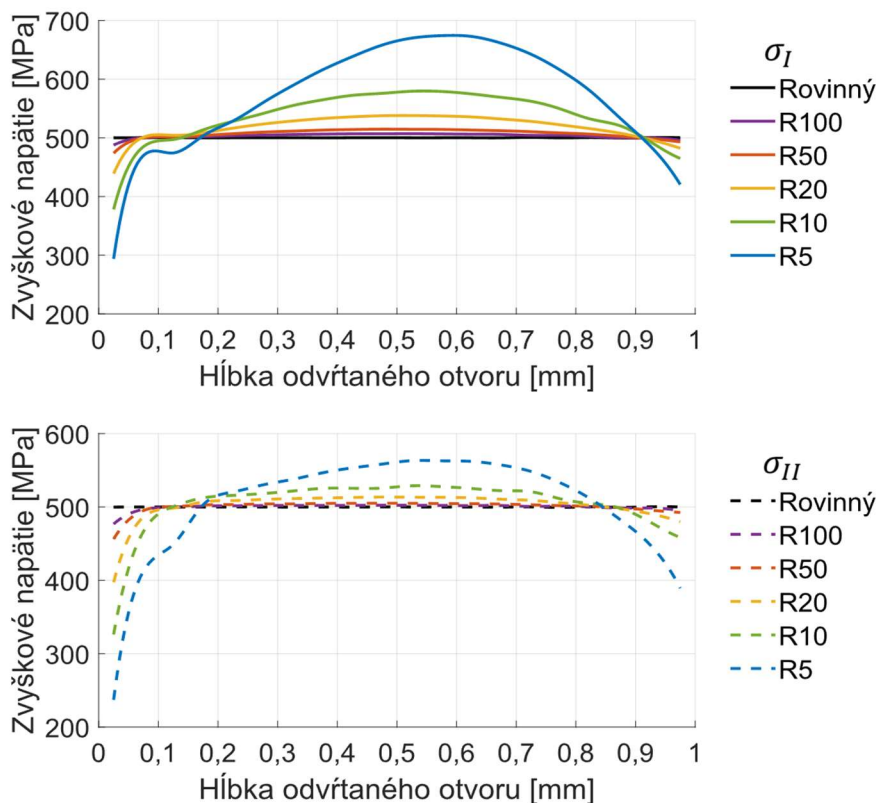
Pretože pri uvažovaní valcového telesa nie je možné korektne vyvodit' simulované zvyškové napätie pomocou okrajových podmienok zadávaných na povrch odvrtavaného otvoru, ani na okrajové plochy modelu, musel byť na vytvorenie požadovanej napätosti v skúmanom telese navrhnutý nový postup. Jeden z aspektov, ktorý tento postup musel vyriešiť, bola prítomnosť radiálneho napätia v simulovanom telese. Pri pôsobení radiálneho napätia nie je splnený ďalší z predpokladov odvrtavacej metódy, čo môže ovplyvniť veľkosť uvoľnených deformácií pri odvrtávaní otvoru a skresliť tak získané výsledky zo simulácií. Aby bol tento efekt eliminovaný, bol navrhnutý postup, pri ktorom sa pomocou nerovnomerného rozloženia teploty a rotácie telesa vyvodí vo valcovom telese taký stav napätosti, že v oblasti odvrtavaného otvoru dôjde k vzájomnej eliminácii radiálnych zložiek napätí od teplotného zaťaženia a zaťaženia objemovými silami vyvolanými rotáciou, pričom tangenciálna zložka napätia bude mať požadovanú hodnotu.

Pomocou metódy odvrtavania otvoru je možné vyhodnocovať len zvyškové napätia pôsobiace v rovine rovnobežnej s povrchom telesa. Preto boli pri uvažovaní valcového telesa posudzované stavy napätosti, kedy v telese pôsobí zvyškové napätie v axiálnom smere, v tangenciálnom smere a v axiálnom a tangenciálnom smere zároveň, pričom každý z týchto stavov bol simulovaný pre dva druhy napätosti: homogénne a nehomogénne zvyškové napätie po hĺbke odvrtávaného otvoru. Aby mohla byť zistená závislosť chyby vyhodnotených zvyškových napätí na polomere zaoblenia valcového povrchu, bolo pre každý napätový stav simulovaných 5 rôznych telies s vonkajším polomerom 5, 10, 20, 50 a 100 mm a jedno referenčné teleso s rovinným povrchom.

Z výsledkov simulácií zobrazených na obr. 6 je vidieť, že pomerné deformácie získané z valcových telies so zaťažením aplikovaným do odvrtávaného otvoru sa líšia od pomerných deformácií získaných z valcových telies s napätosťou vytvorenou pomocou navrhovaného postupu. To potvrdzuje predpoklad, že aplikovanie zaťaženie do odvrtávaného otvoru nie je správnym postupom pri simuláciách odvrtavacej metódy na valcových telesách. V grafe na obr. 6 sú vykreslené aj pomerné deformácie získané z telesa s rovinným povrchom. Napriek tomu že pri telese s rovinným aj valcovým povrchom bolo simulované rovnaké napätie, pomerné deformácie sa od seba líšia, čo má za následok rozdielne hodnoty vyhodnotených zvyškových napätí (obr. 7).



Obr. 6 Uvoľnené pomerné deformácie vyhodnotené z telesa s rovinným povrchom (čierna čiara), z telesa s valcovým povrchom so zaťažením vnútornými silami (modrá čiara) a z telesa s valcovým povrchom so zaťažením aplikovaným na povrch odvrtávaného otvoru (červená čiara)



Obr. 7 Vyhodnotenú zvyškové napätia pri pôsobení axiálneho a tangenciálneho homogénneho zvyškového napätia po hĺbke odvírtavaného otvoru

Z výsledkov simulácií bolo zistené, že so zmeňujúcim sa polomerom valcového telesa narastá chyba vyhodnotených zvyškových napätí, pričom najväčšia chyba bola pri všetkých telesách zaznamenaná po odvírtaní prvého prírastku hĺbky otvoru. Rozloženie zvyškových napätí po hĺbke odvírtavaného otvoru sa nezdá byť veľmi významným faktorom, pretože chyby mali skoro totožnú hodnotu pri pôsobení homogénnych aj nehomogénnych zvyškových napätí. Naopak smer pôsobenia zvyškového napätia mal vplyv na vyhodnotenú zvyškové napätia, nakoľko väčšie chyby vznikali pri pôsobení tangenciálnych napätí než pri pôsobení axiálnych napätí. Priemernú a maximálnu relatívnu chybu vyhodnotených zvyškových napätí počítanú zo všetkých simulovaných stavov napätí pre jednotlivé typy telies je možné vidieť v tab. 1.

Tab. 1 Relatívne chyby vyhodnotených zvyškových napätí pre rôzne valcové telesá

Zaoblenie povrchu	Všetky prírastky hĺbky otvoru		Bez prvého prírastku hĺbky otvoru	
	Priemerná relatívna chyba [%]	Maximálna relatívna chyba [%]	Priemerná relatívna chyba [%]	Maximálna relatívna chyba [%]
Rovinný	0,03	0,20	0,03	0,20
R100	0,61	4,70	0,50	2,29
R50	1,21	9,00	0,99	4,51
R20	3,03	21,20	2,52	11,34
R10	6,03	37,80	5,11	23,65
R5	12,37	55,40	10,91	51,73

Výsledky uvedené v tab. 1 môžu byť použité pre odhad chyby pri meraní zvyškových napätí alebo pre určenie minimálneho prípustného polomeru valcového telesa, na ktorom je ešte možné s požadovanou presnosťou merať zvyškové napätia pomocou odvítavacej metódy.

Aby bolo možné presnejšie vyhodnocovať zvyškové napätia aj na valcových telesách s malým polomerom zaoblenia povrchu, bol navrhnutý alternatívny postup pre výpočet tangenciálneho a axiálneho homogénneho zvyškového napätia. Tento postup používa štyri kalibračné koeficienty namiesto tradične používaných dvoch, pretože ako bolo zistené, pri vyhodnocovaní napätí pôsobiacich vo valcových telesách je potrebné zohľadniť rozdielnosť uvoľnených deformácií v tangenciálnom a axiálnom smere. Pokiaľ bude mať radiálne napätie zanedbateľnú hodnotu, je možné pre výpočet axiálneho a tangenciálneho homogénneho zvyškového napätia pôsobiaceho vo valcovom telese použiť navrhované rovnice:

$$\sigma_t = \frac{E}{(1 + \mu)} \cdot \frac{\sum_i \left(\frac{\varepsilon_{a,i} \cdot C_{t,i}^a - \varepsilon_{t,i} \cdot C_{a,i}^a}{C_{a,i}^t \cdot C_{t,i}^a - C_{t,i}^t \cdot C_{a,i}^a} \right)}{n} \quad (6)$$

$$\sigma_a = \frac{E}{(1 + \mu)} \cdot \frac{\sum_i \left(\frac{\varepsilon_{a,i} \cdot C_{t,i}^t - \varepsilon_{t,i} \cdot C_{a,i}^t}{C_{a,i}^a \cdot C_{t,i}^t - C_{t,i}^a \cdot C_{a,i}^t} \right)}{n} \quad (7)$$

kde $\varepsilon_{a,i}$ a $\varepsilon_{t,i}$ sú pomerné deformácie merané tenzometrickou mriežkou orientovanou v axiálnom a tangenciálnom smere pre i -tý prírastok hĺbky otvoru, n je počet prírastkov hĺbky otvoru a $C_{a,i}^a$, $C_{t,i}^a$, $C_{a,i}^t$ a $C_{t,i}^t$ sú kalibračné koeficienty.

Testovanie navrhovaného postupu preukázalo, že pri použití štyroch kalibračných koeficientov je možné pomerne presne vyhodnotiť zvyškové homogénne napätia pôsobiace aj vo valcových telesách s veľmi malým polomerom zaoblenia povrchu.

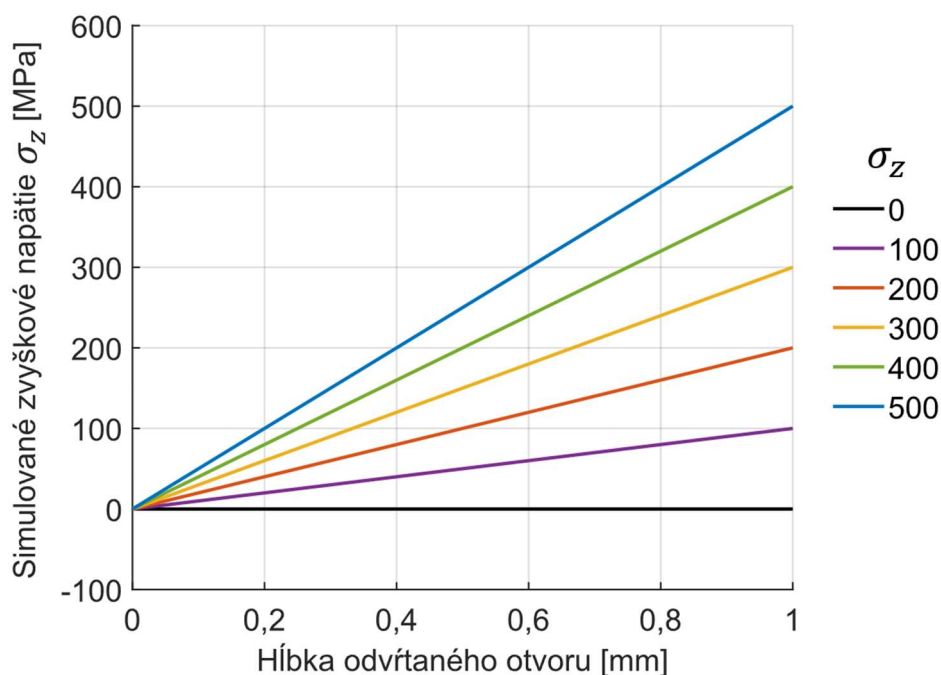
6 Meranie zvyškových napätí na telesách s nenulovým zvyškovým napätím pôsobiacim v smere kolmom na povrch meraného telesa

Všetky metódy na vyhodnocovanie zvyškových napätí z pomerných deformácií meraných pri odvítavaní otvoru sú založené na predpoklade, že v skúmanom telese je nanajvyš dvojsový stav napätosti s napätiami orientovanými v rovine rovnobežnej s povrchom meraného telesa a že napätie kolmé na povrch skúmaného telesa je nulové alebo dostatočne malé na to, aby neovplyvňovalo presnosť vyhodnocovania zvyškových napätí. Niektoré technologické procesy ale môžu spôsobiť stav napätosti, kedy je v meranom materiáli prítomné aj zvyškové napätie pôsobiace v smere kolmom na povrch meraného telesa.

Pretože doposiaľ nie je známa žiadna publikácia, ktorá by sa zaoberala vplyvom zvyškového napätia pôsobiaceho v smere kolmom na povrch meraného telesa v súvislosti s meraním zvyškových napätí pomocou odvítavacej metódy, bola táto problematika podrobená skúmaniu.

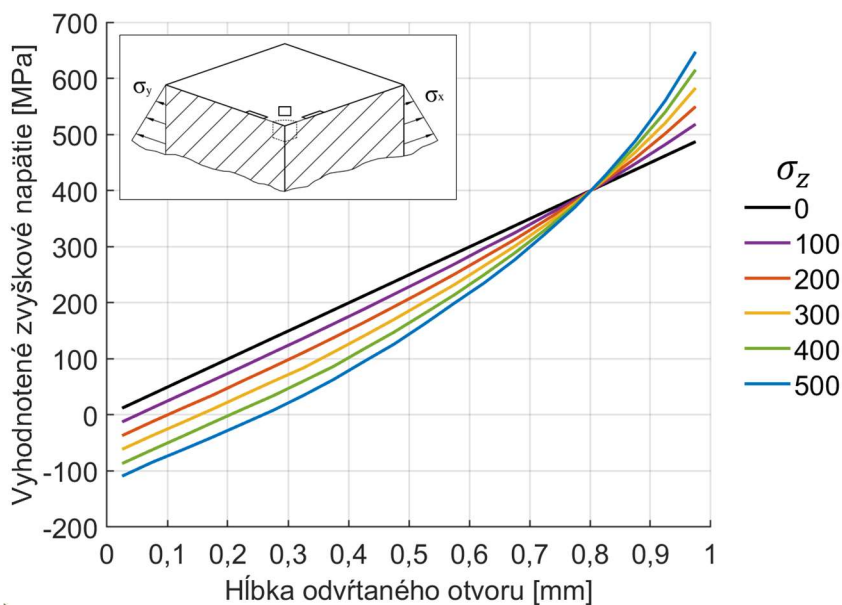
Na simuláciu telies s prítomným zvyškovým napätím pôsobiacim v smere kolmom na povrch meraného telesa bol použitý rovnaký výpočtový model ako pri simuláciách valcových telies. Aby vyhodnocované pomerné deformácie neboli ovplyvnené chybou zaoblenia odvrávaného povrchu, boli pre každý simulovaný stav vytvorené dva modely: model s požadovaným radiálnym, tangenciálnym a axiálnym napätím a model s rovnakou geometriou ale len s tangenciálnym a axiálnym pôsobiacim napätím. Porovnaním pomerných deformácií z týchto dvoch modelov, bol následne zistený vplyv napätia pôsobiaceho v smere kolmom na povrch meraného telesa na uvoľnené pomerné deformácie.

Aby bolo možné zistiť vplyv zvyškového napätia pôsobiaceho v smere kolmom na povrch odvrávaného telesa (σ_z) na vyhodnotenie napätí pôsobiacich v rovine rovnobežnej s povrchom telesa (σ_x a σ_y), bolo simulovaných 5 stavov napätosti s nenulovým napätím σ_z a jeden referenčný stav, kedy bolo napätie σ_z nulové (obr. 8). Pretože v technickej praxi nie je povrch telesa pri meraní väčšinou nijako zaťažovaný, mali simulované napätia σ_z pri všetkých stavoch nulovú hodnotu na povrchu telesa, ktorá s hĺbkou odvrávaného otvoru lineárne narastala. Napätia σ_x a σ_y mali pri všetkých simulovaných stavoch rovnakú hodnotu, pričom priebeh týchto napätí po hĺbke odvrávaného otvoru bol buď konštantný (500 MPa) alebo lineárne narastal s odvrávanou hĺbkou (0 MPa na povrchu skúmaného telesa, 500 MPa v hĺbke 1 mm).



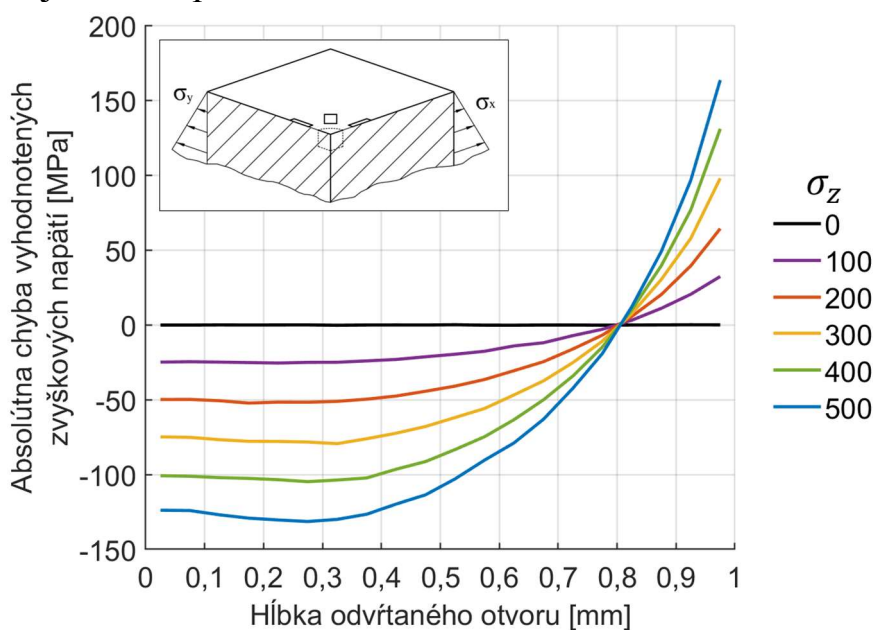
Obr. 8 Priebeh zvyškového napätia σ_z v simulovanom telese

Vyhodnotenú zvyškové napätia pre stavy s lineárne sa meniacim napätím σ_x a σ_y po hĺbke odvrávaného otvoru je možné vidieť na obr. 9. Pre prípad, kedy v simulovanom telese nepôsobilo zvyškové napätie σ_z odpovedali vyhodnotenú napätia σ_x a σ_y simulovaným hodnotám. Pri stavoch s nenulovým zvyškovým napätím σ_z , sa odchýlka medzi vyhodnotenými a simulovanými napätiami zväčšovala so zväčšujúcou sa hodnotou pôsobiaceho napätia σ_z .



Obr. 9 Vyhodnotené zvyškové napätia σ_x a σ_y pre stavy s nehomogénnym zvyškovým napätím σ_x a σ_y a rôznymi hodnotami zvyškového napätia σ_z

Po vykreslení chýb pre jednotlivé stavy napätosti bolo zistené, že chyba vyhodnotených zvyškových napätí nezávisí na rozložení ani na veľkosti napätí pôsobiacich v rovine rovnobežnej s povrchom meraného telesa (σ_x a σ_y), ale je závislá len na napätí pôsobiacom v smere kolmom na povrch meraného telesa (σ_z). Konkrétne veľkosť týchto chýb pre rôzne napätia σ_z je možné vidieť na obr. 10. Keďže tieto chyby dosahujú pomerne vysokých hodnôt, mala by byť odvrávací metóda používaná len v prípadoch, kedy je možné predikovať, že v meranom telese nie sú prítomné zvyškové napätia pôsobiace v smere kolmom na povrch meraného telesa alebo majú tieto napätia len zanedbateľne malú hodnotu.



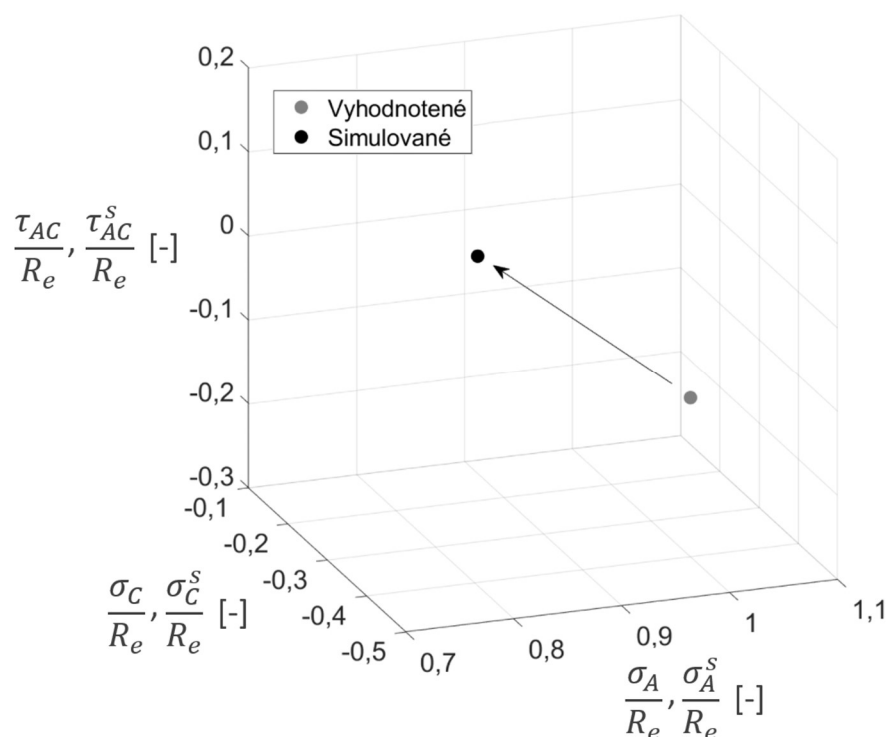
Obr. 10 Chyba vyhodnotených zvyškových napätí σ_x a σ_y pre stavy s nehomogénnym zvyškovým napätím σ_x a σ_y a rôznymi hodnotami zvyškového napätia σ_z

7 Meranie homogénnych zvyškových napätí pri uvažovaní plastických deformácií v okolí odvrátaného otvoru

Pri vrtaní otvoru do povrchu meraného telesa pôsobí tento otvor ako koncentrátor napätia, preto môže pri pôsobení väčších zvyškových napätí dôjsť k tvorbe plastických deformácií v okolí odvrátaného otvoru. Pretože odvrávací spôsob uvažuje len s uvoľnenými elastickými deformáciami, výsledné vyhodnotenú napätie je pri meraní elasto-plastických deformácií zaťažené chybou.

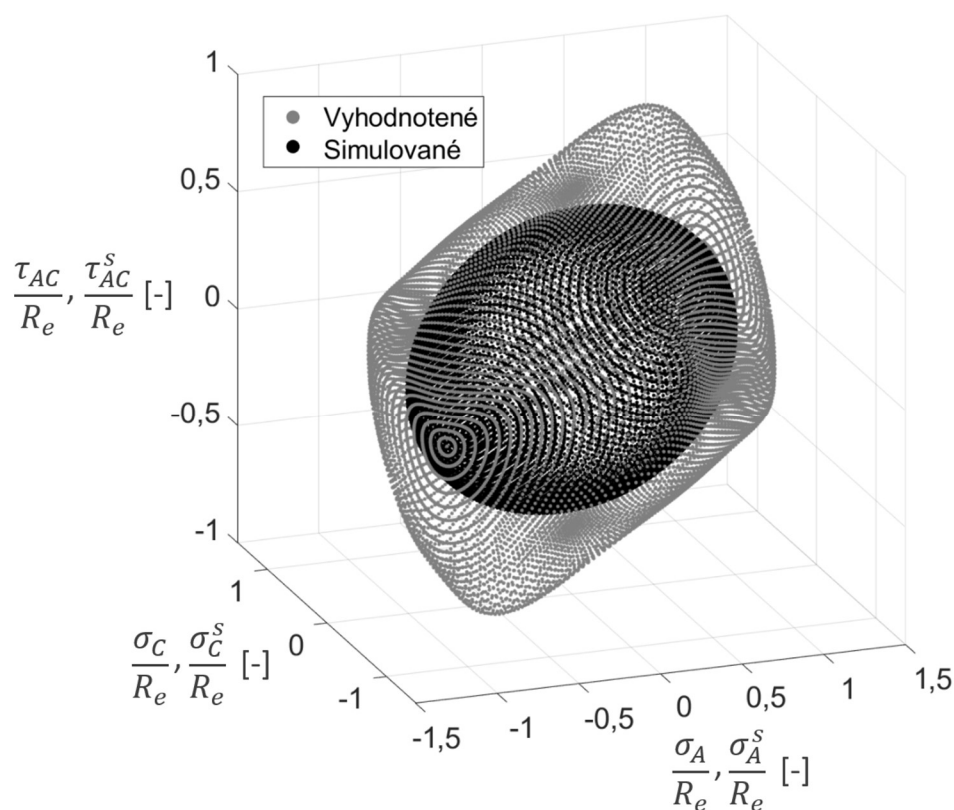
Viacero autorov sa v minulosti snažilo navrhnúť postup, pomocou ktorého by bolo možné vyhodnotiť zvyškové napätia s prítomnosťou plastických deformácií v okolí odvrávaného otvoru [10–12]. Postupy navrhované týmito autormi ale vyžadujú buď špecifický priebeh zvyškových napätí, znalosť hlavných smerov zvyškového napätia alebo používanie špecializovaného softvéru. Tieto požiadavky nie je možné vždy splniť pri meraniach zvyškových napätí, preto bola daná problematika podrobená skúmaniu s cieľom navrhnutia nového univerzálnejšieho korekčného postupu pre výpočet homogénnych zvyškových napätí s vysokými hodnotami.

Pred samotnou tvorbou korekčného postupu bolo spravených viacero simulácií, ktoré sa snažili zmapovať vplyv rôznych parametrov na chybu vyhodnotených zvyškových napätí. Prvým skúmaným parametrom bola veľkosť zvyškového napätia, definovaná pomerom simulovaného redukovaného napätia σ_{red}^S ku medze klzu materiálu R_e . Pri malých hodnotách zvyškového napätia ($\sigma_{red}^S/R_e < 0,5$) boli plastické deformácie v okolí odvrávaného otvoru pomerne malé a vyhodnotenú napätia boli skoro totožné so simulovanými napätiami. So zväčšujúcim sa zvyškovým napätím, ale narastala tvorba plastických deformácií v okolí odvrátaného otvoru, čo malo za následok aj zväčšenie rozdielu medzi vyhodnotenými a simulovanými napätiami (obr. 11).



Obr. 11 Vyhodnotenú a simulované zvyškové napätia pre stav kedy $\sigma_{red}^S/R_e = 0,996$

Obrázok 11 zobrazuje len jeden simulovaný stav. Rozdiel medzi simulovanými a vyhodnotenými napätiami pre všetky stavy s pomerom $\sigma_{red}^s/R_e = 0,996$, s rôznymi kombináciami napätí σ_x a σ_y a s rôznymi natočeniami tenzometrickej ružice je možné vidieť na obr. 12.



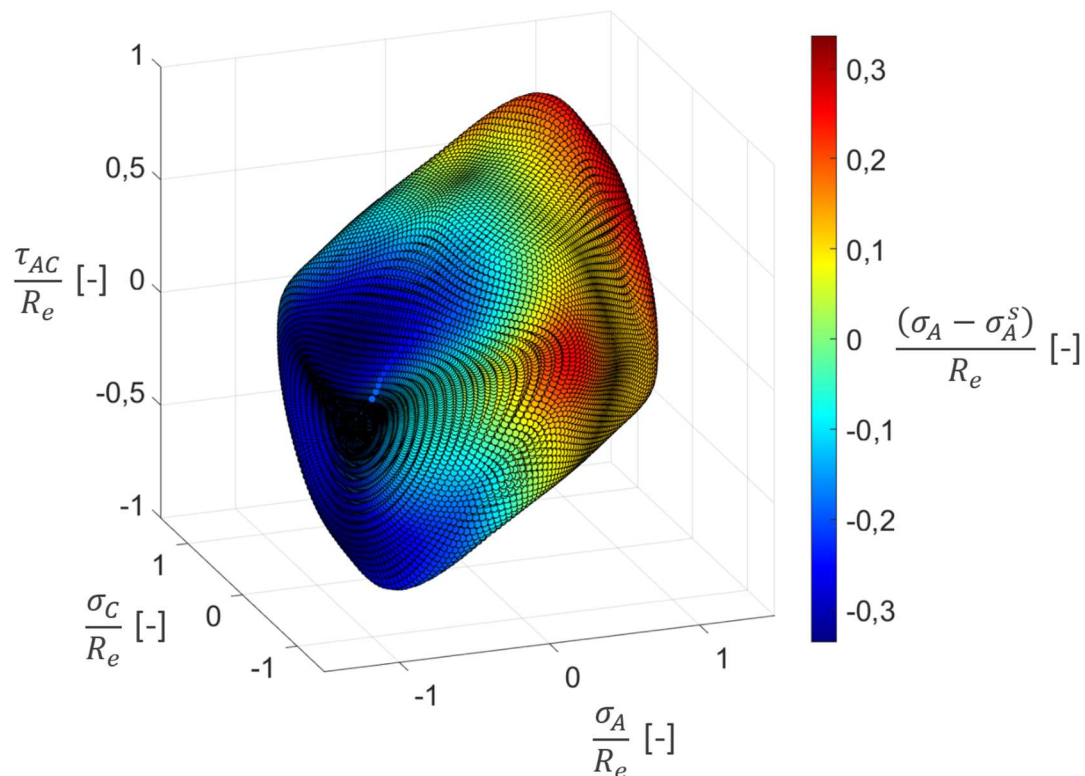
Obr. 12 Vyhodnotené a simulované zvyškové napätia pre stavy s pomerom $\sigma_{red}^s/R_e = 0,996$ s rôznymi natočeniami tenzometrickej ružice

Pri skúmaní stavov aj s inými pomermi σ_{red}^s/R_e bolo zistené, že chyba vyhodnotených zvyškových napätí nie je závislá len na veľkosti pôsobiacich zvyškových napätí, ale aj na orientácii tenzometrickej ružice a taktiež na pomere jednotlivých napätí pôsobiacich v rôznych smeroch.

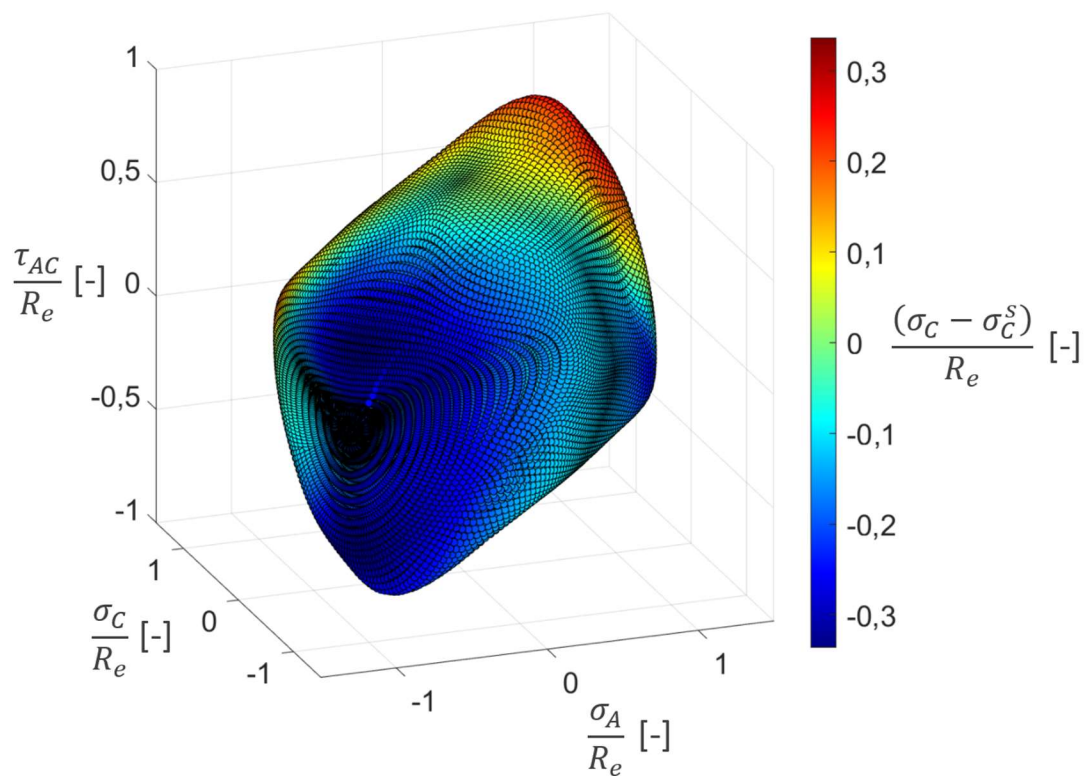
Okrem rôznych stavov napätosti a orientácie tenzometrickej ružice bol skúmaný aj vplyv priemeru odvrávaného otvoru, vplyv použitej tenzometrickej ružice a vplyv materiálu meraného telesa (konkrétne medze klzu, modulu pružnosti a tangenciálneho modulu). Všetky spomínané posudzované parametre významne ovplyvňovali chyby vyhodnotených zvyškových napätí, preto museli byť zahrnuté v korekčnom postupe.

Korekcia vplyvu plastických deformácií môže byť definovaná ako rozdiel medzi polohami bodov vyhodnotených a simulovaných napätí v grafe na obr. 11. Keďže tieto body sú v priestore grafu definované tromi súradnicami napätí, má aj korekčný vektor definujúci zmenu polohy bodu vyhodnotených napätí tri zložky: $(\sigma_A - \sigma_A^s)/R_e$, $(\sigma_C - \sigma_C^s)/R_e$ a $(\tau_{AC} - \tau_{AC}^s)/R_e$. Hodnotu jednotlivých zložiek korekcií pre rôzne stavy zvyškových napätí s rôznymi orientáciami tenzometrických ružíc je možné vidieť na obr. 13 až 15. Pri bližšom skúmaní korekčných vektorov pre rôzne oblasti grafov bolo zistené, že pri aplikovaní špecifických symetrickým podmienok môžu byť všetky body z obr. 13 až 15 získané z časti grafov, kde $\sigma_A \geq \sigma_C$

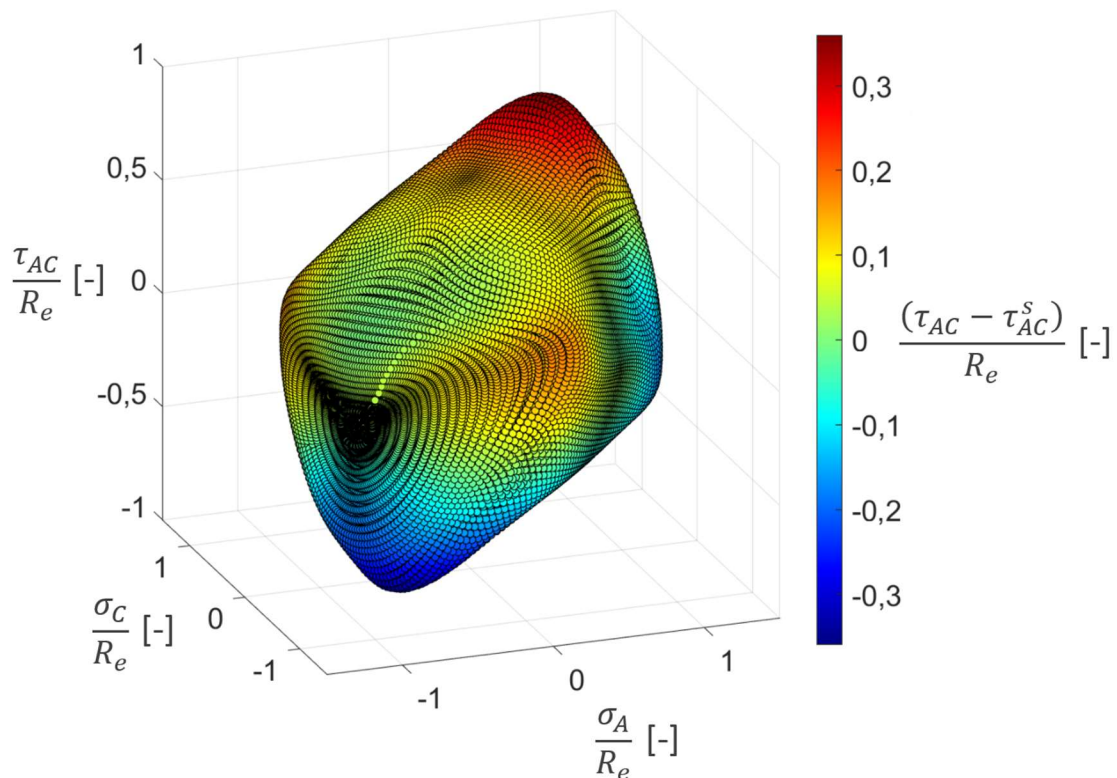
a zároveň $\sigma_A \geq -\sigma_C$. Tento fakt výrazne urýchlil vytvorenie súboru vstupných dát pre tvorbu korekčného postupu, pretože na pokrytie všetkých možných kombinácií zvyškových napätí je potrebná len jedna štvrtina simulovaných stavov.



Obr. 13 Vyhodnotené zvyškové napätia s korekciou $(\sigma_A - \sigma_A^S)/R_e$



Obr. 14 Vyhodnotené zvyškové napätia s korekciou $(\sigma_C - \sigma_C^S)/R_e$



Obr. 15 Vyhodnotené zvyškové napätia s korekciou $(\tau_{AC} - \tau_{AC}^s)/R_e$

Pri tvorbe súboru vstupných dát bolo simulovaných 861 rôznych napät'ových stavov, ktoré zahrňovali stavy s pomerom σ_{red}^s/R_e od 0,5 do 0,996, pričom pomer simulovaných napätí v smere osi y ku napätiam v smere osi x bol od -1 (čo predstavuje šmykovú napätosť) po 1 (čo predstavuje rovnomernú rovinnú napätosť). Aby bol korekčný postup nezávislý na medze klzu materiálu, boli všetky napätia delené touto medzou. Každý z týchto napät'ových stavov bol simulovaný pre 5 rozličných priemerov otvorov a 5 rozličných materiálových pomerov E_t/E . Celkovo bolo teda simulovaných 21 525 rozličných stavov. Výsledky zo simulácií boli spracované pomocou skriptu v programe MATLAB, ktorý vyhodnotil pomerné deformácie pre 4 rôzne typy tenzometrických ružíc (RY61-1.5/120S, RY61-3.2/120S, Typ A a Typ B) a 91 rôznych orientácií týchto ružíc, čím vzniklo celkovo 7 835 100 rôznych simulovaných stavov. Uvažované tenzometrické ružice boli pre potreby následného ďalšieho spracovania označené parametrom TR , ktorého hodnoty sú uvedené v tab. 2. Prehľad jednotlivých parametrov použitých pri vytváraní súboru dát slúžiaceho na tvorbu korekčného postupu je uvedený v tab. 3.

Z každého simulovaného stavu boli následne pripravené dve množiny parametrov: vstupné parametre, ktoré jednoznačne definovali daný simulovaný stav a výstupné parametre, ktoré určovali korekciu zvyškových napätí pre tento stav.

Tab. 2 Parameter TR pre jednotlivé uvažované tenzometrické ružice

Tenzometrická ružica	Parameter TR [-]	Stredný priemer tenzometrickej ružice D [7, 13] [mm]
RY61-1.5/120S	0,1	5,1
RY61-3.2/120S	0,4	10,14
Typ A (1/32 in.)	0,2	2,57
Typ A (1/16 in.)	0,2	5,13
Typ A (1/8 in.)	0,2	10,26
Typ B	0,3	5,13

Tab. 3 Prehľad jednotlivých parametrov použitých pri tvorbe súboru dát určeného na vytvorenie korekčného postupu

Parameter	Hodnota	Množstvo
σ_y/σ_x [-]	-1, -0,95, -0,9, ... , 0,9, 0,95, 1	41
σ_{red}^S/R_e [-]	0,5, 0,525, 0,55, ... , 0,95, 0,975, 0,996	21
β^S [°]	-45°, -44°, -43°, ... , 43°, 44°, 45°	91
E_t/E [-]	0,01, 0,1, 0,25, 0,5, 1	5
D_0/D [-]	0,35, 0,37, 0,39, 0,41, 0,43	5
Tenzometrická ružica	RY61-1.5/120S, RY61-3.2/120S, Typ A (1/32 in., 1/16 in., 1/8 in.), Typ B	6

Na aproximáciu vzťahu medzi vstupnými a výstupným parametrami z jednotlivých stavov bola použitá neurónová sieť s dopredným šírením [14]. Aby boli dosiahnuté čo najlepšie výsledky, boli otestované rôzne nastavenia tejto neurónovej siete ako aj samotného tréningového algoritmu. Pred tréňovaním boli dáta náhodne rozdelené na dve množiny: tréningovú množinu, ktorá obsahovala 85 % dát a slúžila na počítanie gradientov a úpravu parametrov siete (váh a prahových koeficientov) a validačnú množinu, ktorá obsahovala 15 % dát a slúžila na monitorovanie pretréňovania, pri ktorom stráca neurónová sieť svoju vlastnosť generalizácie nových neznámych dát. Samotné tréňovanie neurónovej siete prebiehalo v programe MATLAB pomocou Levenberg-Marquardt algoritmu spätného šírenia chybového signálu [15] s využitím strednej kvadratickej chybovej funkcie ako hodnotiaceho parametru. Pretože každé tréňovanie obsahuje iné tréningové a validačné dáta ako aj iné počiatkové hodnoty váh a prahových koeficientov tréňovanej neurónovej siete, je možné nájsť viacero riešení toho istého problému. Z toho dôvodu bol proces tréňovania niekoľkokrát opakovaný a neurónová sieť s najlepšimi vlastnosťami bola vybraná pre finálnu korekciu vyhodnotených zvyškových napätí.

Štruktúru finálnej neurónovej siete, ktorá bola použitá na korekciu vyhodnotených zvyškových napätí je možné vidieť na obr. 16 vľavo a detailnejšie znázornenie jedného z neurónov tejto siete na obr. 16 vpravo. Táto neurónová sieť pozostávala zo vstupnej vrstvy, dvoch skrytých vrstiev obsahujúcich po 30 neurónov a výstupnej

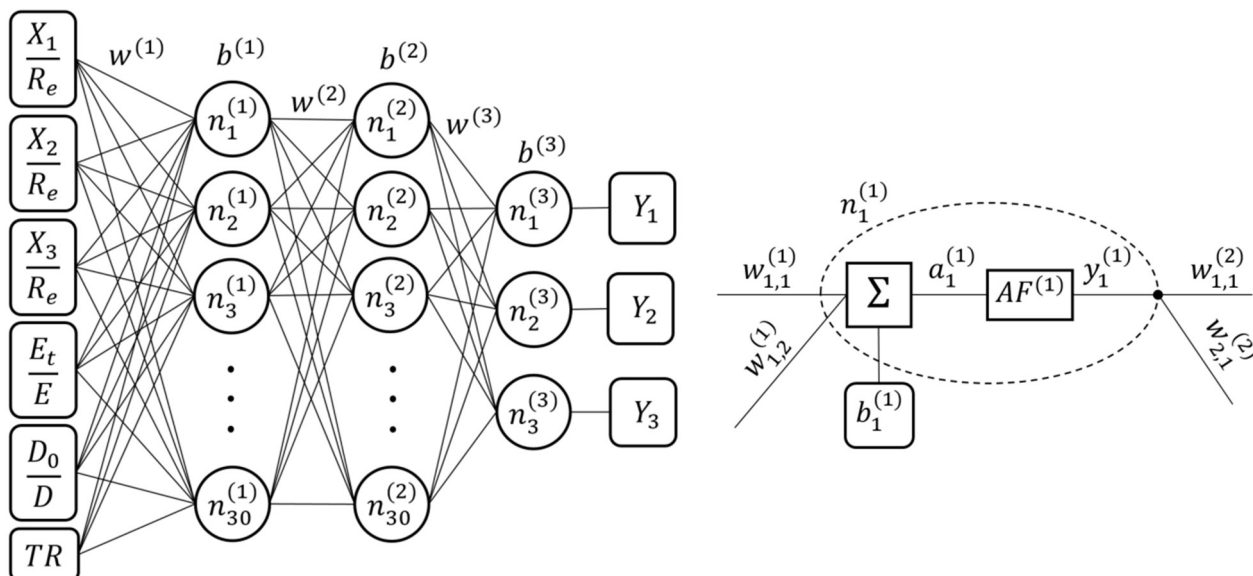
vrstvy. Každý neurón $n_k^{(i)}$ v (i) -tej vrstve bol prepojený z m vstupmi z predchádzajúcej vrstvy pomocou vážených prepojení $w_{k,m}^{(i)}$, pričom k označuje konkrétny neurón v danej vrstve. Sumácia vážených vstupov a prahového koeficientu $b_k^{(i)}$ tvorila vstup $a_k^{(i)}$ pre aktivačnú funkciu $AF^{(i)}$, ktorej výstup $y_k^{(i)}$, bol zároveň vstupom pre ďalšiu vrstvu neurónov. Neuróny v skrytých vrstvách používali aktivačnú funkciu hyperbolického tangentu, čo môže byť zapísané ako:

$$AF^{(1)}, AF^{(2)}: y_k^{(i)} = \tanh(a_k^{(i)}) = \frac{e^{2a_k^{(i)}} - 1}{e^{2a_k^{(i)}} + 1} \quad (8)$$

Výstupná vrstva neurónov používala lineárnu aktivačnú funkciu, $AF^{(3)}: y_k^{(i)} = a_k^{(i)}$, takže finálny výstup z neurónovej siete bol:

$$\mathbf{Y} = [Y_1, Y_2, Y_3]^T = \mathbf{y}^{(3)} = \mathbf{a}^{(3)} \quad (9)$$

Nakoľko aplikácia natrénovanej neurónovej siete nevyžaduje žiadne zložité matematické operácie, výstupný vektor \mathbf{Y} môže byť spočítaný zo vstupného vektoru $\mathbf{X} = \left[\frac{X_1}{R_e}, \frac{X_2}{R_e}, \frac{X_3}{R_e}, \frac{E_t}{E}, \frac{D_0}{D}, TR \right]^T$ v akomkoľvek výpočtovom softvéri pomocou určených váh a prahových koeficientov.



Obr. 16 Schematické znázornenie neurónovej siete použitej na korekciu vyhodnotených zvyškových napätí (vľavo) a jedného neurónu tejto siete (vpravo)

Pretože pri vytváraní súboru dát pre tréning neurónovej siete boli simulované len stavy, pri ktorých $\sigma_A \geq \sigma_C$ a zároveň $\sigma_A \geq -\sigma_C$, je potrebné na pokrytie všetkých možných kombinácií napätí, ktoré môžu pri meraní zvyškových napätí nastať, aplikovať špecifické symetrické podmienky. To je zabezpečené pomocou úpravy vstupných parametrov X_1 , X_2 a X_3 , ktoré sú určené z tab. 4 pomocou porovnania napätí σ_A , σ_C , a $-\sigma_C$. Táto tabuľka taktiež definuje akým spôsobom budú počítané korigované napätia σ_A^{kor} , σ_C^{kor} a τ_{AC}^{kor} zo zložiek korekčného vektora Y_1 , Y_2 a Y_3 určeného pomocou neurónovej siete.

Tab. 4 Vstupné parametre X_1, X_2 a X_3 a rovnice na výpočet korigovaných napätí

	$\sigma_A \geq \sigma_C$		$\sigma_A < \sigma_C$	
$\sigma_A - \sigma_C$	$X_1 = \sigma_A$	$\sigma_A^{kor} = \sigma_A - Y_1 \cdot R_e$	$X_1 = \sigma_C$	$\sigma_A^{kor} = \sigma_A - Y_2 \cdot R_e$
$\Delta \sigma$	$X_2 = \sigma_C$	$\sigma_C^{kor} = \sigma_C - Y_2 \cdot R_e$	$X_2 = \sigma_A$	$\sigma_C^{kor} = \sigma_C - Y_1 \cdot R_e$
σ_A	$X_3 = \tau_{AC}$	$\tau_{AC}^{kor} = \tau_{AC} - Y_3 \cdot R_e$	$X_3 = \tau_{AC}$	$\tau_{AC}^{kor} = \tau_{AC} - Y_3 \cdot R_e$
σ_C	$X_1 = -\sigma_C$	$\sigma_A^{kor} = \sigma_A + Y_2 \cdot R_e$	$X_1 = -\sigma_A$	$\sigma_A^{kor} = \sigma_A + Y_1 \cdot R_e$
∇	$X_2 = -\sigma_A$	$\sigma_C^{kor} = \sigma_C + Y_1 \cdot R_e$	$X_2 = -\sigma_C$	$\sigma_C^{kor} = \sigma_C + Y_2 \cdot R_e$
σ_A	$X_3 = -\tau_{AC}$	$\tau_{AC}^{kor} = \tau_{AC} + Y_3 \cdot R_e$	$X_3 = -\tau_{AC}$	$\tau_{AC}^{kor} = \tau_{AC} + Y_3 \cdot R_e$

Po vypočítaní korigovaných napätí, môžu byť spočítané korigované parametre P^{kor} , Q^{kor} a T^{kor} pomocou rovníc:

$$P^{kor} = \frac{(\sigma_C^{kor} + \sigma_A^{kor})}{2} \quad Q^{kor} = \frac{(\sigma_C^{kor} - \sigma_A^{kor})}{2} \quad T^{kor} = \tau_{AC}^{kor} \quad (10)$$

a následne korigované hlavné napätia spolu s korigovaným uhlom β^{kor} ako:

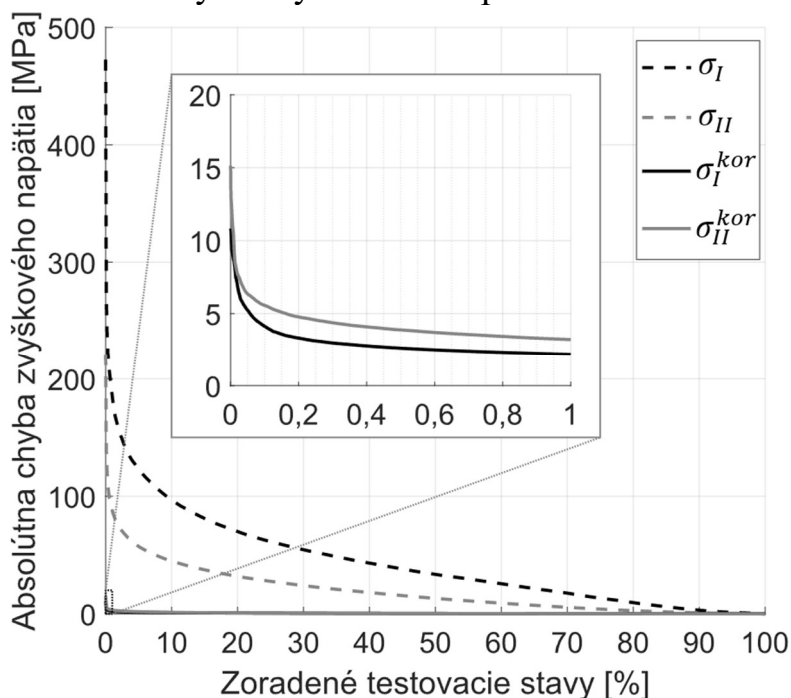
$$\sigma_I^{kor}, \sigma_{II}^{kor} = P^{kor} \pm \sqrt{(Q^{kor})^2 + (T^{kor})^2} \quad \beta^{kor} = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{-T^{kor}}{-Q^{kor}}\right) \quad (11)$$

Aby boli zaručené uspokojivé výsledky, navrhnutý korekčný postup bol rozsiahlo testovaný. Pri tvorbe korekčného postupu bola simulovaná len jedna štvrtina všetkých kombinácií zvyškových napätí a na pokrytie zvyšných stavov, ktoré môžu pri meraní nastať, boli použité špecifické symetrické podmienky. Preto bol prvý test zameraný práve na otestovanie týchto symetrických podmienok. Pre tento test bolo vytvorených 50 000 náhodných testovacích stavov, ktoré pokrývali všetky kombinácie napätí σ_A a σ_C . Pretože veľkosti chýb korigovaných hlavných napätí ako aj uhlu β^{kor} sa zásadne nelíšili pre rôzne kombinácie napätí σ_A a σ_C , je možné konštatovať, že aplikovanie špecifických symetrických podmienok je korektné.

Keďže prvý test preukázal, že je možné pri korekcií vyhodnotených zvyškových napätí použiť špecifické symetrické podmienky, bolo následné detailné testovanie robené už len pre stavy napätí, pre ktoré platí: $\sigma_A \geq \sigma_C$ a zároveň $\sigma_A \geq -\sigma_C$. Cieľom tohto testovania bolo otestovať korekčný postup pre celý rozsah vstupných parametrov, ktoré boli použité pri tréningu neurónovej siete. Z toho dôvodu bolo nasimulovaných 2 500 rôznych stavov napätosti, pričom dôraz bol kladený na stavy s výraznejšími plastickými deformáciami, keďže pri týchto stavoch dochádza k väčším chybám vyhodnotených zvyškových napätí. Každý zo simulovaných stavov bol vyhodnotený pre 100 náhodných orientácií tenzometrických ružíc RY61-1.5/120S, RY61-3.2/120S, Typ A a Typ B, čím vzniklo 1 000 000 testovacích stavov.

Z pomerných deformácií z každého testovacieho stavu boli vyhodnotené homogénne zvyškové napätia, ktoré boli následne korigované pomocou navrhovaného postupu. Absolútne chyby korigovaných ako aj nekorigovaných hlavných napätí je možné vidieť na obr. 17. Pre lepšiu prehľadnosť boli hodnoty týchto chýb zoradené od najväčšej po najmenšiu. Z grafu je vidieť, že chyba

nekorigovaných zvyškových napätí môže dosahovať až stovky MPa, zatiaľ čo po korekcii je maximálna chyba zvyškového napätia 15 MPa.



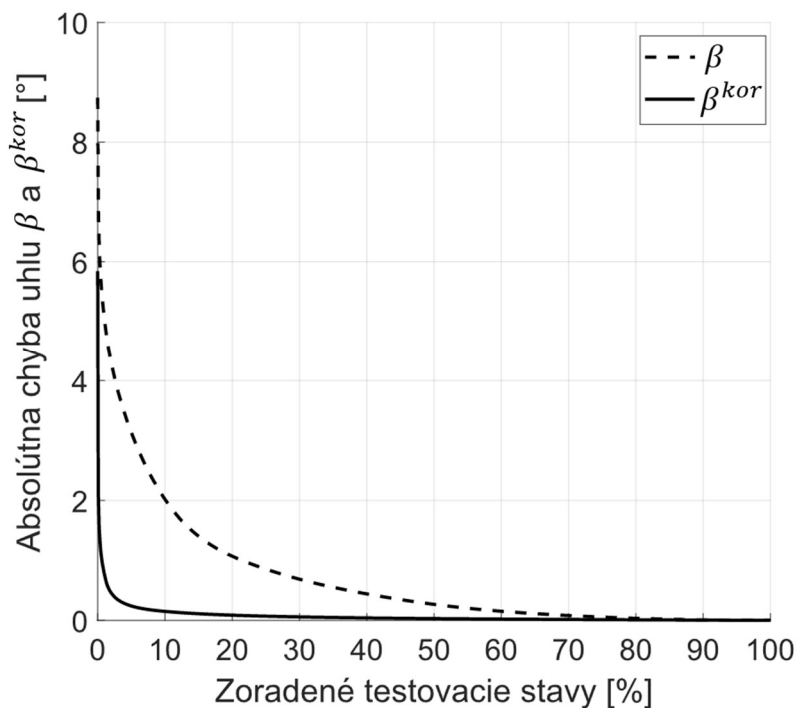
Obr. 17 Zoradené absolútne chyby korigovaných a nekorigovaných hlavných napätí

Na rozdiel od hlavných napätí, absolútna chyba uhlu β je pomerne malá aj bez použitia korekcie (obr. 18). Korekčný postup ale aj v tomto prípade prináša zlepšenie a chyba korigovaného uhlu β^{kor} je pre väčšinu korigovaných stavov zanedbateľne malá. Je dobré podotknúť, že stavy pri ktorých bol pomer σ_{II}/σ_I alebo $\sigma_{II}^{kor}/\sigma_I^{kor}$ väčší než 0,98, boli uvažované ako stavy s rovnomernou rovinnou napätosťou a bola pri nich nastavená chyba uhlu β alebo β^{kor} na nulu, keďže pri rovnomernej rovinnnej napätosti je každý smer zároveň smerom hlavného napätia.

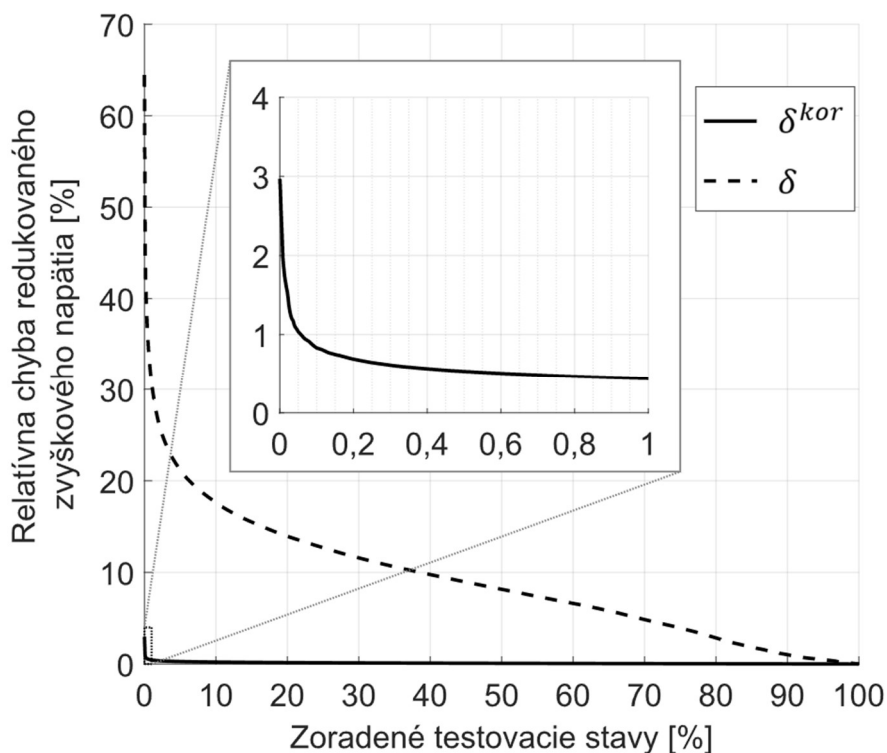
Absolútna chyba korigovaných a nekorigovaných napätí môže byť mierne zavádzajúcim parametrom, pretože neposkytuje informáciu o veľkosti vyhodnocovaných napätí. Z toho dôvodu bola pre korigované a nekorigované napätia spočítaná aj relatívna chyba ako:

$$\delta = \frac{|\sigma_{red} - \sigma_{red}^s|}{\sigma_{red}^s} \cdot 100 \quad \delta^{kor} = \frac{|\sigma_{red}^{kor} - \sigma_{red}^s|}{\sigma_{red}^s} \cdot 100 \quad (12)$$

kde δ a δ^{kor} je relatívna chyba nekorigovaných a korigovaných redukovaných napätí a σ_{red} a σ_{red}^{kor} je redukované napätie spočítané z nekorigovaných a korigovaných napätí podľa podmienky HMM. Na výpočet relatívnej chyby boli zvolené redukované napätia, pretože hlavné napätie σ_{II}^s malo pre niektoré simulované stavy hodnotu blízku nule, čo by viedlo k nerealistickým hodnotám relatívnej chyby pre druhé hlavné napätie. Zoradené relatívne chyby korigovaného a nekorigovaného redukovaného napätia je možné vidieť na obr. 19. Z obrázku je zrejmé, že korekčný postup funguje veľmi dobre, nakoľko 99,95 % korigovaných stavov má hodnotu relatívnej chyby pod 1 % a maximálna relatívna chyba dosahuje 3 %. Pre porovnanie, relatívna chyba nekorigovaných redukovaných napätí môže dosahovať až 65 %.



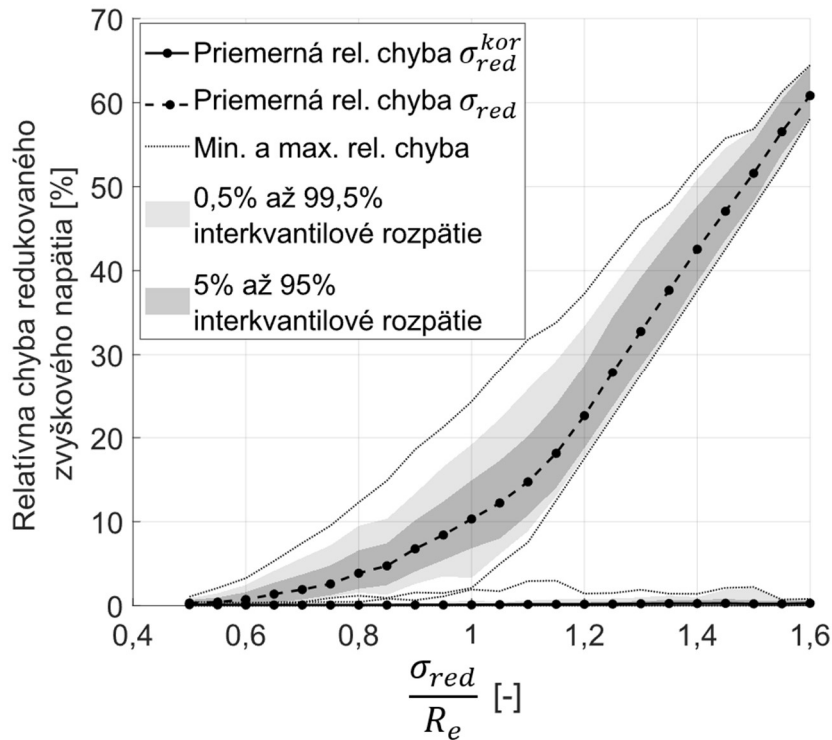
Obr. 18 Zoradené absolútne chyby korigovaného a nekorigovaného uhlu definujúceho smer hlavných napätí



Obr. 19 Relatívna chyba korigovaného a nekorigovaného redukovaného zvyškového napätia

Pretože najvýraznejší vplyv na chybu vyhodnotených zvyškových napätí má veľkosť pôsobiacich napätí definovaná pomerom σ_{red}/R_e , bola relatívna chyba redukovaných napätí vykreslená v závislosti na tomto parametre. Graf na obr. 20 obsahuje priemernú hodnotu relatívnej chyby korigovaného a nekorigovaného

redukovaného napätia, maximálnu a minimálnu hodnotu týchto chýb ako aj interval v ktorom sa nachádza 90 % a 99 % posudzovaných stavov. Z grafu je možno vidieť, že pre vyššie pomery σ_{red}/R_e môže chyba nekorigovaného napätia dosahovať až desiatky percent, čo môže byť kritické pre celkovú presnosť merania zvyškových napätí pomocou odvítavacej metódy. Naopak pri použití navrhovanej korekcie, je relatívna chyba zanedbateľná v celom rozsahu pomeru σ_{red}/R_e , dokonca aj pre prípady s najväčšími plastickými deformáciami.



Obr. 20 Relatívna chyba korigovaného a nekorigovaného redukovaného zvyškového napätia v závislosti na pomere σ_{red}/R_e

Síce chyby vyhodnotených zvyškových napätí mali pri testovaní korekčného postupu veľmi malú hodnotu, výsledná presnosť vyhodnotených zvyškových napätí môže byť pri meraní ovplyvnená ďalšími vplyvmi, akými sú napríklad excentricita odvítaného otvoru, neznalosť presného priemeru odvítaného otvoru, alebo odlišnosť rozmerov tenzometrickej ružice od rozmerov uvažovaných pri tvorbe korekčného postupu. Taktiež presná hodnota medze klzu meraného materiálu nemusí byť vždy známa a definícia materiálového správania pomocou bilineárneho modelu materiálu, ktorá bola použitá pri simuláciách, nemusí byť dostatočne výstižná pre každý testovaný materiál. Je dobré poznamenať, že mnohé z týchto faktorov neovplyvňujú len korekčný postup, ale vyhodnotenie zvyškových napätí pomocou odvítavacej metódy ako takej.

Napriek všetkému navrhovaný korekčný postup umožňuje použitie odvítavacej metódy na meranie homogénnych zvyškových napätí s hodnotami až po medzu klzu materiálu, čo výrazne rozširuje použiteľnosť tejto metódy.

Záver

Pri meraní zvyškových napätí pomocou odvíravacej metódy je veľmi náročné dodržať všetky požadované predpoklady tejto metódy, čo môže viesť k chybám pri vyhodnocovaní meraných zvyškových napätí. Cieľom dizertačnej práce preto bolo detailnejšie posúdenie troch takýchto predpokladov.

Aby mohla byť skúmaná závislosť posudzovaných predpokladov na vyhodnocovaných zvyškových napätia, bol pomocou metódy konečných prvkov vytvorený výpočtový model simulujúci odvíravaciu metódu. Tento model umožňoval simulovanie rôznych materiálov, stavov napätosti, geometrií skúmaného telesa, odvíravaneho otvoru či telies predstavujúcich tenzometrické mriežky. Vytvorený výpočtový model bol taktiež použitý na určenie kalibračných koeficientov potrebných pre vyhodnocovanie zvyškových napätí z nameraných pomerných deformácií.

Keďže v technickej praxi sa vyskytuje veľké množstvo telies, ktoré majú valcový tvar, ako prvým bol riešený predpoklad o rovinnosti meraného povrchu. Pretože spôsob akým boli v minulosti simulované zvyškové napätia vo valcových telesách sa ukázal ako nevhodný, musel byť na simuláciu požadovanej napätosti vytvorený nový postup. Na základe získaných výsledkov je možné určiť chyby vyhodnotených napätí pre rôzne stavy napätosti a telesá s rôznymi polomerami zaoblenia vonkajšieho povrchu. Okrem toho bol navrhnutý aj postup, pomocou ktorého je možné presnejšie vyhodnocovať homogénne zvyškové napätia na telesách s valcovým povrchom.

Ďalším posudzovaným bol predpoklad o nanajvyš dvojsovej napätosti so zvyškovými napätiami orientovanými v rovinách rovnobežných s povrchom merného telesa. Posúdením viacerých napätových stavov bolo zistené, že chyby vyhodnotených zvyškových napätí nie sú závislá na napätiach pôsobiacich v rovine rovnobežnej s povrchom meraného telesa, ale sú závislá len na napätí pôsobiacom v smere kolmom na povrch meraného telesa, pričom táto chyba dosahovala pomerne vysokých hodnôt.

Pretože odvíravany otvor pôsobí ako koncentrátor napätia, môže pri meraní zvyškových napätí s vyššou hodnotou dochádzať k tvorbe plastických deformácií v okolí odvíraného otvoru. To je v rozpore s predpokladom, že pri odvíravaní otvoru dochádza k uvoľneniu len elastických deformácií. Po preskúmaní rôznych parametrov ovplyvňujúcich tvorbu plastických deformácií, bol navrhnutý korekčný postup, pomocou ktorého je možné korigovať vyhodnotenú homogénne zvyškové napätia nezávisle na stave napätosti či materiálových parametroch, a to pre rôzne priemery odvíraného otvoru a rôzne tenzometrické ružice. Po rozsiahlom testovaní tohto postupu sa ukázalo, že chyba vyhodnotených zvyškových napätí bola zanedbateľná pre všetky testovacie stavy, preto je možné konštatovať, že navrhovaný korekčný postup výrazne prispieva k rozšíreniu hraníc použiteľnosti odvíravacej metódy pri praktických aplikáciách.

Na základe tejto práce je možné odhadnúť vplyv rôznych prípadov odkláňajúcich sa od ideálneho stavu na presnosť vyhodnotených zvyškových napätí a pri niektorých prípadoch tento vplyv pomocou navrhovaných postupov minimalizovať. Preto môžu byť uvedené výsledky a postupy veľmi prínosné pre technickú prax ako aj pre budúci výskum zaoberajúci sa simulovaním odvíravacej metódy.

Zoznam použitej literatúry

- [1] WITHERS, P. J. a H. K. D. H. BHADESHIA. Residual Stress. Part 2 – Nature and Origins. *Materials Science and Technology*. 2001, **17**(4), 366-375. DOI: 10.1179/026708301101510087. ISSN 0267-0836.
- [2] LU, J. *Handbook of Measurement of Residual Stresses*. Lilburn: Fairmont press, 1996. ISBN 01-325-5738-X.
- [3] CAMPUS, F. Effects of Residual Stresses on the Behaviour of Structures. In: *Residual Stresses in Metals and Metal Construction*. New York: Reinhold Pub. Corp., 1954, s. 1-21.
- [4] VLK, M. et al. *Experimentální mechanika*. Brno, 2003.
- [5] SCHAJER, G. S. a P. S. WHITEHEAD. *Hole-Drilling Method for Measuring Residual Stress*. Williston: Morgan & Claypool, 2018.
- [6] HALABUK, D. a T. NÁVRAT. Determination of Residual Stresses in Cylindrical Components by the Hole-Drilling Method. *Experimental Mechanics*. 2022, **62**(1), 87-99. ISSN 0014-4851. DOI: 10.1007/s11340-021-00765-y
- [7] ASTM E837–20. *Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2020.
- [8] ZHU, W. X. a D. J. SMITH. Residual Stresses by Hole-Drilling in Curved Components. In: *Recent Advances in Experimental Mechanics*. Lisbon: A A Balkema, 1994, s. 777-782. ISBN 9054103957.
- [9] MONTAY, G. et al. Determining Residual Stress in Spherical Components: A New Application of the Hole-Drilling Method. *Journal of Testing and Evaluation*. 2004, **32**(1), 73-79. DOI: 10.1520/JTE11627. ISSN 00903973.
- [10] VANGI, D. a S. TELLINI. Hole-Drilling Strain-Gauge Method: Residual Stress Measurement with Plasticity Effects. *Journal of Engineering Materials and Technology*. 2010, **132**(1). ISSN 0094-4289. DOI:10.1115/1.3184030
- [11] BEGHINI, M., L. BERTINI a C. SANTUS. A Procedure for Evaluating High Residual Stresses Using the Blind Hole Drilling Method, Including the Effect of Plasticity. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. 2010, **45**(4), 301-318. ISSN 0309-3247. DOI: 10.1243/03093247JSA579
- [12] CHUPAKHIN, S. et al. Artificial Neural Network for Correction of Effects of Plasticity in Equibiaxial Residual Stress Profiles Measured by Hole Drilling. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. 2017, **52**(3), 137-151. ISSN 0309-3247. DOI: 10.1177/0309324717696400
- [13] HBM GmbH (2019) Strain Gauges. pp 75–78. <https://www.hbm.com/en/2073/strain-gauge-pdf-catalog/>. Accessed 2 Feb 2021
- [14] HAGAN, M. T. et al. *Neural Network Design*. Boston: PWS Publishing, 1996.
- [15] MARQUARDT, D. W. An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*. **11**(2), 431-441.

Životopis autora

Osobné údaje

Meno	Dávid Halabuk
Dátum narodenia	24. 02. 1992
Adresa	Hronská 4, 935 26 Starý Tekov, Slovensko
E-mail	david.halabuk@vutbr.cz

Vzdelanie

2016–súčasnosť	Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, odbor: Inženýrská mechanika
2011–2016	Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, odbor: Energetické inženýrství
2007–2011	Středná priemyselná škola strojnícka a elektrotechnická, Levice, odbor: Strojárstvo

Pracovné skúsenosti

2021–súčasnosť	Výzkumně vývojový pracovník, X-Sight s.r.o.
2019–súčasnosť	Odborný asistent, Vysoké učení technické v Brně, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, Odbor inženýrské mechaniky
2017–2020	Výzkumný a vědecký pracovník, Vysoké učení technické v Brně, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, Odbor inženýrské mechaniky
2015	Konstruktér, Exmont-Energo a.s.,
2014	Pomocný technolog, Enseco a.s., Technologické oddelenie
2013	Administratívny pracovník, Roetz s.r.o., Oddelenie projektov

Odborné zručnosti

Jazyky	Anglický jazyk – veľmi pokročilý (B2)
Počítačové programy	ANSYS (štruktúrálna a tepelná analýza), MATLAB, AutoCad, Inventor, Tosca, CATIA, MicroStation, Rhinoceros, Microsoft Office (Word, Excel, PowerPoint)

Abstrakt

Dizertačná práca sa zaoberá skúmaním rôznych prípadov, ktoré môžu nastať pri meraní zvyškových napätí pomocou odvrtavacej metódy a ktoré sa odkláňajú od ideálneho stavu, pre ktorý je táto metóda odvodená. Aby mohli byť posudzované rôzne stavy napätosti, rozličné geometrie či materiálové vlastnosti meraného telesa, bol pomocou metódy konečných prvkov vytvorený výpočtový model simulujúci odvrtavaciu metódu. Prvý skúmaný prípad sa týkal valcových telies a chýb, ktoré môžu vzniknúť pri použití odvrtavacej metódy na telesách s rôznym polomerom zaoblenia povrchu. Okrem posúdenia chýb pre rôzne stavy napätosti, bol navrhnutý aj postup, pomocou ktorého je možné spočítať homogénne zvyškové napätie pôsobiace v telesách s valcovým povrchom. Ďalšia časť práce sa zaoberala skúmaním vplyvu napätia pôsobiaceho v smere kolmom na meraný povrch na chyby vyhodnotených zvyškových napätí pôsobiacich v rovinách rovnobežných s povrchom meraného telesa. Posledná a zároveň najväčšia časť práce bola venovaná prípadom, kedy dochádza počas merania zvyškových napätí k tvorbe plastických deformácií v okolí odvrtavaného otvoru. Po preskúmaní rôznych parametrov ovplyvňujúcich tvorbu plastických deformácií, bol navrhnutý korekčný postup, pomocou ktorého je možné korigovať vyhodnotenú homogénne zvyškové napätia nezávisle na stave napätosti či materiálových parametroch, a to pre rôzne priemery odvrtavaného otvoru a rôzne tenzometrické ružice. Navrhovaný korekčný postup bol rozsiahlo testovaný, aby boli zaručené uspokojivé výsledky pri jeho použití.

Abstract

The doctoral thesis is focused on the investigation of various cases that may occur in the measurement of residual stresses by hole-drilling method and which deviate from the ideal state for which hole-drilling method is derived. In order to assess various stress states, geometries or material properties of the measured body, a computational model simulating the hole-drilling method was created by the finite element method. The first investigated case deals with cylindrical bodies and errors that may occur when the hole-drilling method is used to measure residual stresses in bodies with various surface radii. In addition to the evaluation of errors for different stress states, a procedure for the calculation of uniform residual stresses in cylindrical bodies has been proposed. The next part of the thesis is focused on investigating the influence of the residual stress placed in the perpendicular direction to the measured surface on the error of evaluated residual stresses located in a plane parallel to the surface of a measured body. The last and largest part of the thesis deals with cases in which plastic deformations form in the area around the drilled hole during residual stress measurement. After examining of various parameters influencing the formation of plastic deformations, a correction procedure which is capable to correct the uniform residual stresses for various hole diameters and various strain gauge rosettes independently of the stress state or material properties was proposed. The proposed correction procedure was thoroughly tested to ensure its satisfactory results.