

E xperimentální A nalýza N apětí

2004

IS IT POSSIBLE TO CONSIDER „STANDARD“ METHODS OF DETERMINATION OF RESIDUAL STRESSES BY HOLE-DRILLING TO BE DEFINITIVE?

JE MOŽNÉ „ŠTANDARDNÚ“ METÓDU PRE URČOVANIE ZVÝŠKOVÝCH NAPÄTÍ ODVRTÁVANÍM POVAŽOVAŤ ZA DEFINITÍVNU?

František Trebuňa, František Šimčák, Jozef Bocko, Peter Trebuňa,
Peter Senko, Patrik Šarga¹

The hole-drilling strain gage method allows determine stresses near to unloaded surface of the structural member. By specially configured strain gage rosette bonded to the surface and a hole introduced into the structure through the center of the gage, the released strains are measured and according to formulas for hole through the entire part as well as for blind hole it is possible to assess the principal normal stresses. 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

Úvod

Zvyškové napätia vznikajú počas všetkých technologických procesov. V mnohých prípadoch je potrebné poznať hodnoty zvyškových napätí kvôli správne návrhu maximálneho prevádzkového zaťaženia konštrukcie. Určovanie týchto napätí je založené na rôznych experimentálnych metódach. Základným predpokladom experimentálnych metód je nulové hlavné napätie v smere kolmom na nezaťažený povrch v meranom bode. Tento predpoklad dobre odpovedá skutočnosti pre malú hĺbku pod povrchom. Najrozšírenejšou modernou technikou na meranie zvyškových napätí je metóda odvtavania. Metóda odvtavania vychádza z relaxácie napätí potom, keď do stredu tenzometrickej ružice vyvítame otvor s polomerom R_0 . Keď sa materiál vrátaním odoberie, uvoľnené deformácie sú zazna-menávané pomocou tenzometrov (radiálna deformácia ϵ_r v smere tenzometra), z čoho môžeme vypočítať smer a veľkosť hlavných napätí. Táto metóda je polodeštruktívnou, lebo malá povrchová deštrukcia (malá čo do hĺbky aj do priemeru) často neovplyvní funkciu zariadenia.

¹ prof. Ing. František Trebuňa, CSc., prof. Ing. František Šimčák, CSc., doc. Ing. Jozef Bocko, CSc., Ing. Ing. Peter Trebuňa, Ing. Peter Senko, Ing. Patrik Šarga: Technical University in Košice, Faculty of Mechanical Engineering, De-partment of Applied Mechanics and Mechatronics, Letná 9, 041 87 Košice, Slovakia, tel.: +421556022462, e-mail: frantisek.trebuna@tuke.sk

Teoretický základ metódy odvítavania a vyhodnocovania zvyškových napätí bol odvodený pre malý otvor vŕtaný cez tenkú širokú stenu, v ktorej je rovnomerná rovinná napätosť.

Vzťah pre rovinnú napätosť môže byť odvodený z Kirschovho riešenia použitím princípu superpozície pre lineárne elastický homogénny a izotropný materiál. Pomerná deformácia v definovanom smere je určená vzťahom $\varepsilon_{(\alpha)} = A(\sigma_x + \sigma_y) + B(\sigma_x - \sigma_y) \cdot \cos 2\alpha$, kde α je uhol medzi smerom hlavného napätia σ_x a stanoveného smeru radiálnej deformácie $\varepsilon_{(\alpha)}$. Priemer otvoru a materiál je zohľadnený v konštantách A, B.

Hoci koncepcia je úplne všeobecná, popisovaná skúšobná metóda je použiteľná v tých prípadoch, kde sa napätia významne menia s hĺbkou otvoru a neprevyšujú polovicu medze pevnosti. Ako už bolo uvedené, táto metóda zapríčiňuje určité poškodenie, preto môže byť použitá len v prípadoch, keď je súčiastka postrádateľná, alebo kde vyvrtanie malého plytkého otvoru nebude mať významný vplyv na použiteľnosť súčiastky.

Zvyškové napätia sa v oblasti okolo vyvrtaného otvoru uvoľnia. Odľahčené deformácie sa merajú pomocou vhodnej tenzometrickej aparatúry. V blízkom okolí otvoru je odľahčenie úplné, keď sa hĺbka vŕtaného otvoru blíži k 0,4 stredného priemeru D tenzometrickej ružice.

Stručný opis problematiky a definovaných štandardných postupov

Uvoľnené deformácie ε_1 , ε_2 , ε_3 sa merajú pomocou troch zhodne očíslovaných tenzometrov. Pre špeciálne aplikácie (zmena teploty) sa používa ružica s tromi párami tenzometrov. Meranie týchto troch uvoľnených deformácií poskytuje dostatok informácií pre výpočet hlavných normálových napätí a ich orientácie určeným uhlom β . Z dôvodu prehľadnosti sú hlavné zvyškové napätia σ_{\max} a σ_{\min} vyjadrené ako rovnomerné v celej oblasti okolo daného otvoru.

Zvyškové napätia sú prítomné takmer vo všetkých konštrukciách. Môžu byť dôsledkom technologických procesov výroby, alebo sa môžu vyskytnúť počas života konštrukcie. V množstve prípadov zvyškové napätia sú hlavným faktorom pre porušenie konštrukcie, obzvlášť keď je konštrukcia vystavená zaťaženiu v korozívnom prostredí. Zvyškové napätia však môžu byť i prospešné, ako napríklad tlakové napätia vzniknuté pri guličkovaní. Metóda odvítavania je praktická metóda pre určovanie zvyškových napätí i pri týchto prípadoch.

Normalizované vzory ružíc pre metódu odvítavania boli prvýkrát navrhnuté Rendlerom a Vignessom [17]. Použitie normovaných tvarov ružíc výrazne zjednodušuje výpočet zvyškových napätí. Stred ružice by mal byť jasne definovaný pred aj po vŕtaní. Aplikácie tenzometrov (lepenie, pájkovanie, ochranné nátery) majú prísne sledovať odporúčania výrobcov a musia zaručiť ochranu tenzometrov počas operácie vŕtania. Tenzometre by mali zostať nepretržite pripojené, pričom musí byť overovaná stabilita inštalácie. Odporúčaná odpor voči zemi je najmenej 20 000 M Ω . Prístroje na zaznamenávanie deformácií majú mať deformačné rozlíšenie $\pm 20 \times 10^{-6}$, so stabilitou a opakovateľnosťou merania najmenej $\pm 20 \times 10^{-6}$. Vodiče od každého tenzometra by mali byť čo najkratšie s trojdrôtkovým zapojením s teplotnou kompenzáciou [15] pre ružice typu A a B. Polmostíkové zapojenie by malo byť použité pre ružice typu C, aby výsledné výstupy zodpovedali označeniu ε_1 , ε_2 , ε_3 . Vo všeobecnosti príprava má byť obmedzená na také postupy, ktoré nespôsobujú významné zvyškové povrchové napätia. Úprava povrchu a aplikácia tenzometrov je podmienená odporúčaním výrobcov použitého lepidla. Vyžaduje očistenie a odmastenie povrchu. Pre aplikáciu tenzometrov je zvyčajne nevyhnutný hladký povrch. Musíme sa vyhnúť brúseniu a obrábaniu, ktoré môže zmeniť povrchové napätia. Kvôli

ochrane tenzometrov je dovolená hranica medzi okrajom otvoru a koncami slučiek tenzometrov 0,30 mm. Potreba tejto hranice limituje maximálny dovolený priemer D_0 vrtaného otvoru. Minimálny odporúčaný priemer otvoru je 60% maximálneho dovoleného priemeru. Ak pomer D_0/D narastá, citlivosť metódy stúpa približne s druhou mocninou pomeru priemerov. Vo všeobecnosti sa odporúča väčší otvor, kvôli zvýšenej citlivosti. Stred vrtaného otvoru sa má zhodovať so stredom tenzometrickej ružice v rozmedzí hodnôt $\pm 0,004 D$, alebo $\pm 0,025$ mm, podľa toho, ktorá je väčšia. Chyby spôsobené nestotožnením vrtaného otvoru so stredom tenzometrickej ružice môžu vyvolávať významné chyby vo výpočte napätia. Aby sme sa vyhli týmto chybám, odporúča sa použiť optické zariadenie pre centrovanie stojana. Výber vrtacej operácie a nástroja musí minimalizovať alebo eliminovať vznik plastických deformácií v okolí vrtaného otvoru.

V ďalšom je poukázané na ďalšie odvítavacie techniky, ktoré boli preskúmané a uznané ako vhodné pre metódu odvítavania:

Obrábanie prúdovým brúsením. Je to úspešne aplikovaná metóda na vytváranie otvorov, pri ktorej je vysokorýchlostný prúd vzduchu obsahujúci jemné brúsne častice usmernený proti obrobku cez dýzu malého priemeru. Tento spôsob nie je vhodný pre mäkkšie materiály, ako napr. meď.

Vrtanie pri vysokej rýchlosti (viac ako 400 000 ot/min.) so vzduchovou turbínou má tiež úspešné použitie v rôznych aplikáciách. Táto technika sa považuje za všeobecne vhodnú s výnimkou veľmi tvrdých materiálov.

Čelné frézy, karbidové vrtáky a modifikované frézy sú tiež úspešne použité v množstve výskumných prác. Ukazuje sa, že pomalo-rýchlostné vrtanie s čelnou frézou môže byť menej vhodné ako obrábanie prúdovým brúsením alebo vysoko-rýchlostné vrtanie.

Pretože každé zvyškové napätie vyvolané nevhodne zvolenou vrtacou metódou má nepriaznivý vplyv na presnosť merania, odporúča sa verifikácia vybraného procesu, hlavne v prípade ak nie sú s jej použitím dostatočné skúsenosti. Verifikácia musí byť realizovaná pri identických tenzometrických ružiciach, identických materiáloch, priemerov vrtaných otvorov a pod.

Najčastejšie sa pre vylúčenie prídavného napätia od vrtania vzorky tepelne spracovávajú žiňaním. Súčasný výskum ukazuje, že obrábanie elektrickými výbojmi môže byť tiež vhodnou metódou na vyrezanie malej vzorky z materiálu bez napätí. Ak odvítavacia metóda vytvára predpoklady pre merateľné hodnoty zvyškových napätí, ktoré sú reprodukovateľné, mala by sa zväziť experimentálna kalibrácia. Keď pri odvítavaní používame čelnú frézu je potrebné vyvíjať veľmi malý osový tlak a postupovať veľmi pomaly, kvôli dostatočnému času na tepelnú disipáciu. Vrtanie je potrebné vykonávať pri konštantnej teplote. Pred začatím operácie vrtania sa vynulujú údaje z každého tenzometra. Vrtanie sa realizuje podľa jednej z procedúr uvedených v ASTM E 837-1, ktoré závisia od hrúbky vzorky.

Vzorka, ktorej hrúbka je väčšia ako 1,2 D je považovaná za „hrubú“. Pre takúto vzorku potrebujeme osem súborov údajov o deformáciách ϵ_1 , ϵ_2 , ϵ_3 postupne tak, ako vzrastá hĺbka otvoru pri prírastkoch 0,05 D, až do konečnej hĺbky 0,4 D. Je možné tiež použiť iné podobné prírastky, ale sú menej vhodné na výpočty z toho dôvodu, že vyžadujú dodatočnú interpoláciu, alebo extrapoláciu kalibračných konštánt. Vzorka, ktorej hrúbka je menšia ako 0,4 D je považovaná za „tenkú“. Pre takúto vzorku získame jeden súbor údajov o deformáciách ϵ_1 , ϵ_2 , ϵ_3 , potom ako vyvrtáme priechodzí otvor cez celú hrúbku vzorky. Prípad, keď vzorka má hrúbku

medzi 0,4 D a 1,2 D, nie je obsahom tejto normy. Pre takúto vzorku môže byť aproximácia výsledkov, získaná použitím postupu pre priechodzí otvor a interpoláciou kalibračných dát daných v tabuľke č.1 novej ASTM 837-1 pre slepý a priechodzí otvor. Takto získané výsledky zvyškových napätí sú potom uvádzané ako „nenormované“ a „aproximované“.

Keď pracujeme s „hrubou“ vzorkou, mali by sme urobiť test na kontrolu, či zvyškové napätia sú rovnomerné po hĺbke otvoru. V takomto prípade určíme numericky väčší súbor kombinácií nameraných deformácií. Priebehy týchto veličín by mali poskytnúť dátové body veľmi tesné ku krivkám (pozri [20]). Dátové body, ktoré sú vzdialené od kriviek viac ako $\pm 3\%$ naznačujú buď podstatnú napäťovú nerovnomernosť po hrúbke materiálu, alebo chyby v meraní deformácie. V tomto prípade sú namerané dáta neakceptovateľné pre výpočet zvyškových napätí prostredníctvom procedúry popísanej v norme. Niektoré publikácie, ako napr. [11] podávajú detailné informácie o metódach pre vyhodnotenie nerovnomerných napätí z dát získaných prírastkovým vrtaním otvoru. Tieto výpočty nespádajú do obsahu tejto skúšobnej metódy a grafický test nie je dostatočným indikátorom rovnomernosti napäťového poľa. Vzorky s výrazne nerovnomernými poliami napätí môžu udávať percentové krivky uvoľnenej deformácie. Hlavným účelom testu je identifikovať veľké nerovnomerné polia napätí a tiež chyby v meraní deformácie. Tento test nerovnomernosti napätia je použiteľný len keď pracujeme s „hrubou“ vzorkou.

V prípade „tenkej vzorky“ je na výpočet veľkostí a smerov hlavných zvyškových napätí potrebný len jeden súbor meraných deformácií ε_1 , ε_2 , ε_3 . Predpokladáme pritom, že tieto napätia sú rozložené rovnomerne po hrúbke vzorky. Väčšie (ťahové) alebo menšie (tlakové) hlavné napätie σ_{\max} smeruje pod uhlom β meraným v smere hodinových ručičiek od smeru tenzometra 1. Podobne, menšie (ťahové) alebo väčšie (tlakové) hlavné napätie σ_{\min} smeruje pod uhlom β meraným v smere hodinových ručičiek od smeru tenzometra 3. Priamy výpočet uhlu β môžeme realizovať použitím dvojparametrickej funkcie arctan (v niektorých programovacích jazykoch označených ako ATAN2), kde sú brané na zreteľ znamienka čitateľa a menovateľa, alebo môžeme použiť výsledok jednoparametrickeho výpočtu nastavený podľa potreby vo vhodnom rozsahu definovanom v tabelárnej forme.

V prípade „hrubej“ vzorky sa všetky súbory nameraných deformácií ε_1 , ε_2 , ε_3 použijú na výpočet veľkostí a smerov hlavných zvyškových napätí. Predpokladáme, že napätia sú rovnomerné po hĺbke otvoru. Výpočet je možné urobiť pri použití len jedného súboru nameraných deformácií, povedzme pre hodnoty v hĺbke 0,4 D. Tento výpočet sa môže použiť na získanie rýchlych odhadov zvyškových napätí, no preferovaná je metóda priemerovania napätí, pretože využíva všetky namerané dáta a významne redukuje efekt náhodných chýb merania deformácií. Pre každú hĺbku otvoru odpovedajúcu ôsmim nameraným súborom deformácií ε_1 , ε_2 , ε_3 použijeme tabuľku 1 normy ASTM E 837-1 na určenie číselnej hodnoty kalibračných konštánt \bar{a} a \bar{b} zodpovedajúcich priemeru otvoru a typu použitej ružice. Číselné hodnoty v tejto tabuľke sú odvodené z analýzy metódou konečných prvkov [21] a zabezpečujú dobrú zhodu s experimentálnymi výsledkami. Ak je nutné, môžeme konštanty \bar{a} a \bar{b} , ktoré udávajú vzťah medzi napätiami σ_{\max} a σ_{\min} a deformáciami ε , určiť použitím kalibračného experimentu. Keď urobíme kalibráciu pre „tenkú“ vzorku (hrúbka je menšia ako 0,4D), použijeme rovnakú hrúbku ako má aktuálna skúšaná vzorka. Keď robíme kalibráciu pre „hrubú“ vzorku, hrúbka je väčšia lebo rovná 1,2D.

Pred vrtaním otvoru aplikujeme kalibračné sily v 5-tich rovnakých krokoch až po maximálnu silu. Maximálna sila by nemala vytvárať kalibračné napätie väčšie ako jedna tretina medze

pevnosti materiálu. Kombinácia deformácií p , q a t , zodpovedajúca nameraným deformáciám ε_1 , ε_2 , ε_3 umožňuje vykresliť grafy závislostí p , q , a t na aplikovanom napätí, pričom by to mali byť priamky. Následne určíme gradienty g_p , g_q a g_t . Keď pracujeme s „tenkou“ vzorkou, vrtáme priebežný otvor a opakujeme meranie deformácií pre sekvenciu piatich rovnakých zaťažujúcich krokov, až do maximálnej sily. Keď pracujeme s „hrubou“ vzorkou, vrtáme slepý otvor v sérii ôsmich hĺbkových prírastkov po $0,05 D$, až do maximálnej hĺbky $0,4D$. Po každom hĺbkovom prírastku opakujeme meranie deformácie v sekvencii piatich rovnakých zaťažujúcich krokov, až do maximálnej sily. Odpočítame gradienty p , q a t merané pred vyvrtaním otvoru od zodpovedajúcich gradientov v každej hĺbke diery podľa vzťahov

$$(g_p)_{\text{cal}} = (g_p)_{\text{hole}} - (g_p)_{\text{before}},$$

$$(g_q)_{\text{cal}} = (g_q)_{\text{hole}} - (g_q)_{\text{before}},$$

$$(g_t)_{\text{cal}} = (g_t)_{\text{hole}} - (g_t)_{\text{before}}.$$

Kalibračné hodnoty konštánt \bar{a} a \bar{b} pre osem hĺbok získame podľa vzťahov:

$$\bar{a} = -2(g_p)_{\text{cal}} \cdot E / (1 + \mu),$$

$$\bar{b} = 2\sqrt{(g_q)_{\text{cal}}^2 + (g_t)_{\text{cal}}^2} \cdot E,$$

kde E a μ je modul pružnosti a Poissonove číslo materiálu vrstvy.

Zvyškové napätia určené touto metódou vykazujú odchýlku nepresahujúcu $\pm 10\%$ za predpokladu, že sú dodržané všetky podmienky a vrtacia technika nevyvoláva v materiáli významné napätia z obrábania. Od týchto podmienok sa môže najviac líšiť predpoklad, že zvyškové napätia sa významne nemenia s hĺbkou otvoru. V tomto prípade môže byť chyba väčšia ako 10% . Testovací program round-robin [27] bol aplikovaný na vzorke z uhlíkovej ocele, ktorá bola odvítaná pre uvoľnenie napätí. Bolo použité vysokorýchlostné vrtanie, pomalorýchlostné vrtanie, ako aj vrtanie prúdom vzduchu. Vo všetkých prípadoch bolo meranie vykonané v skúšobných laboratóriách na rovnakých vzorkách. Štandardná odchýlka bola v priemere 14 MPa .

Testovací program round-robin [5] bol uplatnený aj na vzorke z nehrdzavejúcej ocele, v ktorej boli odstránené napätia a testovanie bolo vykonané v rôznych laboratóriách použitím rôznych metód. Meranie zvyškových napätí bolo s využitím vysokorýchlostného vrtania a vrtania prúdom vzduchu. Štandardná odchýlka nepresahovala v priemere 12 MPa pri obidvoch vrtacích technikách. Výsledky meraní vykonaných použitím pomalorýchlostného vrtania mali pomerne veľký rozptyl.

Tento testovací program bol zabezpečený spoločnosťou Residual Stress Technical Division of Society for Experimental Mechanics.

Presnosť tejto metódy dosiahnutá na vzorkách z uhlíkovej a nehrdzavejúcej ocele nemusí byť identická pre iné materiály. Technika vysokorýchlostného vrtania bola vyhodnotená ako efektívna aj pri takých rozdielnych materiáloch ako sú napr. meď, hliník, zirkónium a pod. Metóda postupného odvítavania a vyhodnocovania má pozitívny dopad na dosiahnuté výsledky a zvyšuje presnosť. Náhodné experimentálne chyby v jednotlivých vrtaných hĺbkach sú najčastejšie spôsobené chybami odčítavania deformácie, anomáliami tenzometrov, resp. zmenami testovacieho prostredia. Technika priemerovania dát umožňuje znížiť veľkosť náhodnej chyby, čo spresňuje určenie hodnôt [23].

Použitie ružice so šiestimi tenzometrami zlepšuje pri metóde odvítavania presnosť merania avšak vyžaduje väčšiu námahu pri inštalácii a je cenovo nákladnejšia. Pre všeobecné použitie dávajú ružice typu A a B uspokojujúce výsledky. Ružica typu C má hlavné použitie pri kritických aplikáciách a pre prácu s nízko-vodivými materiálmi v miestach teplotných zmien.

Overovanie metódy odvítavania

Pri testovaní meraní zvyškových napätí použitím metódy odvítavania bol použitý systém RS-200 a systém SINT MTS-3000.

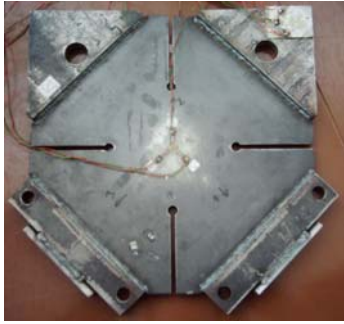
Systém RS-200 od firmy Vishay predstavuje zariadenie pre určovanie zvyškových napätí metódou odvítavania. Zariadenie RS-200 pozostáva z vodiaceho stojanu pre presné nasmerovanie a vrtanie otvoru v strede tenzometrickej ružice.

Zariadenie je s meraným prvkom spojené nôžkami, ktoré umožňujú aplikáciu i 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 tenzometrickú ružicu. Po nastavení zariadenia a jeho fixácii sa na miesto mikroskopu vloží do vodiaceho otvoru vrtacie zariadenie s frézou, ktorá slúži na vyvrtanie otvoru. Vrtacie zariadenie je vybavené univerzálnym nástavcom pre pružné pripojenie na vrtáčku. Systém umožňuje pomalorýchlostné vrtanie do mäkkých materiálov, ale aj vysokorýchlostné do tvrdých materiálov. Metóda vysokorýchlostného vrtania je nezávislá na obsluhu a je vo všeobecnosti vhodnejšia pre použitie ako fréza.

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

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 meraní zmien hodnôt zvyškových napätí po hrúbke vzorky, podľa štandardu ASTM E 837-1

Testovanie bolo vykonané na vzorkách, ktoré boli vystavené jednoosovej i rovinnej napätosti, pričom vzorky boli vyrobené v predpísanom tvare (pozri obr. 1), vyžihané aby sa odstránili zvyškové napätia od technológie výroby a zaťažované v zariadeniach podľa obr. 2., 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 pod vedením Vítka a veľmi zaujímavé výsledky týchto testov sú publikované v prácach [28], [29], [30] a [31].



Obr. 1 Vzorka pre testovanie hodnoty zvyškových napätí



Obr. 2 Zariadenie pre simuláciu rovinnej napätosti

Testovanie uvedených postupov bolo tiež realizované metódou reflexnej fotoelasticimetrie a pomerne zaujímavé výsledky verifikované MKP sú obsahom riešenia v dizertačnej práci [9] J. Kočana. V riešeniach uvedeného problému sa pokračuje, lebo ako vyplýva z výskumov, aktuálne teórie metódy odvítavania nie sú dostatočne presné. V súčasnosti používaná funkcia určujúca rozloženie napätia je veľmi jednoduchá na popisanie takého komplikovaného stavu. Z toho dôvodu je snaha navrhnúť novú funkciu z meraní a numerických simulácií.

Signálová funkcia z tenzometrov pre ťahové napätie je periodickou funkciou uhlu α a je rovnaká pre odlišné hĺbky otvoru. Za základ regresnej analýzy pre výpočet funkcie radiálnej deformácie v okolí otvoru kolektív riešiteľov ČVUT navrhol funkciu v tvare Fourierovho radu. Optimálna regresná funkcia pravdepodobne neobsahuje všetky frekvencie Fourierovho spektra. Možno by bola vhodná jednoduchšia funkcia s menším počtom konštánt. Zložitosť funkcie nie je problémom pre vyhodnocovanie dát prostredníctvom počítača. Vlastnosti regresných funkcií pre výber funkcie signálu sú v správe [28]. Táto funkcia bola porovnaná pre rozličné úrovne signálu a pre plytký otvor. Tvar regresie signálovej funkcie je rovnaký. Hoci zjednodušenie funkcie má za následok stratu presnosti v rozmedzí uhlu α od 45° do 135° , rast počtu regresných bodov nezlepšuje súlad funkcie. Lepšiu zhodu dosiahneme pridaním ďalších členov Fourierovho radu.

Počas vývoja procedúry pre určovanie zvyškových napätí bola odvodená nová identifikačná metóda a jej teoretický základ. Táto metóda ponúka nový prístup k interpretácii meraní získaných metódou odvítavania. Podľa matematického základu bola metóda označená ako „metóda derivácie signálu“. Nová metóda je založená na porovnaní meraného signálu z tenzometrov a funkcie odvodenej z numerickej simulácie procesu odvítavania. Takáto funkcia je originálna pre daný materiál a priemer otvoru a preto môže byť tabelovaná. Prvý krok v spracovaní dát zahŕňa aproximáciu meraných dát regresnou funkciou pre každý tenzometer. Potom je regresná funkcia derivovaná s rešpektovaním hĺbky otvoru. Pretože funkcia jednotkovej derivácie je identická pre všetky otvory danej hĺbky materiálu, môže byť táto tabelovaná. Z tejto rovnice môžeme jednoducho určiť deformáciu v hĺbke pre daný smer i-teho tenzometra. Ak poznáme tri zodpovedajúce deformácie v určitej hĺbke, hlavné zvyškové napätia môžeme jednoducho získať z Mohrovej kružnice.

Záver

Stručný opis existujúcich „štandardných postupov“ definovaných predovšetkým v norme ASTM E 837-1 ale i postupov definovaných TECH-NOT 503-4, pre určovanie zvyškových napätí metódou odvítavania má jasne deklarované problematické kroky, ktoré je potrebné

doriešiť. Na druhej strane je nutné tieto postupy zapracovať do našich i európskych noriem. O pozitívnych výsledkoch na životnosť konštrukcií pri uplatnení týchto metódik nemožno pochybovať, ale deklarované presnosti, ich verifikácia najmä pre inkrementálne odvrátavanie pri slepých otvoroch je nevyhnutná či už numerickými metódami, ale tiež overovaním správnosti predpokladov riešenia. Autori príspevku si stanovili za cieľ poukázať na problémy, ktoré je v súčasnosti potrebné riešiť, resp. čo je nevyhnutné vykonať v ďalšom období. Práve táto problematika je v súčasnosti centrom pozornosti riešiteľov štátneho projektu výskumu VEGA 1/9397/02 Adaptívne metódy výpočtov a experimentálneho overenia únosnosti nosných prvkov ľahkých a ultraľahkých konštrukčných systémov.

Literatúra

- [1] Beaney, E. M.: *Accurate measurements of residual stress on any steel using centre hole method*. Strain Journal, BSSM, Vol. 12, No. 3, pp. 99-106
- [2] Beaney, E. M. - Procter, E.: *A critical evaluation of the centre hole technique for the measurement of residual stresses*. Strain, Vol. 10, No.1, 1974, pp. 7-14, 52
- [3] Bush, A. J. – Kromer, F. J.: *Simplification of the hole drilling method of residual stress measurements*. ISA Transaction, Vol. 112, No. 3, 1973, pp. 249-260.
- [4] 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
- [5] 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
- [6] 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
- [7] Hrabovský, M.: *Speckle holografie jako metoda pro stanovení povrchového napětí*. EAN 86, Olomouc, 1986, s. 55-61
- [8] Kelsey R. A.: *Measuring non uniform residual stresses by the hole drilling method*. Proceedings, SESA, Vol. 14, No. 1, 1956, pp. 181-194
- [9] Kočan, J.: *Kombinovaná metodika určenia polí deformácií a napätí s využitím metódy photostress a metódy odvrátavania*, doktorandská dizertačná práca, Technická Univerzita v Košiciach, Strojnícka fakulta, Košice 2002
- [10] 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
- [11] Lu, J.: *Handbook of measurement of residual stresses*. Society for experimental mechanics, Fairmont press Liburn, GA, 1996, Chapter 2
- [12] Macura, P.: *Problematika vzniku, měření a snížení zbytkových napětí v kolejnicích*. Acta Mechanica Slovaca, 2/98, s. 85-92

- [13] *Measurement of residual stress by hole drilling strain gage method*. Tech. Note TN 503-4, Measurement group Raleigh NC
- [14] Perry, C. G.: *Data reduction algorithms for strain gage rosette measurements*. Experimental techniques, Vol. 12, No. 5, 1989, s. 13-18
- [15] Perry, C. C. – Lissner, H. R.: *Strain gage primer*. McGraw-Hill Book, Co, Inc. NY, 1955
- [16] 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
- [17] Rendler, N. J. – Vigness, I.: *Hole drilling strain gage method of measuring residual stresses*. Experimental mechanics, Vol. 6, No. 12, 1966, pp. 577-586
- [18] Sandifer, J. P. – Bowie, G. E.: *Residual stress by blind hole method with off-centre hole*. Experimental mechanics, Vol. 18, No. 5, 1978, pp. 173-179
- [19] 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
- [20] 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
- [21] 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
- [22] Schajer, G. S. - Tootoonian M.: *A new rosette design for more reliable hole drilling residual stresses measurements*, Experimental mechanics, Vol. 37, s. 299-306
- [23] Schajer, G. S.: *Strain data averaging for the hole drilling method*. Experimental techniques, Vol .15, 1991, s. 25-28
- [24] Trebuňa, F.: *Some problems of accelerating the measurements and evaluating the stress fields by the photostress method*. Experimental techniques, 1990, s. 36-40
- [25] Trebuňa, F. a kol.: *Možnosti využitia metód analýzy deformácií a napätí pre hodnotenie úžitkových vlastností plechov*. Sjf TU v Košiciach, 2000
- [26] Trebuňa, F. a kol.: *Stanovenie zvyškových napätí na ocelových 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
- [27] Yavelak, J. J.: *Bulk- Zero stress standard AISI 1018 Carbon-Steel Specimens*, Round Robin Phase 1. Experimental techniques, Vol. 9, No. 4, 1985, pp. 38-41
- [28] Vitek, K. a kol.: *Theoretical analyses of the hole drilling method used for the residual stress identification*. Czech technical university in Prague, 2003
- [29] Vitek, 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

- [30] Vitek, K. - Doubrava, K. - Holý, S. - Mares, T.: *Residual stress of elbow tubes*. CO-MAT-TWCH 2002, International conference, Trnava, STU BA 2002, pp. 438-441, ISBN 80-227-1768-1
- [31] Vitek, K. – Doubrava, S. – Kolman, R.: *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