

E xperimentálna A nalýza N apětí 2005

HOW IS APPLICATED HOLE-DRILLING METHOD TO DETERMINATION OF RESIDUAL STRESSES IN SR.

AKO SA UPLATŇUJE METÓDA ODVRTÁVANIA PRI URČOVANÍ ZVYŠKOVÝCH NAPÄTÍ V SR.

František Trebuňa¹, Peter Senko², Patrik Šarga³, Matej Daniel⁴

The hole-drilling method is the most popular mechanical method of residual stress measurement and can be considered as non-destructive for large structures. By specially configured strain gage rosette bonded to the surface and a hole introduced into the structure through the center of the gage and from the released strains is possible to determine the principal normal stresses. Number of publications show that the theory of this method is not correct. Verification of measured values, especially by the finite element method, shows that measured values differ from those obtained by numerical and analytical methods. This is a reason why this problem is observed nowadays with special attention though the standard ASTM E 837-01 was novelized only two years ago.

Key words

Residual stress, hole-drilling, strain gage, experimental method

Kľúčové slová

Zvyškové napätia, odvrtávanie, tenzometer, experimentálna metóda

Úvod

Zvyškové (reziduálne) napätia v materiáli sú napätia, ktoré existujú v objekte bez toho, aby bol objekt zaťažovaný vonkajšími silami. Bežnou príčinou týchto napätí je výrobný proces. Vo všeobecnosti všetky výrobné postupy – odlievanie, valcovanie, obrábanie, zváranie, tvárnenie, tepelné spracovanie a pod. vyvolávajú vo vyrábanom objekte zvyškové napätia. V niektorých prípadoch zvyškové napätia vznikajú počas prevádzky konštrukcie, pri montáži alebo pri prípadných preťaženiach, pri sadaní základov alebo medzných zaťaženiach pôsobiacich na integrálnu časť konštrukcie. Ďalším bežným zdrojom týchto napätí je oprava, alebo prestavba konštrukcie. Zvyškové napätia môžu mať priaznivý alebo škodlivý účinok, ktorý závisí od veľkosti, znamienok a rozdelenia napätí vo vzťahu k napätiam vyvolaným zaťažením.

¹ Prof. Ing. František Trebuňa, CSc.: Katedra aplikovanej mechaniky a mechatroniky, SjF TU v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, tel.: +421-55-6022462, e-mail: frantisek.trebuna@tuke.sk

² Ing. Peter Senko: Katedra aplikovanej mechaniky a mechatroniky, SjF TU v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, tel.: +421-55-6022455, e-mail: peter.senko@tuke.sk

³ Ing. Patrik Šarga: Katedra aplikovanej mechaniky a mechatroniky, SjF TU v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, tel.: +421-55-6022455, e-mail: patrik.sarga@tuke.sk

⁴ RNDr. Matej Daniel, PhD.: Katedra aplikovanej mechaniky a mechatroniky, SjF TU v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, tel.: +421-55-6022467, e-mail: matej.daniel@tuke.sk

Veľmi často majú zvyškové napätia škodlivý účinok, čo možno dokumentovať na mnohých príkladoch, v ktorých tieto napätia boli hlavným príspevkom k únave a iným degradáciám štruktúry v prípade, ak sa prevádzkové napätia superponovali s už spomínanými zvyškovými napätiami. Zvlášť nebezpečný aspekt zvyškových napätí je v tom, že ich prítomnosť je vo všeobecnosti neznáma a až donedávna neexistovali dostupné metódy ich merania bez porušenia celistvosti objektu vyšetrovanej mechanickej sústavy.

Najrozšírenejšou modernou technikou na meranie zvyškových napätí je metóda odvrátavania. Metóda odvrátavania vychádza z relaxácie napätí potom, keď do stredu tenzometrickej ružice vyvrtáme otvor s polomerom R_0 . Keď sa materiál vrtaním odoberie, uvoľnené deformácie sú zaznamenávané pomocou tenzometrov (radiálna deformácia ε_r v smere tenzometra), z čoho môžeme vypočítať smer a veľkosť hlavných napätí.

Popisovaná skúšobná metóda je použiteľná i v tých prípadoch, kde sa napätia významne menia s hĺbkou otvoru a neprevyšujú polovicu medze pevnosti. Metóda zapríčiňuje určité poškodenie súčiastky, preto môže byť použitá len v prípadoch, keď je súčiastka postrádateľná, alebo kde vyvrtanie malého plytkého otvoru nebude mať významný vplyv na jej použiteľnosť.

Experimentálne metódy používané na určenie zvyškových napätí

K zisťovaniu napätosti v modeloch i reálnych súčiastkach existuje veľký počet experimentálnych postupov využívajúcich vzťah medzi zvyškovým napätím a určitou charakteristikou skúmaného objektu. Množstvo z nich dovoľuje získať o zvyškových napätiach len kvalitatívne informácie, mnohé sú však vhodné i k určeniu presných kvantitatívnych údajov.

Podľa toho, do akej miery sa vyžaduje zásah do celistvosti študovanej vzorky, môžu byť metódy klasifikované ako

- **deštruktívne** (založené na meraní deformácii, vyvolaných odstránením časti objemu napätého objektu),
- **nedeštruktívne** (súčiastky sa meraním nepoškodia),
- **polodeštruktívne** (ich aplikáciou dôjde len k znehodnoteniu nadbytočného objemu, zámerne pridávaného pri výrobe súčiastky; poškodený materiál sa po meraní odstráni).

Metóda odvrátavania

V súčasnosti je najbežnejšie využívanou metódou zisťovania zvyškových napätí. Je založená na princípe uvoľnenia napätí. Ide o jednoduchú metódu, ktorá pre meranie deformácií využíva elektrických odporových tenzometrov.

Princíp metódy odvrátavania spočíva v tom, že do súčiastky, v ktorej predpokladáme zvyškové napätia, navrtáme malý otvor, čo spôsobí v jeho okolí uvoľnenie deformácií. Je to dané tým, že každá kolmica na voľný (nezaťažovaný) povrch má smer normály k hlavnej rovine, v ktorej sú šmykové a normálové napätia nulové. V tomto prípade je týmto voľným povrchom i povrch vyvrtaného otvoru.

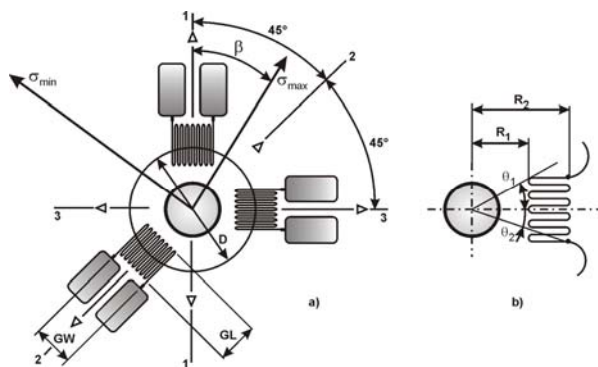
Metóda je veľmi univerzálna, použiteľná v laboratóriu aj v teréne pre konštrukcie rôznej veľkosti a tvaru. Existujú rôzne spôsoby odvrátavania, napríklad pomalorýchlostné čelnou stopkovou frézou, prúdové vzdušné brúsenie, alebo elektrochemické frézovanie a tiež vysokorýchlostné odvrátavanie. Keďže sa vyvrta len malý otvor, je metóda odvrátavania považovaná za polo-deštruktívnu. Presne navrtaný otvor nemusí poškodiť integritu testovanej súčiastky, a v mnohých prípadoch môže byť upravený tak, aby sa súčiastka mohla vrátiť do

prevádzky. Metódu odvráťovania možno s výhodou použiť v prípadoch určovania napätosti v nosných konštrukciách, pri ktorých významnú úlohu má zaťaženie vlastnou tiažou, resp. tiažou ďalších prvkov.

V praktických aplikáciách sa vŕta obyčajne slepý otvor. Geometria otvoru je však tak zložitá, že nie je možné nájsť riešenie pre určené veľkosti zvyškových napätí v uzavretom tvare. Preto sa zavádzajú empirické koeficienty. Jednoduchší prípad nastáva vtedy, ak je otvor vŕtaný skrz súčiastku.

Meranie je založené na šiestich základných krokoch:

- Špeciálna meracia ružica s tromi tenzometrickými snímačmi je umiestnená na meranom objekte v mieste, kde sa majú určiť zvyškové napätia. Tenzometrická ružica je použitá preto, lebo vo všeobecnosti sa meria rovinná napätosť.
- Tenzometrické snímače sú spojené s meracou jednotkou pre statické meranie deformácii.
- Presné vŕtacie zariadenie je pripojené k meranému objektu a je vycentrované do stredu ružice.
- Po vynulovaní údajov zo snímačov sa navŕta malý plytký otvor v strede ružice.
- Zaznamenajú sa údaje zo snímačov, ktoré odpovedajú uvoľneným deformáciám.
- Použitím špeciálneho výpočtu sa z nameraných hodnôt určia veľkosti a smery hlavných zvyškových napätí.



Obr.1 Usporiadanie tenzometrov v ružici

Tento postup je jednoduchý a je štandardizovaný normou USA ako ASTM E837-1 (American Society for Testing and Materials). Použitím komerčne dodávaných zariadení a dodržaním predpisov opísaných v štandarde ASTM, je možné vykonávať meranie rutinne kvalifikovanou osobou bez nutnosti zložitej expertízy. Metóda je veľmi univerzálna, použiteľná v laboratóriu aj v teréne pre konštrukcie rôznej veľkosti a tvaru.

Bežný postup pri meraní je ten, že sa merajú tri nezávislé radiálne deformácie pomocou odporových tenzometrov, ktorých najčastejšie usporiadanie do meracej ružice ukazuje obr.1. Uhly medzi snímačmi môžu byť ľubovoľné (ale musia byť známe). Pre jednoduchší ďalší výpočet je však výhodná orientácia snímačov znázornená na obrázku.

Norma ASTM E 837-1 rozdeľuje skúmané vzorky na tri skupiny:

- vzorka ktorej hrúbka je väčšia ako 1,2 D je považovaná za „hrubú“,
- vzorka ktorej hrúbka je menšia ako 0,4 D je považovaná za „tenkú“,
- prípad, keď vzorka má hrúbku medzi 0,4 D a 1,2 D, nie je obsahom tejto normy.

Z analýzy napätosti pre slepý otvor vyplýva nasledovný vzťah pre výpočet uvoľnenej deformácie:

$$\varepsilon_r = (\bar{A} + \bar{B} \cos 2\beta)\sigma_{max} + (\bar{A} - \bar{B} \cos 2\beta)\sigma_{min}, \quad (1)$$

kde ε_r je uvoľnená deformácia meraná radiálne umiestneným tenzometrom centrovaným v bode P,

\bar{A}, \bar{B} kalibračné konštanty,

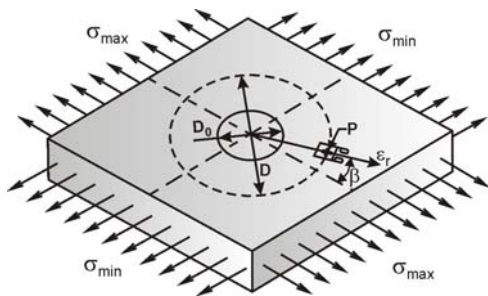
$\sigma_{max}, \sigma_{min}$ maximálne (najväčšie ťahové) a minimálne (najväčšie tlakové) hlavné napätie v okolí otvoru pred vŕtaním,

β uhol meraný v smere hodinových ručičiek od smeru tenzometra č.1 k smeru σ_{max} ,

D stredný priemer tenzometrickej ružice,

D_o priemer vyvŕtaného otvoru.

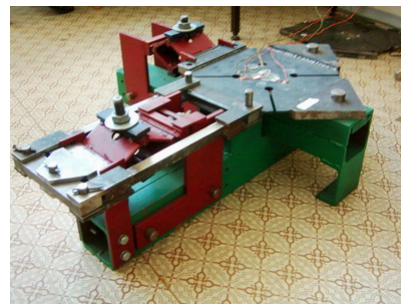
V prípade „tenkej“ vzorky je potrebný jeden súbor meraných deformácií $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ na výpočet veľkostí a smerov hlavných zvyškových napätí. Predpokladáme pritom, že tieto napätia sú rovnomerne rozložené po hrúbke vzorky.



Obr. 2 Definícia symbolov

V prípade „hrubej“ vzorky, všetky súbory nameraných deformácií $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ sa použijú na výpočet veľkostí a smerov hlavných zvyškových napätí. Predpokladáme, že napätia sú rovnomerne rozložené po hĺbke otvoru. Z tohto dôvodu je potrebné urobiť test, či zvyškové napätia sú rovnomenné po hrúbke otvoru. Tento test popisuje norma ASTM E 837-1.

Deformácie $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ namerané pre každú hĺbku otvoru použijeme na určenie číselnej hodnoty zvyškových napätí. Číselné hodnoty konštant \bar{a} a \bar{b} sú odvodené z analýzy metódou konečných prvkov a majú dobrú zhodu s experimentálnymi výsledkami. Koeficienty je možné určiť aj experimentálnou kalibráciou. Tento postup berie automaticky do úvahy mechanické vlastnosti materiálu, geometriu tenzometrickej ružice, hĺbku otvoru a priemerovanie deformácií po ploche mriežky tenzometra. Ak sa táto metóda vykoná správne, je zatiaľ najpresnejšou metódou určovania týchto koeficientov. Jej základnou nevýhodou je však to, že musí byť zopakovaná vždy, keď sa použije iná geometria mriežky a otvoru. Zariadenia na experimentálnu kalibráciu vyvinuté na pracovisku autorov sú zobrazené na obr. 3.



Obr. 3 Zaťažovacie zariadenia pre experimentálnu kalibráciu pri rovinnej napätosti

Norma popisuje výpočet zvyškových napätí len pre prípad, keď sa zvyškové napätia význame nemenia po hĺbke vŕtaného otvoru. V prípade, že napätia nie sú konštantné po hĺbke otvoru musíme použiť iné teórie. Experimentálna časť je potom vykonávaná po častiach, kde vŕtanie prebieha v krokovom režime a na konci každého kroku sa odčítajú hodnoty nameraných uvoľnených deformácií. Takto získaný profil uvoľnených deformácií je vstupom pre vyhodnocovacie metódy, z ktorých môže byť použitá napr.:

- prírastková metóda,
- metóda priemerných napätí,

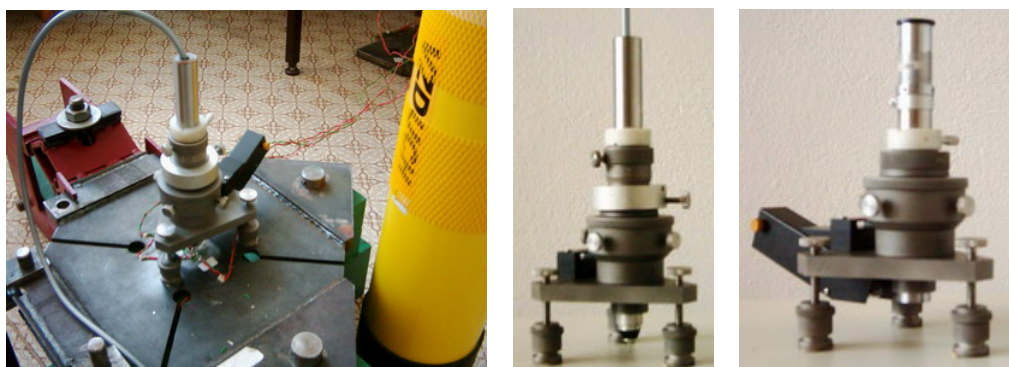
- metóda mocninového radu (Metóda Power Series),
- integrálna metóda,
- a iné.

Najnovšími uvedenými verifikáciami sa intenzívne zaoberajú napríklad na Ústave mechaniky ČVUT Praha [22-25].

Meracie systémy pre meranie zvyškových napätí

Systém RS-200

Tento systém od firmy VISHAY predstavuje zariadenie pre určovanie zvyškových napätí metódou odvrtávania. Zariadenie RS-200 (obr. 4) pozostáva z vodiaceho stojanu pre presné nasmerovanie a vŕtanie otvoru v strede tenzometrickej ružice.



Obr. 4 Zariadenie RS-200

Zariadenie je s meraným prvkom spojené nôžkami, ktoré umožňujú aplikáciu na nerovné, alebo zaoblené povrchy. Nastavenie vodiaceho zariadenia vzhľadom k ružici sa zabezpečuje špeciálnym mikroskopom zasunutým do vodiaceho otvoru a následným nastavením nitkového kríža presne nad tenzometrickej ružice. Mikroskop sa tiež používa na meranie priemeru otvoru po jeho vyvrtaní. Po nastavení zariadenia a jeho fixácii sa namiesto mikroskopu vloží do vodiaceho otvoru vŕtacie zariadenie s frézou, ktorá slúži na vyvrtanie otvoru. Vŕtacie zariadenie je vybavené univerzálnym nastavcom pre pružné pripojenie na vŕtačku. Systém umožňuje malo-rýchlostné vŕtanie do mäkkých materiálov, ale aj vysokorýchlostné vŕtanie do tvrdých materiálov.

Systém SINT MTS-3000

Systém SINT MTS-3000 možno považovať za špičkové zariadenie pre určovanie zvyškových napätí metódou odvrtávania (obr. 5). Systém významne zjednodušuje, automatizuje a komputerizuje určité operácie, pri ktorých bol doteraz nevyhnutný ľudský zásah a takto má zabezpečiť ľahké a kompletne meranie.

Najviac boli brané skúmané operácie, významne ovplyvňujúce presnosť a spoľahlivosť určenia zvyškových napätí, najmä:

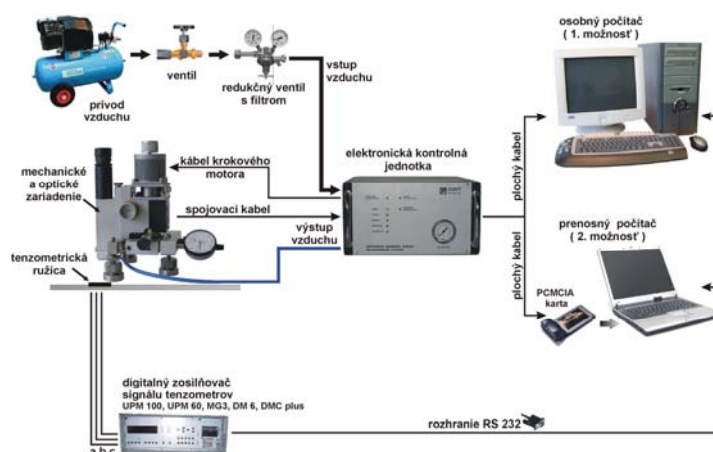
- centrovanie osi vŕtania so stredom ružice napätosti,
- automatická identifikácia rozmerov otvoru na začiatku vŕtania a meranie hĺbky otvoru po každom kroku vŕtania,
- automatické vŕtanie otvoru so špecifickým prírastkom uvoľnených napätí,
- meranie priemeru otvoru a jej excentricity.

Automatizácia a zjednodušenie týchto operácií ponúka značné výhody, najmä však kvantitatívne odčítania hodnôt napätí vykoná s veľkou presnosťou priamo v určitej hĺbke otvoru. To je nevyhnutné pri určovaní správania sa zvyškových napätí po hrúbke vzorky. Pre tento účel sa používa výpočtový softvér, optimalizovaný na spracovanie experimentálnych dát a výpočet zvyškových napätí po hrúbke vzorky, podľa štandardu ASTM E 837-1.



Obr.5 Systém SINT MTS-3000

Systém je možné použiť s digitálnymi zosilňovačmi (obr. 6) ale aj s analógovými modelmi.



Obr.6 Schéma meracieho systému s digitálnym zosilňovačom.

Zariadenie je polohované v troch osiach na troch nohách z nehrdzavejúcej ocele. Nohy obsahujú magnety pre umiestnenie na rovných plochách, pričom nohy môžu byť i naklonené pre adaptáciu zariadenia na nerovné plochy. Nohy sú spojené k telesu zariadenia tyčami s nastaviteľnou dĺžkou pre polohovanie vertikálnej hlavy kolmo k ploche vrtania

Srdcom systému je jednotka, pozostávajúca z mikroskopu a vysokorýchlostnej turbíny. Obidva tieto komponenty sú pevne prichytené k telesu systému, preto nie je potrebné ich zmontovať a rozmontovať pre vrtanie a kontrolu otvoru. Vzduchová turbína pri rotácii okolo 300 000 ot/min môže vrtáť otvory rozličných priemerov podľa typu frézy. Mikroskop má dve funkcie: umožňuje perfektné nastavenie frézy vzhľadom na referenčné body na ružici napätí a zároveň kontrolu otvoru meraním jej efektívneho priemeru. Špeciálne konštruovaný mikroskop má systém pre zmenu polohy okulára a križa podľa osi vrtania.

Základňa zariadenia pozostáva z dvoch spojených pojazdov. Pohyb sa deje medzi čapmi z kalenej ocele a presnými ložiskami, takže radiálna vôľa sa prakticky rovná nule. Horizontálne posuvy sú nastavované manuálne pomocou gombíkov a posunutie je merané odchýlkomermi. Kontrolné operácie a získavania dát je ovládaná pomocou špeciálneho

softvéru, vstupno/výstupnej karty a elektronického zariadenia. Hlavný program umožňuje pri vŕtaní otvoru:

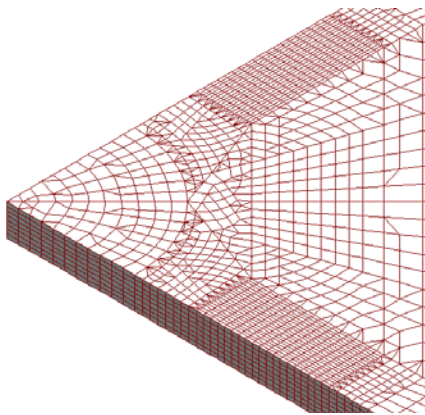
- sekvenciu krok po kroku,
- automatickú sekvenciu.

Vyhodnotenie napätí umožňuje optimalizáciu dát ohľadom namáhania a hĺbky, získaných počas vŕtacej operácie a výpočet zvyškových napätí. Pre výpočet zvyškových napätí ponúka softvér nasledovné procedúry:

- štandard ASTM E 837,
- integrálnu metódu,
- metódu Power Series,
- Kockelmannovu metódu.

Overovanie teoretického základu metódy odvrťavania

Pri testovaní meraní zvyškových napätí použitím metódy odvrťavania bol použitý systém RS-200 a systém SINT MTS-3000. Testovanie bolo vykonané na vzorkách, ktoré boli vystavené jednoosovej i rovinatej napätosti, pričom vzorky boli vyrobené v predpísanom tvare, vyžihané aby sa odstránili zvyškové napätia od technológie výroby a zaťažované v zariadeniach, kde bolo možné vyvolať rovnomernú jednoosovú i rovinnú napätosť. Nerovnomerné rozloženie napätí po hrúbke vyžihanej vzorky v dôsledku ohybového namáhania bolo vykonané na votknutom nosníku. Tu treba poznamenať že uvedenou problematikou testovania vhodnosti uplatnenia procedúr pre nerovnomerné rozloženie napätia po hrúbke sa veľmi intenzívne venuje kolektív autorov ČVUT Praha a veľmi zaujímavé výsledky týchto testov sú publikované v prácach [22-25].



Obr.7 MKP model tenzometrickej ružice

Testovanie uvedených postupov bolo tiež realizované metódou reflexnej fotoelasticimetrie a pomerne zaujímavé výsledky verifikované MKP sú obsahom riešenia dizertačnej práce [5]. V riešeniach uvedeného problému sa pokračuje, lebo ako vyplýva z výskumov, aktuálne teórie metódy odvrťavania nie sú dostatočne presné. V súčasnosti sa veľmi intenzívne pracuje na overení toho, či funkcia určujúca rozloženie napätia je dostatočne vhodná na popisovanie takého komplikovaného stavu, aký nastáva v okolí odvrťaného otvoru.

Bolo vykonaných niekoľko simulácií pomocou metódy konečných prvkov na rôznych modeloch pre rovnomerné aj nerovnomerné zaťaženie po hrúbke vzorky.

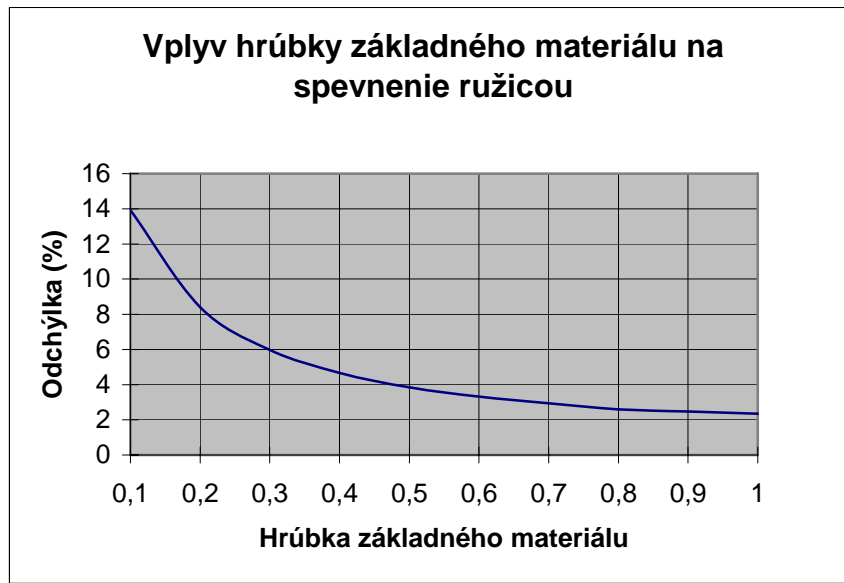
Tieto výpočty sa verifikovali pomocou teoretických výpočtov a porovnali s aktuálnou teóriou metódy odvrťavania. Podľa zistených výsledkov možno zhodnotiť, že signálová funkcia z tenzometrov pre ťahové napätie je periodickou funkciou uhla α a je rovnaká pre odlišné hĺbky otvoru. Funkcia, ktorá bola navrhnutá v súčasnej teórii metódy odvrťavania dostatočne presne vystihuje tvar danej signálovej funkcie.

Ďalším krokom v tejto analýze bolo vytvorenie modelu tenzometrickej ružice s konkrétnymi rozmermi (obr. 7)

Bol navrhnutý postup na určovanie pomerných deformácií v jednotlivých tenzometroch takým spôsobom, aby čo najpresnejšie simuloval získavanie pomerných deformácií z jednotlivých tenzometrov. Skúmal sa pri tom vplyv rotácie tenzometrickej ružice okolo osi

otvoru na určovanie kalibračných koeficientov \bar{a} a \bar{b} . Taktiež táto simulácia potvrdila, že funkcia popisujúca rozloženie napätia v okolí odvráteného otvoru je navrhnutá správne. Taktiež sa zistilo, že uhlová poloha tenzometrickej ružice nemá vplyv na výpočet zvyškových napätí. Taktiež veľmi zaujímavé výsledky sa objavili pri analýze vplyvu tenzometrickej ružice na uvoľnené deformácie v okolí odvráteného otvoru.

Pri tejto analýze bolo našou snahou čo najvernejšie zostaviť model tenzometrickej ružice a skúmať jej vplyv na spevnenie povrchu v okolí otvoru. Ako vzor pre model tenzometrickej ružice vytvorený pomocou metódy konečných prvkov bola tenzometrická ružica od firmy HBM RY 21. Získané výsledky sú znázornené na obrázku č. 8.



Obr.8 Vplyv hrúbky základného materiálu na spevnenie ružicou

V súčasnosti sa na pracovisku autorov pozornosť upiera na problematiku určovania zvyškových napätí nerovnomerne rozložených po hrúbke vzorky. Existuje niekoľko výpočtových metód na určovanie zvyškových napätí (Integrálna metóda, metóda power-series, Kockelmanova metóda), ktorých presnosť sa overuje pomocou MKP výpočtov a experimentov. Výsledky týchto zistení sa aplikujú do programového produktu, ktorý sa vyvíja na našom pracovisku. Cieľom programu je umožniť komplexné vyhodnotenie nameraných údajov rôznymi metódami na určovanie zvyškových napätí, zosúladienie s najnovšou verziou normy ASTM E837-01 a implementácia nových postupov a tenzometrických ružíc.

Záver

Zvyškové napätia si zasluhujú veľkú pozornosť. Zvyčajne sú nežiaduce, ťažko sa určia a nákladne sa odstraňujú. Ich prítomnosť môže byť škodlivá vo veľkých súčiastkach a nosných konštrukciách ako sú dopravné prostriedky alebo súčasti jadrových reaktorov, stojanoch výrobných strojov, mosty a pod. Závažnosť ich výskytu spojená s našimi nedostačujúcimi možnosťami ich merania alebo odstránenia poukazuje na to, že im musíme venovať zvýšenú pozornosť. Pokrok bude vyžadovať spojené úsilie schopných výskumníkov skúsených v odbore analýzy napätia, obrábania, náuky o materiáloch a prístrojového vybavenia podporovaného príslušnými hardvérovými a softvérovými prostriedkami. Súčasná technológia poskytuje primerane spoľahlivé analýzy napätia vzniknutého v dôsledku namáhania, vhodné metódy počítačového návrhu a možnosti automatizovanej výroby. Významné ale neznáme zvyškové napätie môžu anulovať tieto naše schopnosti.

Literatúra

- [1] Flaman, M. T.: Investigating of ultra high speed drilling for residual stress measurements by the centre hole method. *Experimental mechanics*, Vol. 22, No. 1, 1982, pp. 26-30
- [2] Flaman, M. T. – Herring, J. A.: SEM/ASTM Round Robin Residual stress measurement study phase 1, 304 Stainless-Steel Specimen. *Experimental techniques*, Vol. 10, No. 5, 1986
- [3] Flaman, M. T. – Herring, J. A.: Comparison of four hole producing techniques for the centre hole residual stress measurement method. *Experimental techniques*, Vol. 9, No. 8, 1985, pp. 30-32
- [4] Hrabovský, M.: Speckle holografie jako metoda pro stanovení povrchového napětí. EAN 86, Olomouc, 1986, s. 55-61
- [5] Kočan, J.: Kombinovaná metodika určenia polí deformácií a napätí s využitím metódy photostress a metódy odvrtávania, doktorandská dizertačná práca, Technická Univerzita v Košiciach, Strojnícka fakulta, Košice 2002
- [6] Kroenke, W.C. – Holloway, A. M. – Maybe W. R.: Stress calculation update in ASTM E837 Residual stress hole drilling standard. *Advances in computational engineering and science*, Tech. Science Press, vol. 1, 2000, 695-699
- [7] LU, J.: Handbook of measurement of residual stresses. Society for experimental mechanics, Fairmont press Liburn, GA, 1996, Chapter 2
- [8] Measurement of residual stress by hole drilling strain gage method. Tech. Note TN 503-4, Measurement group Raleigh NC
- [9] Redner, S. – Perry, C.: Factors affecting the accuracy of residual stress measurements using the blind hole drilling method. *Proceedings of 7th international conference Experimental stress analyses*, August 1982, pp. 604-616
- [10] Rendler, N. J. – Vigness, I.: Hole drilling strain gage method of measuring residual stresses. *Experimental mechanics*, Vol. 6, No. 12, 1966, pp. 577-586
- [11] Senko, P.: Analýza metód redistribúcie napätí, TU v Košiciach, September 2003, Košice
- [12] Schajer, G. S.: Application of finite element calculations to residual stress measurements. *Journal of engineering materials and technology*, Transaction, ASME, Vol. 103, April 1981, pp.157-163
- [13] Schajer, G. S.: Judgement of residual stress field uniformity when using a hole drilling method. *Proceeding of international conference on residual stresses II*, Nancy, France, November 23-25, 1988, pp. 71-77
- [14] Schajer, G. S.: Measurement of non-uniform residual stresses using the hole drilling method. *Journal of engineering materials and technologies*, Vol. 110, No.4, 1988, Part.1, pp. 338-343, Part 2, pp.344-349
- [15] Schajer, G. S. – Tootoonian M.: A new rosette design for more reliable hole drilling residual stresses measurements, *Experimental mechanics*, Vol. 37, s. 299-306
- [16] Schajer, G. S.: Strain data averaging for the hole drilling method. *Experimental techniques*, Vol .15, 1991, s. 25-28
- [17] Šarga, P.: Možnosti využitia MTS 3000 pri kvantifikácii zvyškových napätí využitím princípov mechatroniky, TU v Košiciach, September 2003, Košice
- [18] Trebuňa, F.: Some problems of accelerating the measurements and evaluating the stress fields by the photostress method. *Experimental techniques*, 1990, s. 36-40

- [19] Trebuňa, F. a kol.: Možnosti využitia metód analýzy deformácií a napätí pre hodnotenie úžitkových vlastností plechov. Sjf TU v Košiciach, 2000
- [20] Trebuňa, F. a kol.: Stanovenie zvyškových napätí na oceľových pásoch a na rúrach vyrobených z vysokopevných ocelí v súvislosti s porovnaním vlastností pás – rúra v závislosti od hrúbky pásu a priemeru rúry. Sjf TU v Košiciach, 2000
- [21] Trebuňa, F., Šimčák, F.: Kvantifikácia zvyškových napätí tenzometrickými metódami, Grafotlač Prešov, 2005
- [22] Vítek, K. a kol.: Theoretical analyses of the hole drilling method used for the residual stress identification. Czech technical university in Prague, 2003
- [23] Vítek, K. – Doubrava, K. – Holý, S. – Mares, T.: Hole drilling method test using bending specimen. EAN 2002, CTU Prague 2002, pp. 267-272, ISBN 80-01-02547
- [24] Vítek, K. a kol.: Residual stress of elbow tubes. CO-MAT-TWCH 2002, International conference, Trnava, STU BA 2002, pp. 438-441, ISBN 80-227-1768-1
- [25] Vítek, K. a kol.: Analysis of the hole drilling method theory for residual stress identification. Summer workshop of applied mechanics, Department of Mechanics, Faculty of Mechanical Engineering, Czech Technical University in Prague, June 2003, pp. 407-417, ISBN 80-01-02739-2