

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
Fakulta strojního inženýrství  
Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

**Ing. Adam Cívín**

**KOMPLEXNÍ TEORETICKÁ ANALÝZA METODY SLOUPKU  
PRO ZJIŠŤOVÁNÍ ZBYTKOVÝCH NAPĚTÍ**

COMPREHENSIVE THEORETICAL ANALYSIS OF RING-CORE  
METHOD FOR RESIDUAL STRESS DETERMINATION

**Zkrácená verze Ph.D. Thesis**

**Obor:** Inženýrská mechanika  
**Školitel:** doc. Ing. Miloš Vlk, CSc.  
**Oponenti:** Prof. Ing. František Plánička, CSc.  
Prof. Ing. Stanislav Holý, CSc.  
Doc. Ing. Karel Frydryšek, Ph.D., ING-PAED IGIP

**Datum obhajoby:** 10/2012

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

integrální metoda, metoda konečných prvků, metoda přírůstků deformace, metoda uvolňování sloupku, metoda vrtání otvoru, tenzometrická růžice, výpočtová simulace, zbytková napětí, zdroje nejistot,

## **KEY WORDS**

integral method, finite element analysis, incremental strain method, ring-core method, hole drilling method, strain gauge rosette, numerical simulation, residual stress, uncertainty analysis,

## **MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE**

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

© Adam Cívín, 2012

ISBN 80-214-

ISSN 1213-4198

## Obsah

1 ÚVOD.....	5
2 PŘEHLED O SOUČASNÉM STAVU PROBLEMATIKY.....	6
2.1 Historie metody uvolňování sloupku.....	6
2.2 Měření homogenní zbytkové napjatosti.....	7
2.2.1 Kalibrační koeficienty pro určení homogenní zbytkové napjatosti.....	7
2.2.2 Metoda KWU (Siemens Kraftwerk Union AG, Mülheim an der Ruhr).....	7
2.3 Měření nehomogenní zbytkové napjatosti.....	8
2.3.1 Kalibrační činitele pro vyhodnocení nehomogenní napjatosti.....	8
2.3.2 Velikost a počet aplikovaných úběrů.....	8
2.4 Nejistoty měření.....	9
2.5 Vliv zaoblení dna drážky.....	9
2.6 Zakřivené povrchy.....	9
2.7 Excentricita otvoru.....	9
2.8 Pružně plastické deformace dna otvoru.....	9
2.9 Tichonovova regularizace.....	10
2.10 Využití optických metod pro snímání uvolněných deformací.....	10
2.11 Měření zbytkových napětí u nás v druhé polovině 20. století.....	10
3 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE.....	11
4 VÝPOČTOVÝ MODEL.....	12
5 VÝSLEDKY DISERTAČNÍ PRÁCE.....	13
5.1 Metoda přírůstků deformace.....	13
5.1.1 Diferenciální varianta.....	14
5.1.2 Diferenční varianta.....	15
5.2 Integrální metoda.....	16
5.3 Rozbor a zhodnocení zdrojů nejistot měření.....	19
5.3.1 Vliv hodnoty Poissonova poměru.....	20
5.3.2 Vliv hodnoty modulu pružnosti v tahu.....	21
5.3.3 Vliv velikosti průměru uvolňovaného sloupku.....	21
5.3.4 Vliv velikosti zaoblení mezi dnem a stěnou mezikruhové drážky.....	22
5.3.5 Vliv válcového zoblení povrchu tělesa.....	23
5.3.6 Vliv excentricity tenzometrické růžice.....	24
5.3.7 Vliv plastické deformace dna mezikruhové drážky.....	24
6 DISKUSE DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ.....	25
6.1 Zhodnocení inkrementální a integrální metody.....	26
6.2 Zhodnocení vlivu různých zdrojů nejistot.....	27
7 ZÁVĚR.....	27
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	28
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	31



# 1 ÚVOD

Problematika zbytkových napětí, působících bez vnějšího zatěžování v kovových i nekovových materiálech, byla předmětem mnoha studií již od počátku 20. století. Znalost charakteru zbytkové napjatosti je velmi důležitá pro stanovení velikosti celkového namáhání strojních součástí a z toho plynoucích predikcí životnosti. Zbytková napětí jsou především důsledkem předchozích technologických procesů. V nejčastějších případech se jedná o odlévání (ochlazování odlitků), obrábění, tváření (kování), svařování, tepelné a chemické zpracování (změny velikosti zrn), vliv okolního prostředí (teplota, záření), povrchové úpravy (kuličkování, válečkování) a další. Ve skutečnosti téměř všechny způsoby povrchových úprav materiálu vnášejí nepravidelně rozložená a po hloubce nehomogenní zbytková napětí. Zbytková napětí ale také mohou vznikat jako důsledek historie zatěžování strojních součástí.

Znalost velikosti a charakteru zbytkového napětí je důležitá pro volbu vhodného technologického postupu výroby součásti a pro posouzení dosažení možného mezního stavu v průběhu její celkově předpokládané životnosti.

Pro rozdělení experimentálních metod můžeme uplatnit různá kritéria. Z hlediska míry narušení celistvosti materiálu hovoříme o destruktivních, polodestruktivních (semidestruktivních) a nedestruktivních experimentálních metodách. Z hlediska principu měření rozlišujeme mechanické, fyzikální a chemické metody. Tato práce je zaměřena na detailní studii metody uvolňování sloupku, která spadá do kategorie polodestruktivních, mechanických metod pro měření zbytkové napjatosti.

Metoda uvolňování sloupku umožňuje stanovení zbytkové napjatosti v závislosti na hloubce odvrтанé drážky obdobně, jako metoda vrtání otvoru. Na rozdíl od metody vrtání otvoru není standardizována normou ASTM [4], ani jinou normou, což je její velkou nevýhodou. Z tohoto důvodu není na rozvoj metody sloupku soustředěno takové množství publikací a vědecké práce, které by přispěly k praktickému rozšíření její aplikovatelnosti do řady problémových oblastí.

K tomu, aby bylo možné metodu uvolňování sloupku plně využívat, je potřeba posoudit významnost jednotlivých vlivů, omezujících zejména samotnou aplikovatelnost a přesnost měření. Těmito vlivy, omezujícími přesnost stanovení kalibračních koeficientů nebo činitelů (a tím přesnost následného vyhodnocení homogenní nebo nehomogenní napjatosti), jsou zejména:

- předpokládané mechanické vlastnosti vyšetřovaného tělesa (modul pružnosti v tahu, Poissonův poměr),
- pevnost a tvrdost měřeného materiálu (vliv na rychlost opotřebení nástroje, výraznější zkreslení výsledků vlivem intenzivnější plastifikace materiálu u dna drážky),
- velikost vnitřního průměru uvolněného sloupku,
- velikosti jednotlivých úběrů hloubek a jejich celkový počet,
- excentricita umístění tenzometrické růžice vůči středu uvolňovaného sloupku,
- vliv pružně plastické deformace na dně a v okolí odvrтанé drážky,

- další možné geometrické odchylky vyšetřovaného tělesa od předepsaného tvaru (zaoblení povrchu tělesa, zaoblení dna drážky, kolmost uvolněného sloupku vůči rovině povrchu součásti atd.),
- přesnost měřicího řetězce,
- vnější vlivy jako teplota, záření, vibrace,
- věrohodnost a spolehlivost výpočtového modelu.

## 2 PŘEHLED O SOUČASNÉM STAVU PROBLEMATIKY

Rešeršní studie problematiky měření zbytkových napětí je primárně zaměřena na metodu uvolňování sloupku, ale i na blízká témata, pojící se obecně k vyhodnocování zbytkové napjatosti pomocí mechanických (polodestruktivních) metod. Zabývá se také popisem celosvětového rozvoje a aplikovatelností metody od jejího vzniku, až po současnou úroveň vědeckého poznání.

### 2.1 HISTORIE METODY UVOLŇOVÁNÍ SLOUPKU

Metodu uvolňování sloupku poprvé publikoval v roce 1951 Milbradt [18], který však využil otvoru (vrtaného uprostřed tenzometrické růžice) k vedení nástroje pro frézování prstencovité drážky. V roce 1953 tuto metodu dále rozvinul Gunnert [12] podle [38], který ji v kombinaci s metodou vrtání otvoru aplikoval na měření zbytkových napětí v blízkosti svarů. Měření byla prováděna mechanickými průtahoměry (extenzometry), odporové tenzometry se začaly využívat až později.

S dalším vývojem metody bylo v průběhu 70. let dosaženo uspokojivých výsledků při měření zbytkové napjatosti v závislosti na hloubce vrtaného otvoru. Metoda uvolňování sloupku byla patentována v roce 1978 Böhmem a Wolfem, ale nenašla tak široké uplatnění, jako metoda vrtání otvoru. K jejímu výraznějšímu rozvoji a rozšíření do praktického využití proto došlo až po skončení platnosti patentu v roce 1988 [14].

Přestože neexistuje žádná mezinárodně uznávaná norma s předepsaným popisem teoretického a experimentálního vyhodnocení zbytkové napjatosti metodou uvolňování sloupku, lze využít informací, stanovených normu ASTM E-837-81, do které byla roku 1981 zařazena metoda vrtání otvoru.

Významné nedostatky a praktická omezení metody vrtání otvoru vedly v 50. letech minulého století ke vzniku metody uvolňování sloupku. Proto je vhodné v rešeršní studii zmínit také rozvoj metody vrtání otvoru, která má v mnoha oblastech stejné nebo velmi podobné základy a principy.

Jedním z hlavních důvodů minimálního využívání metody uvolňování sloupku v jejím počátku byla nezbytnost použití komplikovanějšího typu měřicího zařízení a nutnost zapojování elektrické kabeláže tenzometrické růžice po každém odvrtaném úběru. To také způsobovalo nestabilitu zapojeného obvodu a vedlo k nezanedbatelným chybám měření. Tento problém vyřešila až úprava odvrtávacího zařízení, kdy kabeláž začala být vedena dutým rotujícím vřetenem. Velkou nevýhodou metody uvolňování sloupku ale stále zůstává větší narušení povrchu vyšetřovaného tělesa.

Současný stav experimentálního vyšetřování metodou uvolňování sloupku (v roce 2011) je shrnut v práci italského kolektivu Valentini et al. [39], popisující využití automatizovaného měřicího zařízení MTS3000, jehož cílem je usnadnění celkového procesu měření. Plně automatizovaný způsob měření tak dosahuje vyšší přesnosti, než je tomu u „ručně“ řízeného měření.

## **2.2 MĚŘENÍ HOMOGENNÍ ZBYTKOVÉ NAPJATOSTI**

Velmi často používanou metodou pro výpočet homogenního zbytkového napětí pomocí uvolněných přetvoření je metoda přírůstků deformace (Incremental Strain Method). U nás se aplikovatelností této metody věnují publikace skupiny pracovníků ČVUT pod vedením prof. Holého ve spolupráci se ŠKODA VÝZKUM (např. [8], [13], [40], [41]) a vlastní publikace [50] ÷ [55]. Ve světě se na rozvoji této metody podílelo mnoho autorů, zejména Keil [14], [15], dále Böhm [9], [10], Wern [45] a Wolf [46], [47].

### **2.2.1 Kalibrační koeficienty pro určení homogenní zbytkové napjatosti**

Problematikou určení kalibračních koeficientů (označovaných  $K_1$  a  $K_2$ ) pro vyhodnocení homogenní napjatosti po hloubce odvrtného otvoru se po celou dobu rozvoje metody zabývalo mnoho autorů [9], [14], [16], [46]. V počátcích metody bylo možné tyto koeficienty stanovit pouze experimentálně (derivacemi uvolněných přetvoření pro jednoosou napjatost). S nástupem výkonnějších počítačů bylo možné tyto koeficienty stanovit s větší přesností simulacemi homogenních jednoosých nebo rovinných napjatostí [8], [13], [30], [40], [51] ÷ [53] provedených metodou konečných prvků. Určení těchto kalibračních koeficientů, pro metodu přírůstků deformace, vyžaduje řešení lineárně elastického problému.

Využitím diferencí uvolněných přetvoření, naměřených pro dva různé úběry hloubek  $z_i$  a  $2z_i$ , lze stanovit relaxační koeficienty  $A$  a  $B$ . Pomocí těchto koeficientů je možné určit velikost homogenní napjatosti v rozmezí těchto dvou odvrtných hloubek [8], [9], [10], [13], [40], [46], [53]. Relaxační koeficienty lze stanovit také přepočtem z kalibračních koeficientů  $K_1$  a  $K_2$  [52]. Tento způsob užívá např. firma Siemens pro určování zbytkové napjatosti v turbínových hřídelích (podkapitola 2.2.2), dále i Škoda, viz Václavík [40].

### **2.2.2 Metoda KWU (Siemens Kraftwerk Union AG, Mülheim an der Ruhr)**

Metoda sloupku byla v Německu rozvíjena především pro zjišťování zbytkových napětí turbínových a generátorových hřídelů. Teoretický základ metody KWU uvedl ve své práci v roce 1973 Wolf [46].

Z původní metody KWU nově vychází tzv. modifikovaná Siemens – KWU metoda, která byla zavedena firmou Siemens pro kontrolu a schvalování disků turbínových a kompresorových kol a hřídelů, v jejichž povrchových vrstvách je vyžadován tlakový charakter zbytkové napjatosti.

Princip metody sestává z vytvoření mezikruhové drážky vnitřního průměru  $\varnothing d = 14$  mm, vnějšího  $\varnothing D = 18$  mm o celkové hloubce  $H = 4$  mm. Uvolněná přetvoření se na povrchu sloupku měří tenzometrickým křížem pouze ve

dvou hloubkách  $z_1 = 2$  mm a  $z_2 = 4$  mm. Je tedy nutno předem znát směry hlavních zbytkových napětí, které jsou ale u hřídelů nebo disků známy. Stejnou metodiku měření zbytkové napjatosti užívá též např. firma BHEL [7].

### 2.3 MĚŘENÍ NEHOMOGENNÍ ZBYTKOVÉ NAPJATOSTI

S homogenní napjatostí po hloubce odvrátaného sloupku se můžeme setkat pouze ve speciálních případech. V praxi se vyskytuje hlavně nehomogenní, tzn. po hloubce se měnící napjatost, jejíž přítomnost indikují větší gradienty napětí. Z tohoto důvodu musíme volit i správnou teorii, zahrnující vliv této proměnnosti napětí.

Existuje mnoho metod, které byly za tímto účelem navrženy. Uvedené pojmy byly zavedeny v souvislosti s metodou vrtání otvoru. Analogicky mohou být použity i u metody uvolňování sloupku.

- metoda přírůstků deformace [2], [9], [14], [16], [28], [45]
- metoda průměrného napětí [20], [35]
- metoda ekvivalentních homogenních napětí [42]
- integrální metoda [2], [3], [29], [45], [46], [49]
- metoda příčinkových funkcí [3], [5]

Podrobnějším popisem jednotlivých metod se ve svých publikacích dále zabývali např. Švaříček [33] ÷ [35], Schajer [28], Vlk et al. [43].

#### 2.3.1 Kalibrační činitelé pro vyhodnocení nehomogenní napjatosti

Ajovalasit et al. [3] a Zuccarello [49] se ve svých publikacích věnovali stanovení kalibračních činitelů a optimálnímu rozvržení přírůstku hloubky, pro měření nehomogenní napjatosti po hloubce, simulováním zbytkové napjatosti pomocí metody konečných prvků.

#### 2.3.2 Velikost a počet aplikovaných úběrů

Zuccarello a Ajovalasit [3], [49], se ve svých publikacích zabývají také optimalizací integrální metody. Provedenými analýzami rozdílných velikostí přírůstků hloubky pro zbytkové napjatosti (*tab. 1*) zjistili, že z hlediska kompromisu mezi volbou vhodného počtu a velikosti jednotlivých úběrů a dostatečnou přesností vyhodnocení nehomogenní napjatosti po hloubce, jsou takové přírůstky hloubky, kterým odpovídá velikost kalibračních činitelů  $a_{ii} \approx konst.$  Jedná se prvky na hlavní diagonále matice  $\bar{a}$ , které by měly být pokud možno konstantní velikosti.

*Tab. 1: Optimální rozvržení přírůstků hloubky  $\Delta z_i$  pro celkovou hloubku drážky  $H = 5$  mm [49]*

Počet úběrů	$\Delta z_1$	$\Delta z_2$	$\Delta z_3$	$\Delta z_4$	$\Delta z_5$	$\Delta z_6$	$\Delta z_7$	$\Delta z_8$	$\Delta z_9$	$\Delta z_{10}$	$\Delta z_{11}$	$\Delta z_{12}$	$\Delta z_{13}$	$\Delta z_{14}$
4	1,00	0,90	1,00	2,10										
6	0,70	0,60	0,55	0,60	0,80	1,75								
8	0,60	0,45	0,40	0,40	0,45	0,50	0,70	1,50						
10	0,55	0,40	0,35	0,30	0,30	0,35	0,40	0,45	0,65	1,25				
12	0,50	0,30	0,30	0,25	0,25	0,25	0,25	0,30	0,40	0,45	0,60	1,15		
14	0,45	0,30	0,25	0,25	0,25	0,20	0,20	0,25	0,25	0,30	0,30	0,40	0,55	1,05

## 2.4 NEJISTOTY MĚŘENÍ

Publikaci, zaměřenou výhradně na hodnocení nejistot pro metodu uvolňování sloupku, se žádnou nepodařilo objevit. Pouze Václavík et al. [40] ve své práci uvádí základní vztahy pro vyhodnocení standardní nejistoty metodou B. Přesto je ale možné vycházet z informací, publikovaných o metodě vrtání otvoru nebo obecně o metodách, zabývajících se měřením zbytkové napjatosti.

Jako nejvíce názornou publikaci, zaměřenou na hodnocení nejistoty měření hlavních zbytkových napětí metodou vrtání otvoru, publikovali opět italští pracovníci Scafidi, Valentini a Zuccarello [24]. Ve své práci se snaží postihnout vlivy hlavních zdrojů nejistot.

## 2.5 VLIV ZAObLENÍ DNA DRÁŽKY

Nezanedbatelný vliv na přesnost vyhodnocené zbytkové napjatosti má jakákoli geometrická nedokonalost odvrtávaného otvoru, respektive mezikružové drážky, pro kterou není po odvrtávání provedena korekce naměřených hodnot.

Zaoblení vzniká buď vlivem opotřebení řezného nástroje nebo při aplikování elektroerozivního obrábění [30]. I když nemusí být vliv zaoblení dna drážky tak významný jako u metody vrtání otvoru, považuje se tento rádius za koncentrátor napětí vrubového charakteru.

Autoři Scafidi et al. [23] se ve svém článku zabývají posouzením vlivu radiusu a snaží se o zahrnutí tohoto zdroje nejistoty do způsobu vyhodnocení zbytkové napjatosti správnou korekcí výsledků.

## 2.6 ZAKŘIVENÉ POVRCHY

Vliv zakřivení (zaoblení) povrchu na vyhodnocení zbytkové napjatosti metodou uvolňování sloupku nebyl zmiňován v žádné z dostupných publikací.

Pro metodu vrtání otvoru je v publikaci [48] vypracován teoretický postup pro vyhodnocení uvolněných deformací u vzorků se zakřivenými povrchy.

V publikaci [19] je stanoveno minimální zakřivení povrchu na 17,5 násobek průměru vrtaného otvoru, pro které není nutné tento vliv uvažovat.

## 2.7 EXCENTRICITA OTVORU

V případě metody uvolňování sloupku je vliv nepřesnosti umístění tenzometrické růžice studován v publikaci [40]. Je to jediná známá publikace vztahující se k této problematice.

V případě metody vrtání otvoru se touto problematikou zabývala řada autorů [1], [6], [44].

## 2.8 PRUŽNĚ PLASTICKÉ DEFORMACE DNA OTVORU

Jednou z mála publikací, věnujících se vlivu pružně plastické deformace u metody uvolňování sloupku, je práce Petrucciho a Zuccarella [21]. Dno drážky, působící jako koncentrátor napětí, může vést ke vzniku lokálních napětí o velikosti blízké mezi kluzu měřeného materiálu.

Vznikem pružně plastické deformace v okolí vrtaného otvoru se pro metodu vrtání otvoru ve svých publikacích detailněji zabýval Švaříček [33], [36], [37].

## 2.9 TICHONOVVA REGULARIZACE

Jednou z vhodných metod, napomáhající správnému řešení soustavy lineárních rovnic, je tzv. Tichonovova regularizace („Tikhonov regularization“). Pochází od ruského matematika Andreje N. Tichonova, který se o ní poprvé zmiňuje v r. 1963.

U metod, určených k vyhodnocování zbytkové napjatosti, slouží regularizace naměřených experimentálních dat k tzv. „vyhlazení“ průběhů takto naměřených hodnot. Dochází tak ke snadnějšímu řešení špatně podmíněných soustav lineárních rovnic, jejichž přímé řešení by nebylo možné, nebo jen velmi obtížné. Této metody využívají ve svých publikacích např. Schajer [26], [27], Václavík et al. [41], ale nově i norma ASTM E 837-08 [4] a software firmy SINT Technology [31].

## 2.10 VYUŽITÍ OPTICKÝCH METOD PRO SNÍMÁNÍ UVOLNĚNÝCH DEFORMACÍ

Schajer ve své publikaci [25] uvádí výhody a nevýhody tenzometrických a optických metod pro měření uvolněných přetvoření. S rozvojem optických metod se v dnešní době dává přednost tomuto způsobu měření před odporovými tenzometry, a to hlavně z důvodu přesnějšího měření, většího množství získaných dat a možnosti sledování celého povrchu okolí otvoru. V *tab. 2* je uvedeno vzájemné porovnání těchto dvou metod.

*Tab. 2: Porovnání tenzometrických a optických metod měření [25]*

<b>Odporové tenzometry</b>	<b>Optická měření</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• středně velké pořizovací náklady, vysoké náklady na jednotlivá měření</li> <li>• čas přípravy a vlastního měření poměrně velký</li> <li>• malé množství přesných a spolehlivě naměřených hodnot</li> <li>• výpočty zbytkových napětí relativně jednoduché</li> <li>• omezené možnosti zprůměrování naměřených dat a jejich vyhlazení, které by vedly ke snížení vlivu náhodných chyb měření</li> <li>• více odolné, vhodné pro použití v provozních podmínkách</li> <li>• citlivé na excentrické umístění tenzometrické růžice vůči středu vrtaného otvoru</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• vysoké pořizovací náklady, středně velké náklady jednotlivých měření</li> <li>• čas na přípravu a samotné měření relativně kratší</li> <li>• velké množství středně přesných měření, vhodných pro následné zprůměrování</li> <li>• výpočty napětí často náročnější</li> <li>• široké možnosti zprůměrování naměřených dat a jejich vyhlazení vedoucí ke snížení vlivu náhodných chyb měření</li> <li>• méně odolné, vhodné pro laboratorní měření</li> <li>• střed otvoru identifikován přesněji</li> </ul>

## 2.11 MĚŘENÍ ZBYTKOVÝCH NAPĚTÍ U NÁS V DRUHÉ POLOVINĚ 20. STOLETÍ

Ing. Havlík z ÚVÚ-SV Škoda Plzeň ve své zprávě z roku 1978 rozebírá teorii navrtávací metody.

Při aplikaci metody křížového řezu, jejímž autorem je Ing. Havlík, se roku 1988 ve své publikaci zabývali Orna a Plundrová.

Sachsova metoda (Weinberg), určená pro zjišťování zbytkových napětí v rotačně symetrických součástech, spočívá v postupném odfrézování vrstev materiálu. Je to destruktivní metoda, u které dojde ke zničení měřené součásti.

Ing. Kupka a Ing. Machník se koncem 90. let 20. století zabývali měřením zbytkových napětí u obvodových svarů kroužků vnitřních částí jaderných reaktorů. Měření bylo založeno na odvrtání kruhové drážky o vnitřním  $\varnothing 30$  mm a vnějším  $\varnothing 43$  mm do hloubky 20 mm. Deformace byly měřeny pomocí tří tenzometrů, uspořádaných do rovnostranné růžice.

Na základě požadavku koncernu ŠKODA byly v roce 1990 na ÚVZÚ-VS1/NS Ing. Otakarem Weinbergem (který byl členem širšího kolektivu pracovníků) propracovány způsoby měření a vyhodnocení velikosti zbytkové napjatosti ve strojních součástech tzv. trepanačními metodami (metodami založenými na měření deformace při uvolnění vazby s okolním materiálem). V té době se jednalo o navrtávací metodu (v dnešní době metoda vrtání otvoru), metodu řezu do kříže, „sloupkovou metodu“ (v dnešní době metoda uvolňování sloupku) pro měření zbytkové napjatosti v blízkosti svarů Sachsovu metodu.

Stejnou problematikou měření zbytkových napětí se též zabývaly práce vytvořené v SVÚSS Běchovice, ÚAM-VŽKG Brno a VÚZ Bratislava.

### **3 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE**

Z rešeršní studie vyplývá, že existuje velké množství ovlivňujících a omezujících faktorů, které mají vliv na věrohodnost vypočtených hodnot zbytkových napětí. Rozvoj metody uvolňování sloupku tedy spočívá ve zpracování a zahrnutí níže formulovaných cílů řešení disertační práce:

#### **I) Teoretická analýza metody sloupku**

- za tímto účelem byla provedena komplexní rešeršní studie dané problematiky a získané informace vedly k určení původních předpokladů, oblasti použití, výhod a nevýhod metody, včetně určení faktorů, omezujících nebo ovlivňujících přesnost stanovení zbytkové napjatosti,

#### **II) Teoretické podklady pro metodu přírůstků deformace a integrál. metodu**

- vyhodnocování velikosti zbytkové napjatosti vyžaduje řešení inverzního problému, tzn. pomocí kalibračních koeficientů (metoda přírůstků deformace) nebo kalibračních činitelů (integrální metoda) a uvolněných deformací nalézt zpětně hodnoty zbytkových napětí, a to v závislosti na odvrtané hloubce materiálu,
- detailní studium metody přírůstků deformace za účelem vyhodnocení homogenní zbytkové napjatosti a integrální metody, za účelem vyhodnocení nehomogenní zbytkové napjatosti po hloubce uvolňovaného sloupku.

#### **III) Posouzení vlivu vybraných zdrojů nejistot na přesnost vyhodnocení zbytkového napětí**

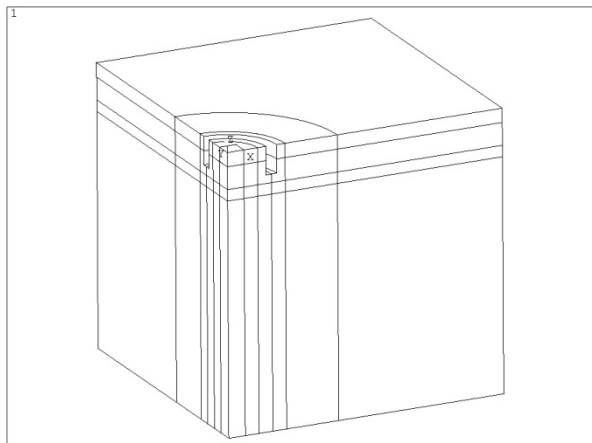
- posouzení vlivu odchylek v předpokládaných hodnotách mechanických vlastností vyšetřovaného tělesa (modul pružnosti v tahu, Poissonův poměr),

- posouzení vlivu geometrie uvolňovaného sloupku: zejména zaoblení, vznikající mezi dnem a stěnou drážky a povrchové (válcové) zaoblení tělesa,
- posouzení excentricity umístění tenzometrické růžice vůči středu uvolňovaného sloupku a vliv velikosti průměru uvolňovaného sloupku,
- rozbor optimalizace celkového počtu a velikosti jednotlivých úběrů tak, aby bylo dosaženo co nejpřesnější vyhodnocení zbytkové napjatosti bez zbytečné kumulace chyb,
- posouzení vlivu elasticko-plastické deformace dna mezikruhové drážky, způsobené během procesu odvrtávání řezným nástrojem.

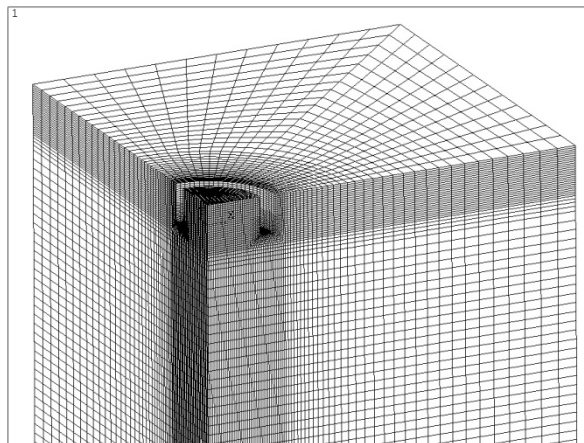
Za účelem řešení jednotlivých cílů disertační práce bylo potřeba vytvořit optimální výpočtový model, určený pro simulaci požadovaného charakteru zbytkové napjatosti (respektive zdroje nejistoty) a následné vyhodnocení velikosti uvolněných přetvoření na povrchu sloupku, získaných integrací hodnot přes plochu měřicí mřížky simulované tenzometrické růžice. Z výsledků obdržených metodou konečných prvků byly dle uvažované metody vypočteny odpovídající hodnoty kalibračních koeficientů, resp. činitelů.

## 4 VÝPOČTOVÝ MODEL

Výpočtové simulace pomocí metody konečných prvků jsou provedeny na obdélníkovém tělese; vzhledem ke geometrické symetrii je pak využita pouze  $\frac{1}{4}$  jeho tvaru. Modelové těleso tak má půdorys ve tvaru čtverce o rozměrech 50 mm x 50 mm a možnost volby proměnné tloušťky v rozmezí 20 mm ÷ 100 mm, *obr. 1, obr. 2*. Šířka i délka modelu jsou také volitelné parametry, ale vzhledem k nevýznamnému vlivu na přesnost výpočtu nemá smysl volit větší velikost modelu, než je uváděná.



**Obr. 1:** Čtvrtina z celkového modelu

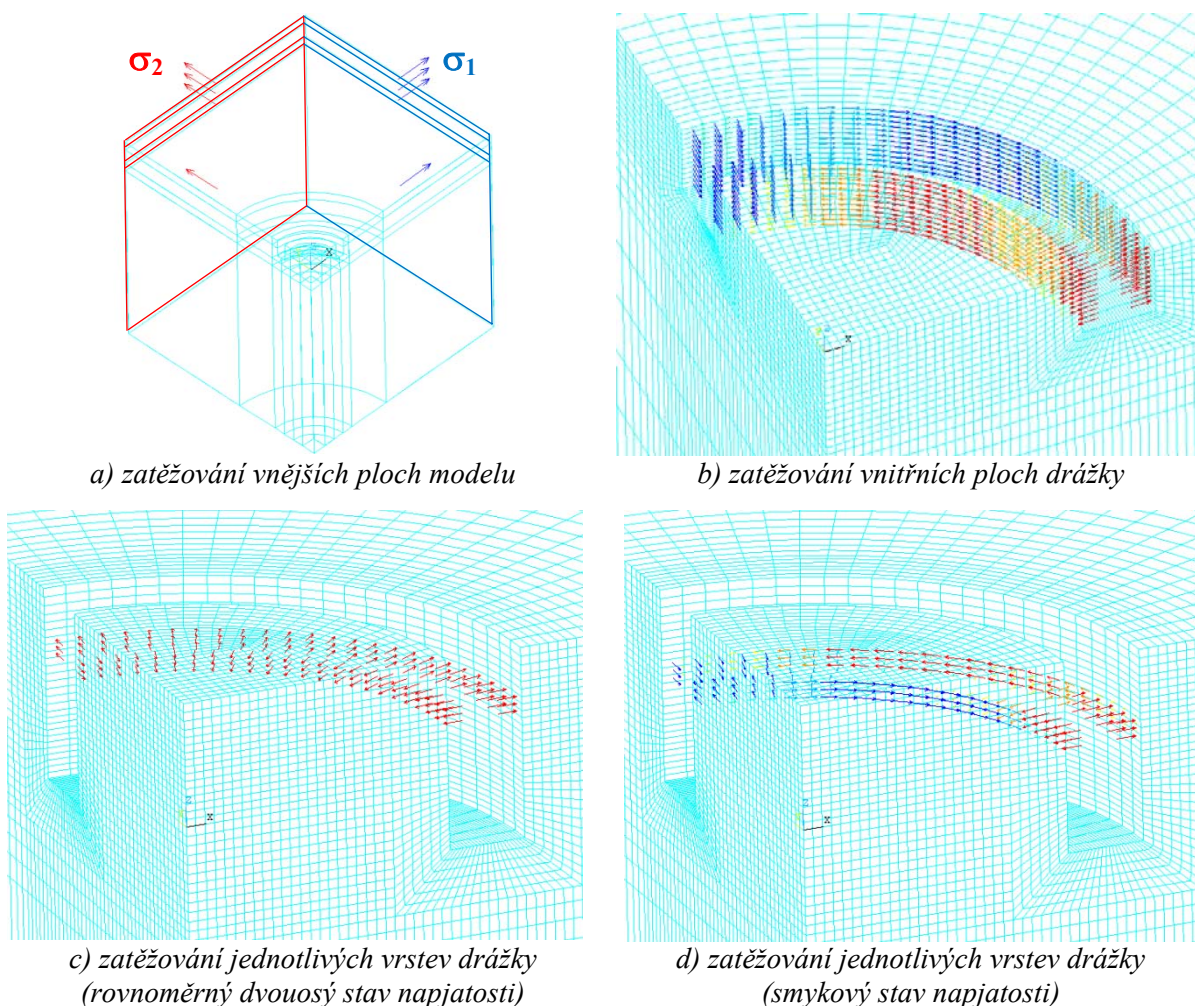


**Obr. 2:** Topologie konečnoprvkové sítě

Téměř pro všechny simulace je dostačující definovat model materiálu jako lineární, elastický, izotropní s modulem pružnosti v tahu  $E = 210$  GPa a Poissonovým poměrem  $\mu = 0,3$  (výchozí hodnoty).

Varianty způsobu zatěžování modelu jsou závislé na typu metody použité ke stanovení kalibračních koeficientů nebo činitelů. Použité aplikace okrajových podmínek jsou následující:

- a) zatěžování vnějších ploch modelu, nebo vnitřních ploch celé drážky za účelem vyvolání homogenní jednoosé, dvouosé rovinné nebo smykové napjatosti (obr. 3a, obr. 3b): přístup použitelný pouze pro metodu přírůstků deformace,
- b) zatěžování jednotlivých vrstev vnitřních ploch mezikruhové drážky za účelem simulace homogenní i nehomogenní zbytkové napjatosti po hloubce (obr. 3c, obr. 3d): vhodné zejména pro integrální metodu.



**Obr. 3:** Způsoby aktivace objektu

Výpočtové simulace, realizované v rámci disertační práce, byly prováděny pro typ tenzometrické růžice FR-5-11-3LT firmy Preusser Messtechnik GmbH [22]. Efektivní délka simulované tenzometrické mřížky je  $l = 5$  mm a šířka  $w = 1,9$  mm. Tato růžice je rozměrově velmi podobná tenzometrické růžici RY51 firmy HBM [32]. Pro všechna vyhodnocení uvolněných deformací je použit přístup, odpovídající integraci přes plochu tenzometrické mřížky.

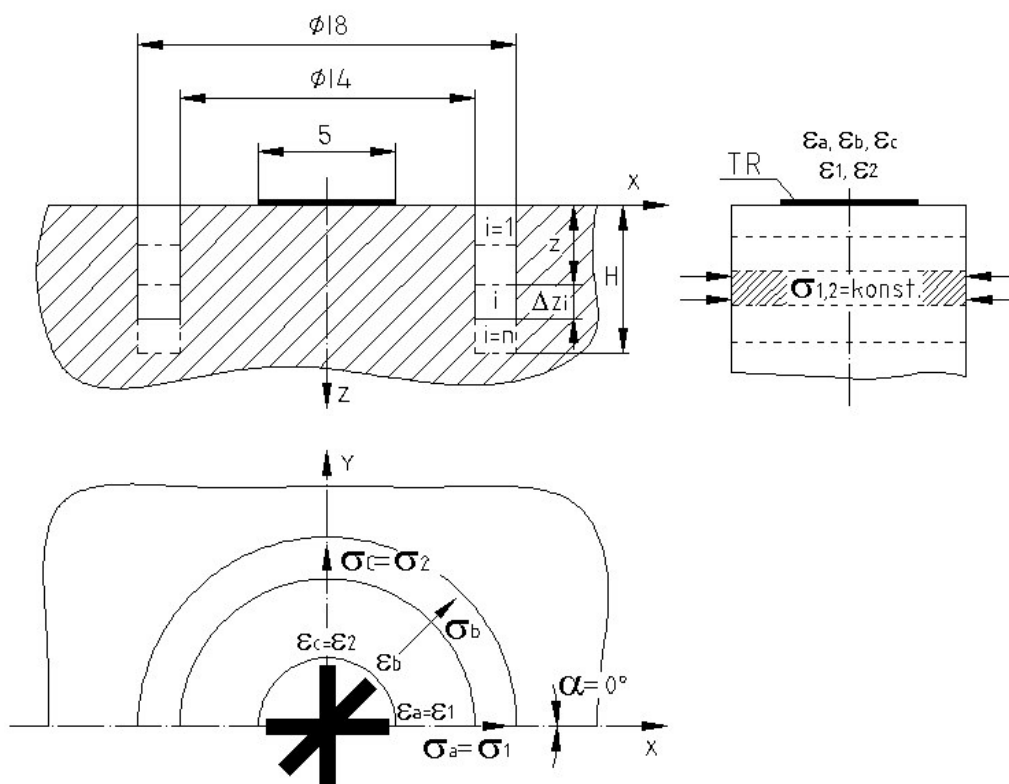
## 5 VÝSLEDKY DISERTAČNÍ PRÁCE

### 5.1 METODA PŘÍRŮSTKŮ DEFORAMCE

Metoda přírůstků deformace (inkrementální metoda) je založena na předpokladu, že přírůstek uvolněného přetvoření  $d\varepsilon$ , změřený na povrchu sloupku po odvtání

malého přírůstku hloubky  $dz$ , je plně způsoben napětím, působícím pouze v tomto přírůstku hloubky (obr. 4). Z tohoto důvodu není metoda přírůstků deformace vhodná pro měření zbytkové napjatosti v případech, kde se vyskytují větší gradienty napětí po hloubce měřeného materiálu.

Vhodně určené a správně použité kalibrační koeficienty jsou nezbytné pro stanovení velikosti zbytkové napjatosti nejenom u metody uvolňování sloupku. Znalost jejich závislosti na druhu materiálu, hloubce a průměru odvrtného sloupku, typu a rozměrech tenzometrické růžice je proto nezbytná. Metody přírůstků deformace se nejčastěji využívá k vyhodnocení homogenní zbytkové napjatosti pomocí kalibračních koeficientů  $K_1$  a  $K_2$ .



Obr. 4: Princip metody přírůstků deformace a základní geometrické rozměry

### 5.1.1 Diferenciální varianta

Hlavní zbytková napětí  $\sigma_1$  a  $\sigma_2$ , určující velikost homogenní napjatosti v jakékoli hloubce uvolněného sloupku, získáme za pomoci kalibračních koeficientů  $K_1$ ,  $K_2$  a numerických derivací uvolněných přetvoření  $d\varepsilon_1/dz$  a  $d\varepsilon_2/dz$ .

$$\sigma_1 = \frac{E}{K_1^2 - \mu^2 K_2^2} \cdot \left( K_1 \frac{d\varepsilon_1}{dz} + \mu K_2 \frac{d\varepsilon_2}{dz} \right), \quad (1)$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{K_1^2 - \mu^2 K_2^2} \cdot \left( K_1 \frac{d\varepsilon_2}{dz} + \mu K_2 \frac{d\varepsilon_1}{dz} \right). \quad (2)$$

#### Jednoosý stav napjatosti:

V případě simulace jednoosé napjatosti ( $\sigma_1 \neq 0$ ,  $\sigma_2 = 0$ ), mohou být kalibrační koeficienty stanoveny pomocí následujících vztahů:

$$K_1 = \frac{E}{\sigma_1} \cdot \frac{d\varepsilon_1}{dz}, \quad K_2 = -\frac{E}{\mu\sigma_1} \cdot \frac{d\varepsilon_2}{dz}. \quad (3), (4)$$

### Dvouosý stav napjatosti:

V případě simulace dvouosé napjatosti ( $\sigma_1 \neq 0$ ,  $\sigma_2 \neq 0$ ) mohou být kalibrační koeficienty stanoveny následovně:

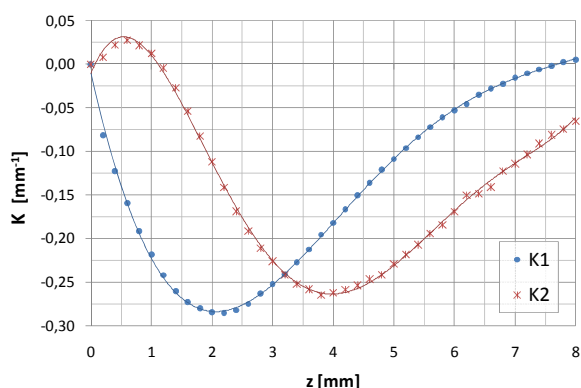
$$K_1 = \frac{E}{\sigma_1(1 - \kappa^2)} \cdot \left( \frac{d\varepsilon_1}{dz} - \kappa \cdot \frac{d\varepsilon_2}{dz} \right), \quad K_2 = \frac{E}{\mu\sigma_1(1 - \kappa^2)} \cdot \left( \kappa \cdot \frac{d\varepsilon_1}{dz} - \frac{d\varepsilon_2}{dz} \right), \quad (5), (6)$$

$$\kappa = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}. \quad (7)$$

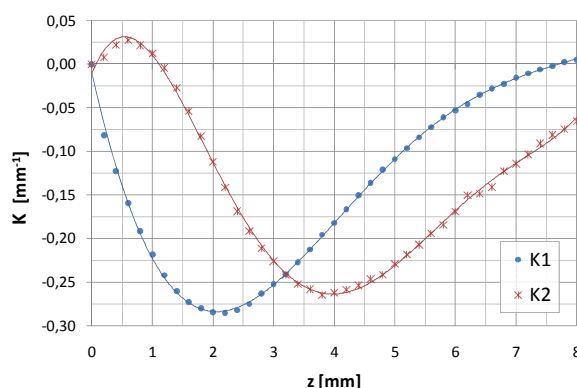
### Kalibrační koeficienty $K_1$ a $K_2$ :

Hodnoty kalibračních koeficientů (určené v závislosti na hloubce uvolněného sloupku) byly vypočteny simulací zvláště homogenní jednoosé ( $\sigma_1 = 60$  MPa,  $\sigma_2 = 0$  MPa) a zvláště dvouosé ( $\sigma_1 = 60$  MPa,  $\sigma_2 = 30$  MPa) napjatosti pomocí rovnic (3), (4) a (5), (6).

Průběhy kalibračních koeficientů, stanovených pro oba typy simulované homogenní napjatosti, jsou v závislosti na hloubce odvrtné drážky vyneseny v grafech 1 a 2.



**Graf 1:** Kalibrační koeficienty určené ze simulace jednoosé napjatosti



**Graf 2:** Kalibrační koeficienty určené ze simulace dvouosé napjatosti

### 5.1.2 Diferenční varianta

Velikost homogenní zbytkové napjatosti je možné stanovit také v rozmezí dvou odvrtných hloubek drážky, kdy jsou k dispozici pouze dvě naměřené skupiny uvolněných přetvoření. Z tohoto důvodu se velikost difference  $\Delta z$  skládá z rozdílu dvou konkrétních hloubek  $z_i$  a  $2z_i$ .

Zavedeme-li:  $\bar{\varepsilon}_1 = \frac{\sigma_1}{E}$  a  $\Delta\varepsilon_1^* = \frac{\Delta\varepsilon_1}{\bar{\varepsilon}_1}$ ,  $\Delta\varepsilon_2^* = \frac{\Delta\varepsilon_2}{\mu \cdot \bar{\varepsilon}_1}$ , můžeme určit velikosti relaxačních koeficientů pro jednoosou napjatost pomocí vztahů:

$$A = \frac{E \cdot \frac{\Delta\varepsilon_1^*}{\Delta z}}{\frac{1}{(\Delta z)^2} [(\Delta\varepsilon_1^*)^2 - (\mu\Delta\varepsilon_2^*)^2] \cdot \Delta z} = \frac{E \cdot \Delta\varepsilon_1^*}{(\Delta\varepsilon_1^*)^2 - (\mu\Delta\varepsilon_2^*)^2}, \quad (8)$$

$$B = -\frac{E \cdot \mu \cdot \frac{\Delta \varepsilon_2^*}{\Delta z}}{\frac{1}{(\Delta z)^2} [(\Delta \varepsilon_1^*)^2 - (\mu \Delta \varepsilon_2^*)^2] \cdot \Delta z} = -\frac{E \cdot \mu \cdot \Delta \varepsilon_2^*}{(\Delta \varepsilon_1^*)^2 - (\mu \Delta \varepsilon_2^*)^2} \quad (9)$$

Velikosti hlavních zbytkových napětí, určující homogenní napjatost v rozmezí odvrtných hloubek drážky  $z_i$  a  $2z_i$ , poté určíme pomocí rovnic (10) a (11):

$$\sigma_1 = A \cdot \Delta \varepsilon_1 - B \cdot \Delta \varepsilon_2, \quad (10)$$

$$\sigma_2 = A \cdot \Delta \varepsilon_2 - B \cdot \Delta \varepsilon_1, \quad (11)$$

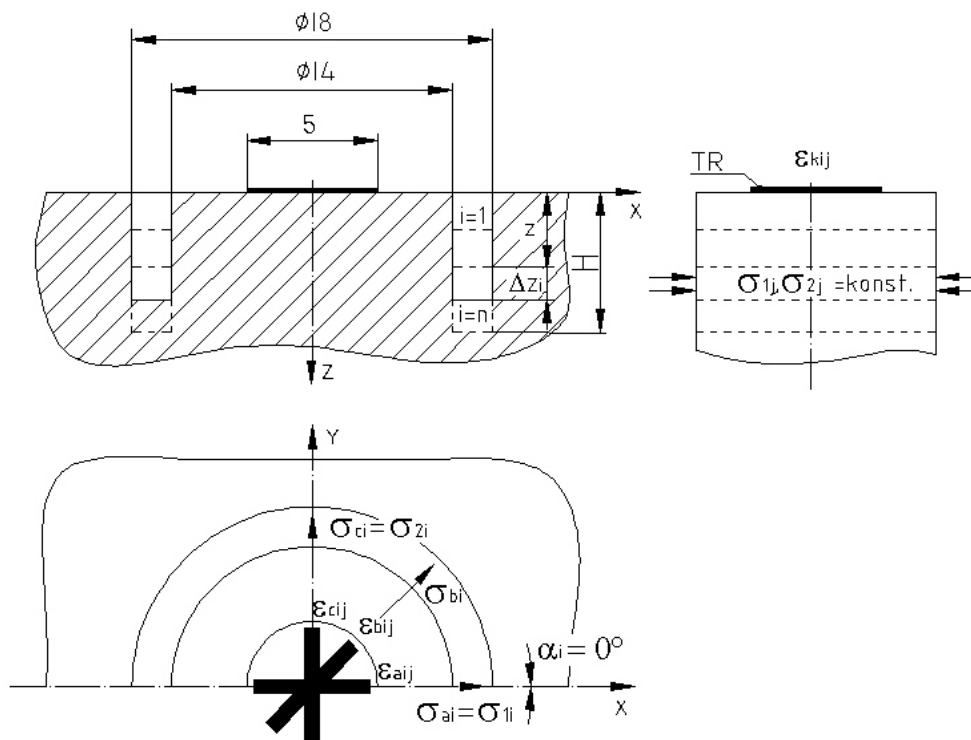
V tab. 3 jsou uvedeny hodnoty relaxačních koeficientů  $A$  a  $B$  pro různé kombinace diferencí  $\Delta z$  odvrtných hloubek  $z_i$  a  $2z_i$ . Výsledky vychází z vyhodnocení simulace jednoosé napjatosti ( $\sigma_1 = 60$  MPa,  $\sigma_2 = 0$  MPa) [52].

**Tab. 3:** Vyhodnocení zbytkového napětí pomocí relaxačních koeficientů

$z_i$ [mm]	$\Delta \varepsilon_1$ [1]	$\Delta \varepsilon_2$ [1]	$\Delta \varepsilon_1^*$ [1]	$\Delta \varepsilon_2^*$ [1]	$A$ [MPa]	$B$ [MPa]	$\sigma_1$ [MPa]
1	-7,560E-05	3,350E-06	-2,646E-01	3,908E-02	<b>-0,7952</b>	<b>-0,1175</b>	59,72
2							
2	-1,421E-04	3,645E-05	-4,973E-01	4,253E-01	<b>-0,4520</b>	<b>-0,1160</b>	60,00
4							
3	-1,258E-04	6,016E-05	-4,404E-01	7,018E-01	<b>-0,6180</b>	<b>-0,2954</b>	60,00
6							
4	-7,291E-05	5,853E-05	-2,552E-01	6,829E-01	<b>-0,2314</b>	<b>-0,1858</b>	60,00
8							

## 5.2 INTEGRÁLNÍ METODA

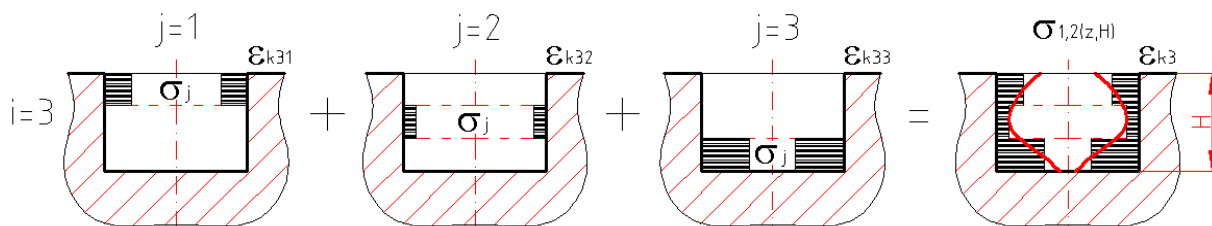
Jednou z možných použitelných metod, vhodných pro vyhodnocení nehomogenní zbytkové napjatosti, je integrální metoda (obr. 5).



**Obr. 5:** Geometrie a obecné značení pro integrální metodu

Tato metoda překonává určitá omezení metody průměrného napětí a metody přírůstků deformace, jejichž teorie nepopisuje s dostatečnou přesností skutečný průběh uvolňované deformace na povrchu sloupku během procesu odvrtávání. Proto patří integrální metoda mezi nejčastěji používané způsoby vyhodnocení nehomogenní zbytkové napjatosti po hloubce měřeného materiálu.

Integrální metoda předpokládá, že uvolněná deformace, získaná simulačním výpočtem na čele sloupku a odpovídající určité hloubce otvoru, je dle zákona superpozice rovna součtu všech dílčích deformací od všech dílčích napětí, působících v rozmezí všech odvrtných přírůstků hloubek drážky (obr. 6). Nezávisí tak pouze na velikosti napětí, působícím v rámci nově odvrtného přírůstku.



**Obr. 6:** Aproximace nehomogenní zbytkové napjatosti pomocí integrální metody

Pro případ obecně natočené tenzometrické růžice se třemi měřícími mřížkami pod úhly  $0^\circ/45^\circ/90^\circ$  dostaneme následující soustavu rovnic:

$$\varepsilon_{ai} = \frac{1}{E} \sum_{j=1}^i [a_{ij} \cdot (\sigma_{1j} + \sigma_{2j}) + b_{ij} \cdot (\sigma_{1j} - \sigma_{2j}) \cdot \cos 2\alpha_j] , \quad (12)$$

$$\varepsilon_{bi} = \frac{1}{E} \sum_{j=1}^i [a_{ij} \cdot (\sigma_{1j} + \sigma_{2j}) + b_{ij} \cdot (\sigma_{1j} - \sigma_{2j}) \cdot \sin 2\alpha_j] , \quad (13)$$

$$\varepsilon_{ci} = \frac{1}{E} \sum_{j=1}^i [a_{ij} \cdot (\sigma_{1j} + \sigma_{2j}) - b_{ij} \cdot (\sigma_{1j} - \sigma_{2j}) \cdot \cos 2\alpha_j] . \quad (14)$$

kde  $\varepsilon_{ai}$ ,  $\varepsilon_{bi}$ ,  $\varepsilon_{ci}$  jsou přetvoření, naměřená pod jednotlivými měřícími mřížkami  $k = a, b, c$  tenzometrické růžice. Pomocí těchto rovnic tak můžeme určit velikosti jednotlivých hlavních napětí  $\sigma_{1j}$ ,  $\sigma_{2j}$  a neznámý úhel  $\alpha_j$ , který svírá osa měřící tenzometrické mřížky  $k = a$  se směrem působení hlavního napětí  $\sigma_{1j}$ .

Spojením předchozích rovnic (12) ÷ (14) a zavedením funkcí přetvoření  $e_i$ ,  $d_i$  a  $m_i$  dostaneme vztahy:

$$e_i = \frac{\varepsilon_{ci} + \varepsilon_{ai}}{2} = \frac{2}{E} \sum_{j=1}^i a_{ij} \cdot s_j , \quad (15)$$

$$d_i = \frac{\varepsilon_{ci} - \varepsilon_{ai}}{2} = -\frac{2}{E} \sum_{j=1}^i b_{ij} \cdot p_j , \quad (16)$$

$$m_i = \frac{\varepsilon_{ci} + \varepsilon_{ai} - 2\varepsilon_{bi}}{2} = -\frac{2}{E} \sum_{j=1}^i b_{ij} \cdot q_j. \quad (17)$$

Funkce napětí  $s_j$ ,  $p_j$  a  $q_j$ , tvořené napětími  $\sigma_{aj}$ ,  $\sigma_{bj}$ ,  $\sigma_{cj}$ , působící v každé  $j$ -té vrstvě drážky (při dosažení  $i = 1, \dots, n$  úběřů) odpovídají zápisu:

$$s_j = \frac{\sigma_{cj} + \sigma_{aj}}{2}, \quad p_j = \frac{\sigma_{cj} - \sigma_{aj}}{2}, \quad q_j = \frac{2\sigma_{bj} - \sigma_{aj} - \sigma_{cj}}{2}. \quad (18) \div (20)$$

Požadované funkce zbytkových napětí  $s_i$ ,  $p_i$  a  $q_i$ , vypočtené z funkcí uvolněných délkových přetvoření  $e_i$ ,  $d_i$ ,  $m_i$  a funkcí napětí  $s_j$ ,  $p_j$ ,  $q_j$ , působících v jednotlivých vrstvách vyšetřovaného tělesa, dostaneme pro každou nově odvrtnou vrstvu materiálu dle následujících vztahů:

$$s_i = \frac{1}{a_{ii}} \cdot \left( \frac{E}{2} \cdot e_i - \sum_{j=1}^{i-1} a_{ij} \cdot s_j \right), \quad (21)$$

$$p_i = -\frac{1}{b_{ii}} \cdot \left( \frac{E}{2} \cdot d_i - \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij} \cdot p_j \right), \quad (22)$$

$$q_i = -\frac{1}{b_{ii}} \cdot \left( \frac{E}{2} \cdot m_i - \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij} \cdot q_j \right). \quad (23)$$

Základní vztahy integrální metody, popsané rovnicemi (21) ÷ (23), umožňují výpočet hlavních napětí  $\sigma_{1i}$  a  $\sigma_{2i}$ , působících v materiálu v každé odvrtné  $i$ -té vrstvě:

$$\sigma_{1i}, \sigma_{2i} = s_i \pm \sqrt{(p_i^2 + q_i^2)}, \quad (24)$$

směr hlavního zbytkového napětí  $\alpha_j$  každé  $j$ -té vrstvy, měřený od mřížky „a“ tenzometrické růžice, se poté určí pomocí vztahu (25):

$$\alpha_j = \frac{1}{2} \arctan \left( \frac{q_j}{p_j} \right) = \frac{1}{2} \arctan \left( \frac{2\sigma_{bj} - \sigma_{aj} - \sigma_{cj}}{\sigma_{cj} - \sigma_{aj}} \right). \quad (25)$$

Realizujeme-li výpočet kalibračních činitelů  $a_{ij}$  a  $b_{ij}$  pomocí navrženého konečnoprvkového modelu, vypočteme jednotlivé prvky matice kalibračních činitelů  $\bar{\mathbf{a}}$  a  $\bar{\mathbf{b}}$  pomocí vztahů:

$$a_{ij} = \frac{E}{2\sigma_{1j}} \cdot \varepsilon_{1ij}, \quad (26)$$

$$b_{ij} = \frac{E}{2\sigma_{1j}} \cdot \varepsilon_{1ij}. \quad (27)$$

Výsledné matice  $\bar{a}$  a  $\bar{b}$ , obsahující odpovídající kalibrační činitele  $a_{ij}$  a  $b_{ij}$ , jsou pro optimalizované rozvržení přírůstků hloubky uvedeny v *tab. 4a, b*.

*Tab. 4a: Hodnoty kalibračních činitelů  $a_{ij}$  pro  $n = 8$  optimalizovaných přírůstků hloubky*

$z$ [mm]	$a_{ij}$ [1]	$j=1$	2	3	4	5	6	7	8
0,6	<b>i=1</b>	<b>-0,0335</b>							
1,05	2	-0,0535	<b>-0,0268</b>						
1,45	3	-0,0674	-0,0395	<b>-0,0233</b>					
1,85	4	-0,0784	-0,0484	-0,0338	<b>-0,0219</b>				
2,3	5	-0,0877	-0,0557	-0,0412	-0,0321	<b>-0,0223</b>			
2,8	6	-0,0949	-0,0613	-0,0466	-0,0383	-0,0325	<b>-0,0209</b>		
3,5	7	-0,1008	-0,0660	-0,0510	-0,0432	-0,0390	-0,0316	<b>-0,0231</b>	
5	8	-0,1051	-0,0693	-0,0542	-0,0468	-0,0435	-0,0376	-0,0355	<b>-0,0269</b>

*Tab. 4b: Hodnoty kalibračních činitelů  $b_{ij}$  pro  $n = 8$  optimalizovaných přírůstků hloubky*

$z$ [mm]	$b_{ij}$ [1]	$j=1$	2	3	4	5	6	7	8
0,6	<b>i=1</b>	<b>-0,0307</b>							
1,05	2	-0,0497	<b>-0,0249</b>						
1,45	3	-0,0656	-0,0377	<b>-0,0227</b>					
1,85	4	-0,0809	-0,0486	-0,0339	<b>-0,0225</b>				
2,3	5	-0,0970	-0,0597	-0,0438	-0,0343	<b>-0,0246</b>			
2,8	6	-0,1131	-0,0707	-0,0531	-0,0437	-0,0373	<b>-0,0256</b>		
3,5	7	-0,1318	-0,0833	-0,0637	-0,0539	-0,0489	-0,0414	<b>-0,0312</b>	
5	8	-0,1577	-0,1006	-0,0780	-0,0674	-0,0635	-0,0577	-0,0563	<b>-0,0522</b>

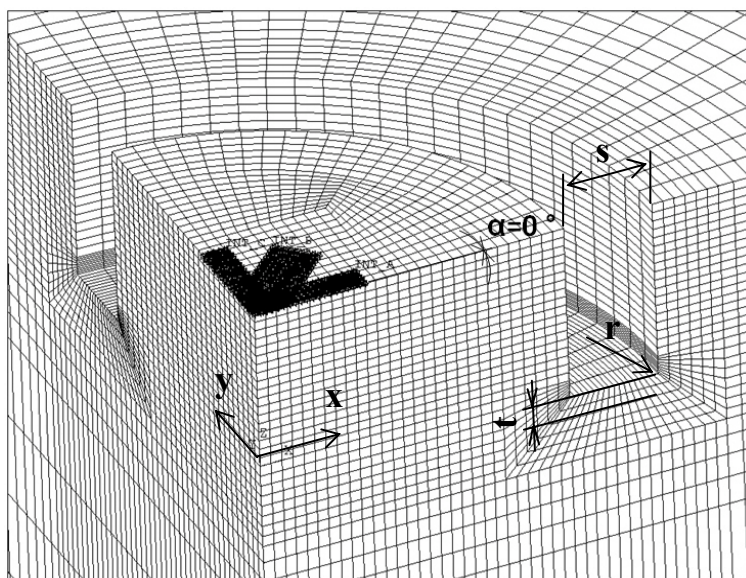
### 5.3 ROZBOR A ZHODNOCENÍ ZDROJŮ NEJISTOT MĚŘENÍ

Tato kapitola je zaměřena na posouzení zdrojů nejistot, spojených zejména s geometrickými a mechanickými odchylkami vyšetřovaného tělesa od předpokládaného ideálního stavu, a na zhodnocení významnosti jednotlivých zdrojů.

Pro každý z uvedených zdrojů nejistot byl simulován dvouosý stav napjatosti konstantní velikosti po hloubce odvrátané mezikruhové drážky. Vliv konkrétního zdroje nejistoty byl posuzován z hlediska velikosti odchylek hodnot vypočtených hlavních zbytkových napětí  $\sigma_{1i}$  a  $\sigma_{2i}$  (pro  $i = 1, \dots, n$  aplikovaných úběřů) od simulované velikosti homogenní napjatosti, v závislosti na hloubce odvrátané drážky.

Princip posouzení zdroje nejistoty byl založen na aplikaci vždy stejných hodnot kalibračních činitelů  $a_{ij}$  a  $b_{ij}$  matic  $\bar{a}$  a  $\bar{b}$  při výpočtu velikosti hlavních zbytkových napětí v jednotlivých vrstvách modelu, za použití rozdílných hodnot uvolněných přetvoření, získaných výpočtem na povrchu sloupku s vlivem konkrétní nejistoty.

Parametry výchozího, „ideálního“ výpočtového modelu jsou uvedeny na *obr. 7*, kde „ $E$ “ a „ $\mu$ “ je modul pružnosti v tahu, resp. Poissonův poměr, „ $\varnothing d$ “ je průměr uvolněného sloupku, „ $s$ “ je šířka mezikruhové drážky, „ $r$ “ je velikost zaoblení dna drážky, „ $R$ “ je zoblení povrchu tělesa, „ $x$ “ a „ $y$ “ jsou vzdálenosti středu tenzometrické růžice od středu sloupku, „ $t$ “ a „ $\sigma_{res}$ “ je tloušťka elasto-plasticky deformované vrstvy materiálu na dně drážky a velikost napětí v ní obsažené.

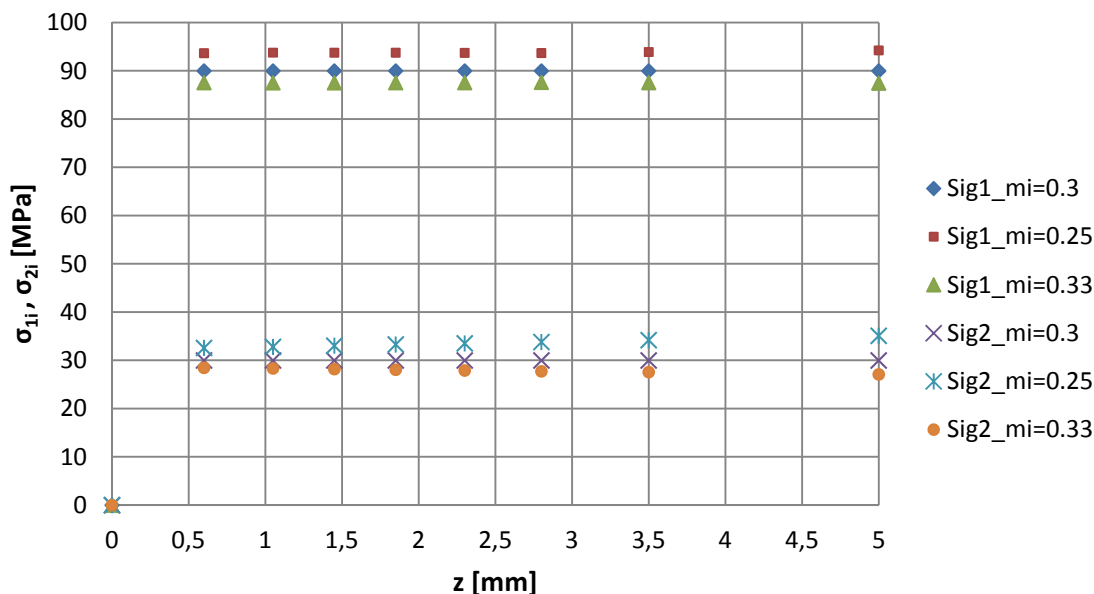


$\sigma_{1i} = 90 \text{ MPa}$   
 $\sigma_{2i} = 30 \text{ MPa}$   
 $\mu = 0,3$   
 $E = 210\,000 \text{ MPa}$   
 $\varnothing d = 14 \text{ mm}$   
 $s = 2 \text{ mm}$   
 $r = 0 \text{ mm}$   
 $R = 0 \text{ mm}$   
 $x = 0; y = 0 \text{ mm}$   
 $t = 0 \text{ mm}$   
 $\sigma_{res} = 0 \text{ MPa}$

Obr. 7: Parametry pro simulaci „ideálního“ tvaru tělesa

### 5.3.1 Vliv hodnoty Poissonova poměru

Pomocí výpočtového modelu byl posuzován vliv hodnoty Poissonova poměru v rozsahu  $\mu = 0,25 \div 0,33$ . Ostatní parametry výpočtového modelu zůstaly neměnné, viz obr. 7.

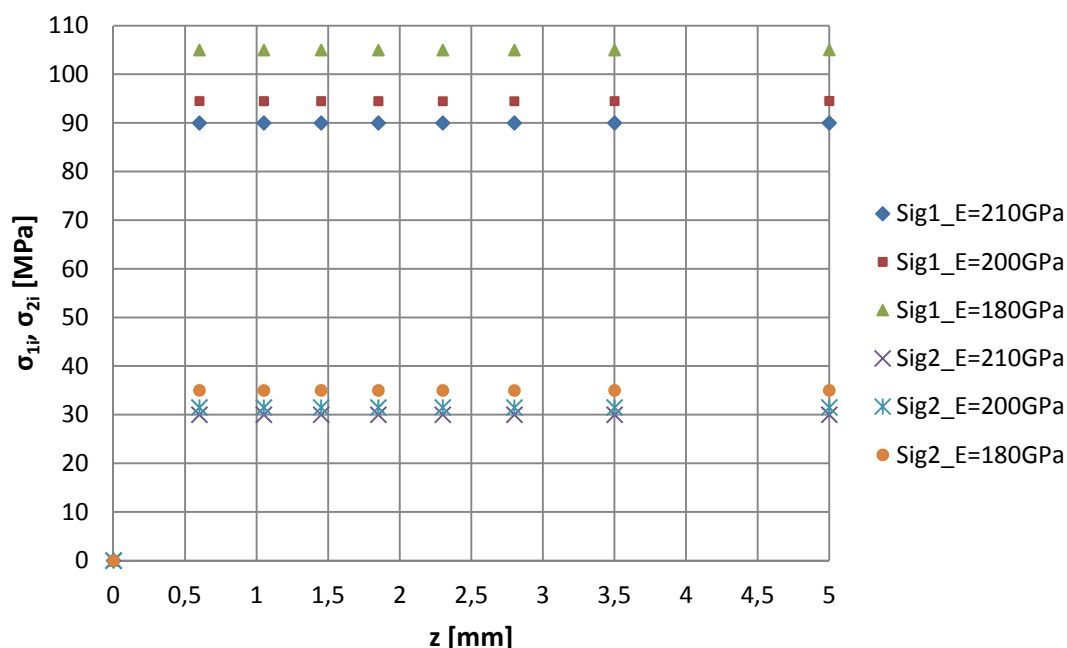


Graf 3: Vliv hodnoty Poissonova poměru

Z grafu 3 vyplývá, že hodnota hlavního zbytkového napětí  $\sigma_{1i}$  má téměř konstantní velikost odchylky po celé hloubce odvrtné drážky. V případě hlavního zbytkového napětí  $\sigma_{2i}$  je tato velikost mírně rostoucí, respektive mírně klesající. Toto může být způsobeno lehkou závislostí hodnoty kalibračního činitele  $b_{ij}$  na hodnotě Poissonova poměru, proto s narůstajícím počtem úběrů narůstá i velikost odchylky od simulované velikosti zbytkové napjatosti. Z hlediska své absolutní velikosti není tato odchylka podstatná.

### 5.3.2 Vliv hodnoty modulu pružnosti v tahu

Stejným způsobem, jakým byl řešen vliv velikosti Poissonova poměru, byl posuzován vliv rozdílné hodnoty modulu pružnosti v rozmezí  $E = 180\,000 \div 210\,000$  MPa. Ostatní parametry výpočtového modelu zůstaly neměnné (obr. 7).



Graf 4: Vliv modulu pružnosti

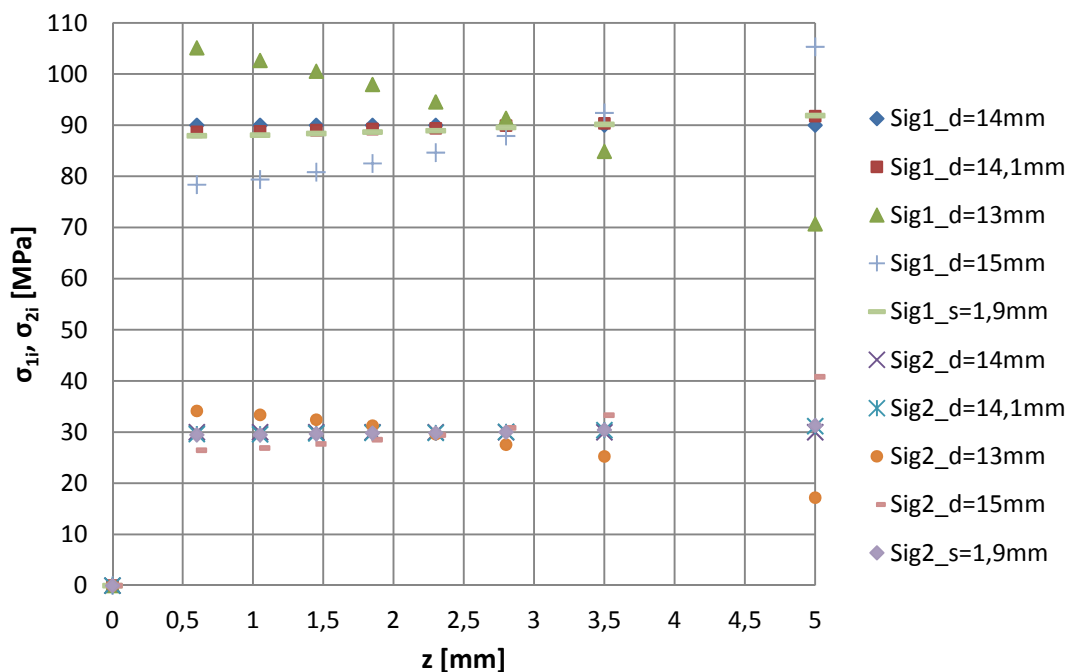
Budeme-li vyhodnocovat zbytkovou napjatost u materiálu, jehož modul pružnosti v tahu má menší hodnotu, než pro kterou jsou předem určené hodnoty kalibračních činitelů  $a_{ij}^E$  a  $b_{ij}^E$  napočítány, naměříme vždy vyšší hodnoty zbytkového napětí, než které ve skutečnosti v materiálu působí (graf 4). A naopak, bude-li vyšetřovanému materiálu odpovídat větší modul pružnosti v tahu, než pro který jsou stanoveny kalibrační činitelé, budou výsledné hodnoty zbytkových napětí nižší, než ve skutečnosti v materiálu působící.

### 5.3.3 Vliv velikosti průměru uvolňovaného sloupku

V této podkapitole je zkoumán vliv odlišné velikosti průměru uvolňovaného sloupku na vyhodnocení hlavních zbytkových napětí. Výsledky byly vyhodnoceny pro simulované velikosti průměru sloupku výpočtového modelu  $\varnothing d = 13$  mm,  $\varnothing d = 15$  mm a  $\varnothing d = 14,1$  mm, viz graf 5.

Pro všechny případy odlišné velikosti průměru sloupku platí následující charakter průběhu vyhodnocení velikosti hlavních zbytkových napětí: jedná-li se o průměr sloupku větší, než pro který jsou uvažované hodnoty kalibračních činitelů  $a_{ij}^*$  a  $b_{ij}^*$  napočítány, budou do hloubky odvrtné mezikruhové drážky  $z = 2,8$  mm (6. aplikovaný úběr) hodnoty hlavních zbytkových napětí  $\sigma_{1i}$  a  $\sigma_{2i}$  výrazně podhodnoceny o  $\Delta = 12,9 \div 1,9$  %. Tento průběh je ale platný pouze do hloubky  $z = 2,8$  mm, ve které se velikost odchylky blíží skutečné hodnotě zbytkové napjatosti, obsažené v daném úběru ( $\Delta = 2,3 \div 2,8$  %). Po překročení této hloubky

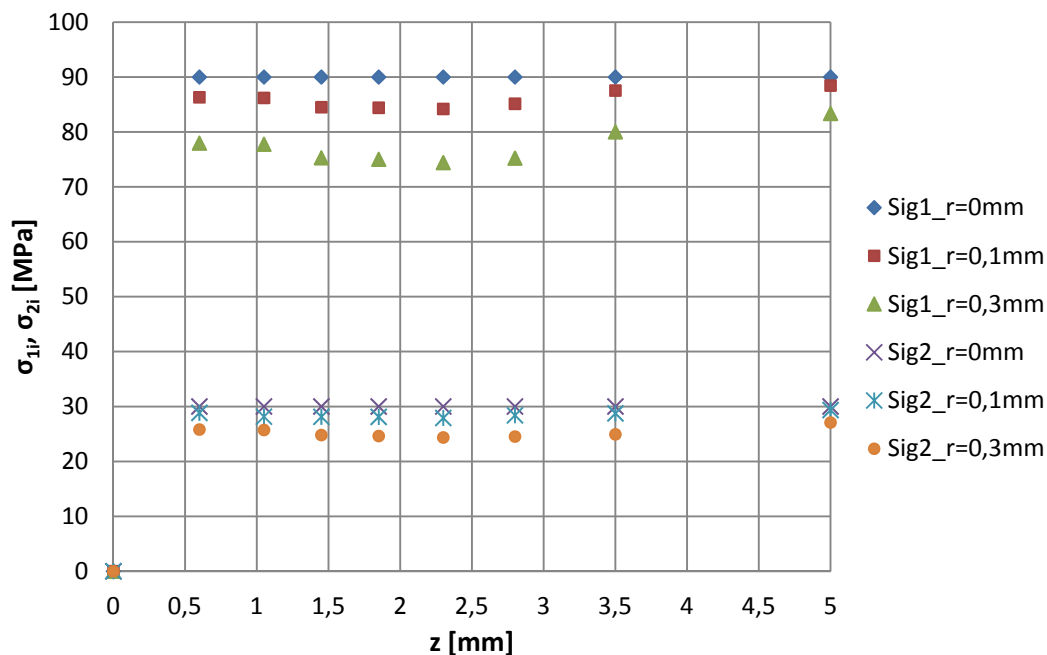
drážky začnou vypočtená napětí od 7. aplikovaného úběru výrazně narůstat nad skutečné hodnoty napjatosti a odchylky vypočtených napětí budou velmi vysoké.



Graf 5: Vliv průměru uvolněného sloupku

### 5.3.4 Vliv velikosti zaoblení mezi dnem a stěnou mezikruhové drážky

V grafu 6 jsou uvedeny průběhy simulovaných hlavních zbytkových napětí na výpočtovém modelu bez zaoblení dna drážky  $r = 0$  mm („Sig1\_r=0mm“ a „Sig2\_r=0mm“). Dále jsou v grafu vyneseny průběhy hlavních zbytkových napětí (v závislosti na odvrtávané hloubce „z“), pro uvažovanou velikost zaoblení dna drážky  $r = 0,1$  mm a  $r = 0,3$  mm. Dosažení většího zaoblení dna drážky se během experimentu nepředpokládá.



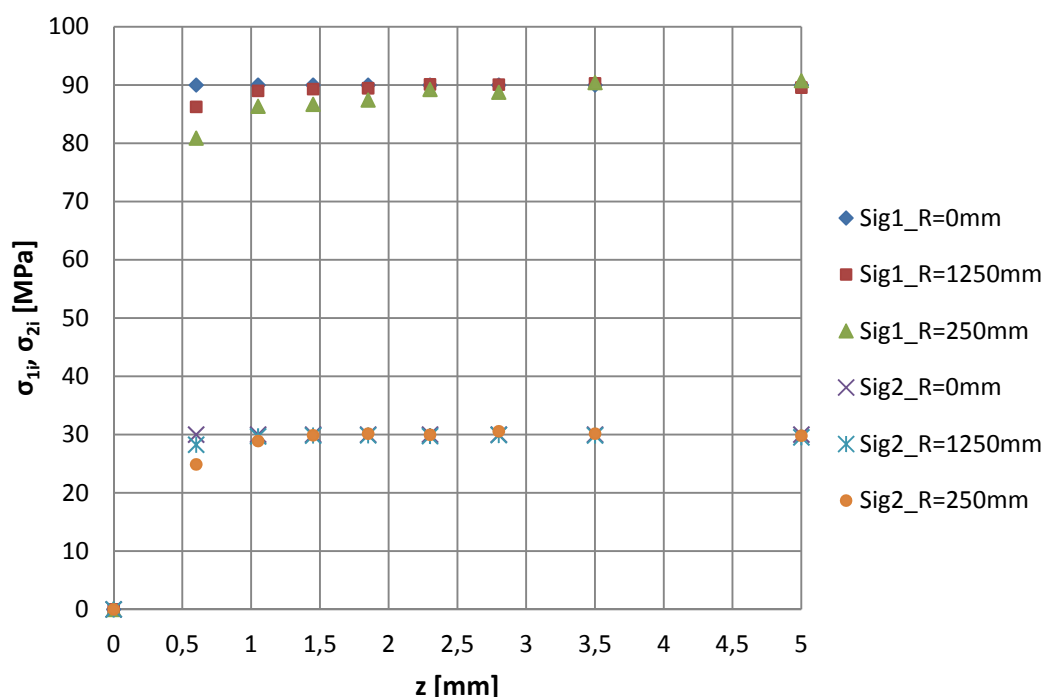
Graf 6: Vliv zaoblení dna mezikruhové drážky

Stejný, z hlediska umístění jednotlivých bodů „parabolický“, trend průběhu vyhodnocení velikosti hlavních zbytkových napětí, s vlivem zaoblení dna mezikruhové drážky, můžeme očekávat pro jakoukoli jinou velikost zaoblení. Bez provedení korekce hodnot kalibračních činitelů  $a_{ij}^*$  a  $b_{ij}^*$  v závislosti na geometrické změně dna mezikruhové drážky, budou vyhodnocená zbytková napětí nižší, než ve skutečnosti v materiálu působící. Predikcí, nebo dodatečným posouzením velikosti zaoblení, nacházejícím se na dně mezikruhové drážky, mohou být výsledné hodnoty napětí vhodně korigovány.

### 5.3.5 Vliv válcového zoblání povrchu tělesa

Bylo uvažováno zaoblení povrchu výpočtového modelu tak, aby bylo simulováno vyhodnocení zbytkové napjatosti, jak je tomu u velkých válcových součástí (např. hřídele lodních šroubů, velkých turbín, potrubí atd.).

V grafu 7 jsou v závislosti na hloubce mezikruhové drážky „z“ uvedeny průběhy hlavních zbytkových napětí, získaných simulací napjatosti na výpočtovém modelu s ideálním (rovinným) tvarem povrchu tělesa  $R = 0 \text{ mm}$  („Sig1\_R=0mm“ a „Sig2\_R=0mm“). Dále byly vytvořeny 2 výpočtové modely s uvažovanou velikostí zaoblení povrchu tělesa  $R = 250 \text{ mm}$  a  $R = 1250 \text{ mm}$ .



Graf 7: Vliv válcového zaoblení povrchu tělesa

První hodnota velikosti radiusu zaoblení povrchu byla volena jako obecný představitel velkých válcových strojních součástí. Druhá velikost poloměru zaoblení  $R = 1250 \text{ mm}$  byla provedenými výpočty stanovena jako mezní hodnota poloměru odvrátané součásti, po kterou by bylo ještě potřeba provádět korekci kalibračních činitelů  $a_{ij}^R$  a  $b_{ij}^R$ .

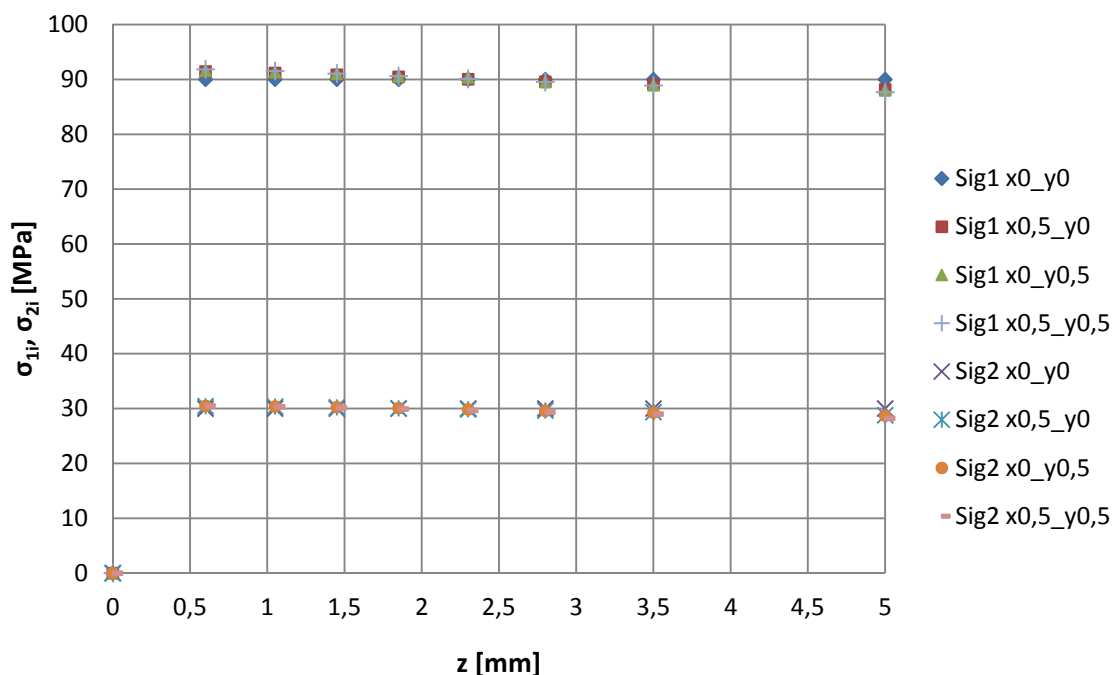
Obecně lze tedy konstatovat, že nejvíce je ovlivněno vyhodnocení hlavních zbytkových napětí v prvním aplikovaném úběru materiálu, kdy vlivem zaoblení

povrchu tělesa dojde k podhodnocení skutečných hodnot hlavních zbytkových napětí.

### 5.3.6 Vliv excentricity tenzometrické růžice

Pro posouzení vlivu nejistot byly uvažovány tři případy excentricity tenzometrické růžice:

- excentricita ve směru působení hlavního napětí  $\sigma_{1i}$ :  $x = 0,5 \text{ mm}$ ,  $y = 0 \text{ mm}$ ,
- excentricita ve směru působení hlavního napětí  $\sigma_{2i}$ :  $x = 0 \text{ mm}$ ,  $y = 0,5 \text{ mm}$ ,
- obecná poloha excentricity:  $x = 0,5 \text{ mm}$ ,  $y = 0,5 \text{ mm}$ .



**Graf 8:** Vliv excentricity tenzometrické růžice

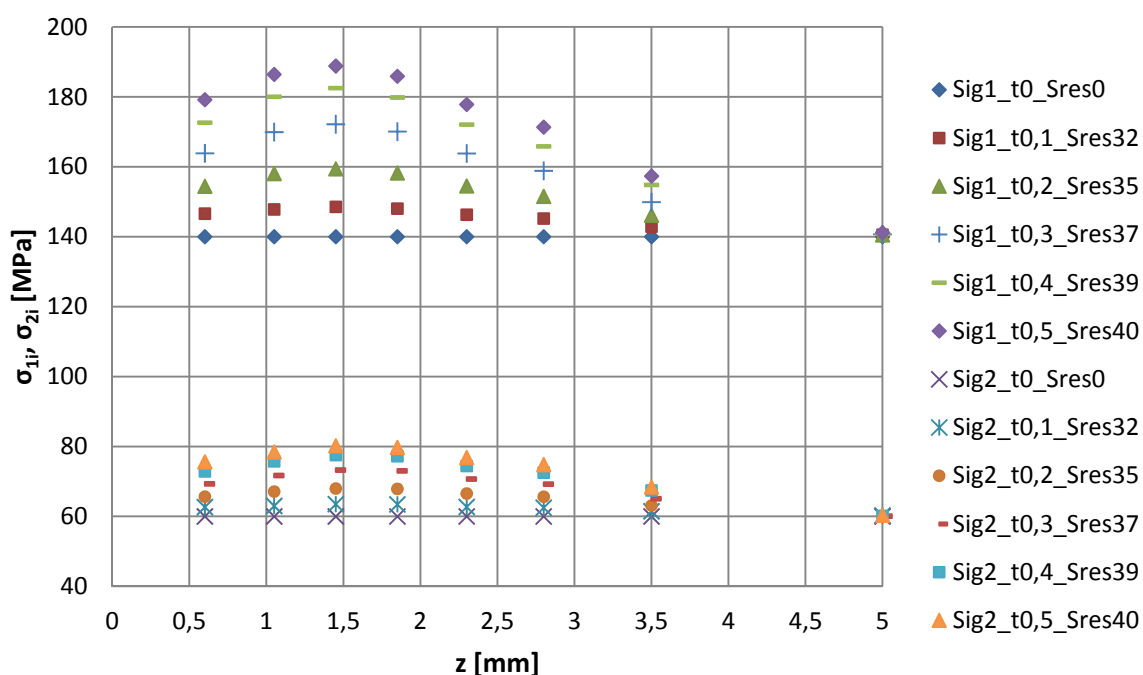
Pro všechny provedené simulace s excentricitou tenzometrické růžice platí stejná charakteristika průběhu odchylek výsledků, viz *graf 8*. V 1. ÷ 4. úběru materiálu jsou vypočtené hodnoty zbytkových napětí větší o  $\Delta = 0,4 \div 2,0 \%$ , než skutečně simulované. Velikosti relativních chyb se ale s přibývajícím hloubkou drážky snižují a v rozmezí 4. ÷ 5. aplikovaného úběru, tzn. v rozmezí hloubek  $z = 1,85 \div 2,3 \text{ mm}$ , jsou velikosti odchylek od skutečných hodnot zbytkových napětí minimální ( $\Delta = 0 \div 1,2 \%$ ). V rámci dalších úběrů (v rozmezí hloubky  $z = 2,3 \div 5 \text{ mm}$ ) jsou hodnoty napětí nižší o  $\Delta = 0,5 \div 5,9 \%$ , než skutečně simulované.

### 5.3.7 Vliv plastické deformace dna mezikruhové drážky

Každý proces obrábění materiálu vnáší do jeho povrchové vrstvy určitou velikost zbytkové napjatosti. Tato zbytková napjatost je způsobena vlivem plastické deformace, vzniklé při dělení materiálu. Vliv takto vzniklé plastické deformace je velmi nepříznivý právě v případech měření zbytkové napjatosti polodestrutivními metodami, jakou metoda uvolňování sloupku je.

Byly řešeny kombinace tloušťky plastické vrstvy  $t = 0,1 \div 0,5$  mm a hodnot zbytkových napětí  $\sigma_{res}$  v nich obsažených. Ve všech simulačních výpočtech byla v prvním zátěžném kroku aplikována stejná velikost zatížení na dno drážky, které ale vyvolalo v rozdílných tloušťkách vrstvy rozdílné velikosti zbytkové napjatosti.

Dle průběhů výsledných hodnot napětí  $\sigma_{1i}$  a  $\sigma_{2i}$ , uvedených v *grafu 9*, jsou velikosti odchylek nejvýznamnější pro největší uvažovanou tloušťku plastické vrstvy  $t = 0,5$  mm. Zplastizované vrstvě o této tloušťce odpovídá velikost simulované zbytkové napjatosti  $\sigma_{res} = 40$  MPa. V hloubce drážky  $z = 1,45$  mm tak relativní chyba výpočtu hlavních zbytkových napětí dosahuje maximální relativní chyby  $\Delta = 34,9$  %. Při posledním aplikovaném úběru je velikost odchylky opět minimální.



**Graf 9:** Vliv plastické deformace vrstvy o tloušťce  $t = 0,1 \div 0,5$  mm

Provedené simulace, zohledňující plastickou deformaci určité vrstvy dna mezikruhové drážky, udávají dostatečnou představu o možnosti vzniku významné chyby měření. Tyto odchylky ve výsledných hodnotách hlavních zbytkových napětí jsou tak způsobeny nevhodně použitými kalibračními činiteli nebo nezahrnutím dostatečné korekce výsledků, zohledňujících překročení meze kluzu materiálu na dně mezikruhové drážky.

## 6 DISKUSE DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

Disertační práce podává ucelený přehled rozvoje metody uvolňování sloupku od jejího vzniku, až po nejnovější poznatky, prezentované mnoha autory po celém světě. Zahrnuje komplexní popis její použitelnosti, výhod, nevýhod a vlivů, omezujících přesnost měření a její širší aplikovatelnost, spolu s naznačením směrů možného dalšího rozvoje metody. V mnoha podkapitolách rešeršní studie také dochází k vzájemnému porovnání s metodou vrtání otvoru, která je v praxi využívána nejčastěji.

Dále byla zpracována systematická studie teorie metody přírůstků deformace, využívané pro vyhodnocení homogenní zbytkové napjatosti jak metodou vrtání otvoru, tak metodou uvolňování sloupku. Metoda přírůstků deformace však není vhodná pro vyhodnocování zbytkové napjatosti, která je nehomogenní po hloubce odvrátané drážky. Pro tyto účely byla v práci ukázána vhodnost jejího nahrazení integrální metodou. Její součástí je určení matic kalibračních činitelů pro konkrétní mechanické vlastnosti materiálu a typ tenzometrické růžice.

Stanovení hodnot kalibračních koeficientů nebo matic kalibračních činitelů pro obě metody bylo realizováno pomocí numerické simulace metodou konečných prvků. Použitý výpočtový model, topologie konečnoprvkové sítě a aplikované okrajové podmínky jsou uvedeny v kapitole 4.

## 6.1 ZHODNOCENÍ INKREMENTÁLNÍ A INTEGRÁLNÍ METODY

Byla potvrzena správnost analytických vztahů pro diferenciální (kalibrační koeficienty  $K_1$  a  $K_2$ ) a diferenční přístup (relaxační koeficienty  $A$  a  $B$ ) vyhodnocení velikosti homogenní zbytkové napjatosti metodou přírůstků deformace. Správnost teorie byla ověřena na výpočtovém modelu, na kterém byla pomocí metody konečných prvků simulována homogenní i nehomogenní zbytková napjatost po hloubce uvolňovaného sloupku. Dosažené poznatky jsou též uvedeny ve vlastních publikacích [50] ÷ [55].

I přes dva výše uvedené nedostatky metody uvolňování sloupku, tzn. nemožnost vyhodnocení nehomogenní napjatosti po hloubce uvolňovaného sloupku a neřešitelnost rovnic pro případ blízkého okolí hloubky  $z = 6 \text{ mm}$ , se zdá být její použitelnost (zejména diferenční varianty) dostatečně vhodná. A to pro ta měření, při kterých nám dostačuje znalost pouze jedné dvojice hodnot hlavních zbytkových napětí zprůměrované velikosti v rámci odebraných dvou přírůstků hloubky.

Nejjednodušším a nejnázornějším případem stanovení velikosti homogenní zbytkové napjatosti je tomu u metody KWU-SIEMENS [11], která vychází pouze ze znalostí diferencí uvolněných přetvoření ve dvou hloubkách drážky a dvojice konstant, lehce stanovitelných pomocí relaxačních koeficientů.

Vzhledem k požadavku na měření pouze ve dvou hloubkách mezikruhové drážky tak dochází ke zrychlení a zjednodušení celkového procesu měření a ke snížení počtu zdrojů nejistot, jejichž vliv roste se zvětšujícím se počtem aplikovaných úběrů a rostoucí hloubkou drážky. Z tohoto důvodu mohou být výsledky naměřené aplikací integrální metody zatíženy daleko větší chybou, než výsledky obdržené aplikací diferenční varianty metody přírůstků deformace.

Ze studie integrální metody, rozboru a zhodnocení zdrojů nejistot měření (pojících se k měření metodou uvolňování sloupku) může být vyvozen následující závěr. Výsledná velikost určené homogenní zbytkové napjatosti metodou přírůstků deformace může být ve větší shodě se skutečností, než vyhodnocení zbytkové napjatosti aplikací integrální metody, vyžadující větší počet úběrů.

## 6.2 ZHODNOCENÍ VLIVU RŮZNÝCH ZDROJŮ NEJISTOT

Uvážíme-li významnost jednotlivých zkoumaných zdrojů nejistot, včetně možného rozsahu geometrických nebo mechanických odchylek od původního („ideálního“) stavu materiálu a tvaru uvolňovaného sloupku, můžeme tyto zdroje sestupně seřadit dle míry jejich významnosti a možného výskytu během měření (uvedeno včetně dosažené minimální a maximální relativní chyby):

- 1) vliv plastické deformace dna mezikruhové drážky ( $\Delta = 0,3 \div 34,9 \%$ ),
- 2) vliv modulu pružnosti ( $\Delta = 5 \div 16,7 \%$ ),
- 3) vliv zaoblení dna mezikruhové drážky ( $\Delta = 1,7 \div 18,8 \%$ ),
- 4) vliv válcového zaoblení povrchu odvrtávaného tělesa ( $\Delta = 0,1 \div 17 \%$ ),
- 5) vliv hodnoty Poissonova poměru ( $\Delta = 2,6 \div 17 \%$ ),
- 6) vliv průměr sloupku ( $\Delta = 21,4 \div 42,7 \%$ ),
- 7) excentricita umístění tenzometrické růžice vzhledem ke středu sloupku ( $\Delta = 0 \div 5,9 \%$ ).

Například u vlivu průměru sloupku se neočekává, že by odchylka průměru byla až o 1 mm větší, než velikost průměru předpokládaného. Podobným způsobem se dá předpokládat i vliv rozdílné velikosti Poissonova poměru, jehož hodnota se u kovových materiálů pohybuje nejčastěji v rozmezí  $\mu = 0,28 \div 0,30$ . Povrchové zaoblení odvrtávaného tělesa nejvíce ovlivní výsledné hodnoty prvního a druhého aplikovaného úběru, v nejčastěji vyhodnocované hloubce úběru materiálu  $z = 2 \div 4$  mm je už vliv tohoto zdroje nejistoty minimální.

Lze očekávat, že k nejvýraznějšímu ovlivnění naměřených výsledků dojde v důsledku vytváření mezikruhové drážky odvrtáváním. A to zejména možným vznikem vrstvy plastické deformace na dně mezikruhové drážky a zaoblením, vzniklým mezi stěnami a dnem drážky, způsobené výhradně odvrtávacím nástrojem.

V závislosti na zdroji nejistoty a velikosti odchylky mohou být výsledné hodnoty hlavních zbytkových napětí výrazně podhodnoceny nebo naopak nadhodnoceny. Pomocí provedených simulačních výpočtů byla také potvrzena největší citlivost metody v rozmezí  $z = 1 \div 3$  mm hloubky drážky. Od hloubky  $z = 4$  mm a dále už není vliv nejistoty tak významný. Spolu s rostoucí hloubkou mezikruhové drážky totiž klesá celková přesnost metody uvolňování sloupku. Proto je z hlediska přesnosti experimentu doporučeno vyhodnocovat zbytková napětí v rozmezí hloubky  $z = 2 \div 4$  mm pomocí  $i = 2 \div 6$  aplikovaných úběrů.

## 7 ZÁVĚR

Disertační práce představuje komplexní studii metody uvolňování sloupku s využitím numerické simulace pomocí metody konečných prvků. Rozvoj metody spočívá v nalezení a kvantifikování faktorů, omezujících její použitelnost a přesnost měření. Soustředěním práce na studium slabin a nevýhod metody uvolňování sloupku, může se tato polodestruktivní metoda, určená k měření a vyhodnocení velikosti zbytkové napjatosti po hloubce uvolňovaného sloupku, stát přesnou a spolehlivou metodou.

Významná část práce byla věnována zhodnocení zdrojů nejistot, jako je vliv mechanických vlastností (modul pružnosti v tahu, Poissonův poměr), geometrických vlastností (průměr uvolňovaného sloupku, zaoblení povrchu tělesa, zaoblení dna mezikruhové drážky), ale i excentrické umístění tenzometrické růžice vůči středu uvolňovaného sloupku a vliv plastické deformace dna mezikruhové drážky.

Na základě těchto poznatků byly v rámci každé kapitoly definovány závěry o výhodách a nevýhodách zvoleného přístupu vyhodnocení zbytkové napjatosti včetně doporučení, minimalizujících vlivy různých zdrojů nejistot na přesnost vyhodnocení zbytkové napjatosti v praxi.

Cílů disertační práce bylo dosaženo za pomoci výpočtové simulace metodou konečných prvků na univerzálním výpočtovém modelu. Bylo tak možné jednoduchým způsobem měnit vstupní parametry a okrajové podmínky numerické simulace.

V celém rozsahu tak byly splněny cíle disertační práce. Kombinací bezkontaktního měření uvolněných deformací na povrchu vyšetřovaného tělesa spolu s regularizací naměřených dat a vytvořením databáze kalibračních koeficientů a kalibračních faktorů, zohledňujících vlivy zdrojů nejistot měření, může se metoda uvolňování sloupku stát přesnou a efektivní metodou při vyhodnocování zbytkové napjatosti.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] AJOVALASIT, A.: Measurement of Residual Stresses by the Hole-Drilling Method: Influence of Hole Eccentricity, *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 1979, Vol. 14, no. 4, p. 171-178
- [2] AJOVALASIT, A. et al.: The Hole-Drilling Strain Gauge Method for the Measurement of Uniform or Non-uniform Residual Stresses, Working Group of Residual Stresses, AIAS – TR01:2010, revision 02.09.2010, 70 p.
- [3] AJOVALASIT, A., PETRUCCI, G., ZUCCARELLO, B.: Determination of Nonuniform Residual Stresses Using the Ring-Core Method *Transactions of the ASME – Journal of Engineering Materials and Technology*, April 1996, Vol. 118, no. 2, p. 224-228
- [4] ASTM International Designation E 837-08: *Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain Gauge Method*, United States, 2008, 17 p.
- [5] BEGHINI, M., BERTINI, L., MORI, L. F.: Genetic Algorithm Optimization of the Hole-Drilling Method for Non-uniform Residual Stress Fields, *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 2009, Vol. 44, p. 105-115
- [6] BEGHINI, M., BERTINI, L., MORI, L. F.: Evaluating Non-Uniform Residual Stress by the Hole-Drilling Method with Concentric and Eccentric Holes, Part I – Definition and Validation of the Influence Functions, *Strain*, Vol. 46, 2010, p. 324-336
- [7] BHEL: Residual Stress Measurement on Turbine and Generator Shafts, Corporate Standard AA 085 01 50, Bharat Heavy Electrical Limited, February 2008, 4 p.
- [8] BOHDAN, P., et al.: Residual Stress Measurement Using Ring-Core Method, In *46. konference Experimentální analýza napětí*, Horní Bečva, 2008
- [9] BÖHM, W., STÜCKER, E., Wolf, H.: Principles and Potential Application of the Ring-Core Method for Determining Residual Stresses, *Reports in Applied Measurement*, HBM, 1988, Vol. 4, no. 1, p. 5-10
- [10] BÖHM, W., STÜCKER, E., WOLF, H.: Grundlagen und Anwendungsmöglichkeiten des Ring-Kern-Verfahrens zum Ermitteln von Eigenspannungen, *Teil 1: Theorie und Grundlagen: Hottinger Messtechnische Briefe*, 1980, Vol. 16, no. 2, p. 36-40, no. 3, p. 66-70

- [11] Development of MTS3000 – RESTAN, Automatic System for Determining Residual Stresses by the Strain-gage Method, SINT Technology, Italy, presentation (33 slides)
- [12] GUNNERT, R.: Residual Welding Stresses, Stockholm, Verlag Almquist u. Wiksell, 1953
- [13] HOLÝ, S. et al.: Residual Stress Measurement Using Ring-Core Method, In *25th Danubia-Adria Symposium on Advances in Experimental Mechanics*, České Budějovice a Český Krumlov, 2008
- [14] KEIL, S.: Experimental Determination of Residual Stresses With the Ring-Core Method and an On-line Measuring System, *Experimental Techniques*, 1992, 16(5), p. 17-24
- [15] KEIL, S.: On-line Evaluation of Measurement Results During the Determination of Residual Stress Using Strain Gages, In *RAM*, 1995, Vol. 9, no. 1, p. 15-20
- [16] KELSEY, R. A.: Measuring Non-uniform Residual Stresses by the Hole Drilling Method, In *Proc. SESA XIV*, 1956, no. 1, p. 181-194
- [17] KIM, C., YANG, W. H.: Prediction of Error due to Eccentricity of Hole in Hole-Drilling Method Using Neural Network, *KSME International Journal (Korean Society of Mechanical Engineers)*, November 2002, Vol. 16, no. 11, p. 1359-1366
- [18] MILBRADT, K. R.: Ring-Method Determination of Residual Stresses, In *Proceedings SESA*, May 1951, Vol. 9, no. 1, p. 63-74
- [19] MONTAY, G., et al.: Determining Residual Stress in Spherical Components: A New Application of the Hole-Drilling Method, *Journal of Testing and Evaluation*, January 2004, Vol. 32, no. 1, p. 73-79
- [20] NICKOLA, W. E.: Practical Subsurface Residual Stress Evaluation by the Hole-Drilling Method, In *Proc. SEM Spring Conference on Experimental Mechanics*, June 1986
- [21] PETRUCCI, G., ZUCCARELLO, B.: Effect of Plasticity on the Residual Stress Measurement Using the Groove Method, *Strain*, August 1996, Vol. 32, Issue 3, p. 97-103
- [22] *Preusser Messtechnik GmbH* [online]  
URL: <<http://www.dms-technik.de/>> [cit. 2010-10-28]
- [23] SCAFIDI, M., VALENTINI, E., ZUCCARELLO, B.: Effect of the Hole-Bottom Filled Radius on the Residual Stress Analysis by the Hole Drilling Method, In *The 8<sup>th</sup> International Conference on Residual Stresses*, ICRS-8, Denver, 2008, p. 263-270
- [24] SCAFIDI, M., VALENTINI, E., ZUCCARELLO, B.: Error and Uncertainty Analysis of the Residual Stresses Computed by Using the Hole Drilling Method, *Strain – An International Journal for Experimental Mechanics*, Vol. 47, 2011, p. 301-312
- [25] SCHAJER, G. S.: Hole-Drilling Residual Stress Measurements at 75: Origins, Advances, Opportunities, *Experimental Mechanics*, 2010, Vol. 50, p. 245-253
- [26] SCHAJER, G. S., PRIME, M. B.: Use of Inverse Solutions for Residual Stress Measurements: Transactions of the ASME, *Journal of Engineering Materials and Technology*, 2006, Vol. 128, no. 3, p. 375-382
- [27] SCHAJER, G. S.: Hole-Drilling Residual Stress Profiling With Automated Smoothing: Transactions ASME, *Journal of Engineering Materials and Technology*, July 2007, Vol. 129, no. 3, p. 440-445
- [28] SCHAJER, G. S.: Measurement of Non-Uniform Residual Stresses Using the Hole-Drilling method, Part I - Stress Calculation Procedures, Transactions of the ASME, ser. H, *Journal of Engineering Materials and Technology*, October 1988, Vol. 110, no. 4, p. 338-343
- [29] SCHAJER, G. S., RICKERT, T. J.: Incremental Computation Technique for Residual Stress Calculation Using the Integral Method, *Experimental Mechanics*, 2011, Vol. 51, p. 1217-1222
- [30] SIIRIÄINEN, J., GRIPENBERG, H., HÄNNINEN, H.: Design and Implementation of Ring-Core Method for Residual Stress Measurement, In *6<sup>th</sup> International Conference on Residual Stresses ICRS-6*, Oxford, UK, 2000, p. 996-1003
- [31] SINT Technology srl: RINGCORE – System for Measuring Residual Stress by the RingCore method, Operating and Maintenance Manual, Italy, 34 p.
- [32] *Strain Gages and Accessories* [online]  
URL: <[www.hbm.com](http://www.hbm.com)> [cit. 2012-04-24]

- [33] ŠVAŘÍČEK, K.: *Teoretické stanovení kalibračních konstant pro měření zbytkového napětí odvrtávací metodou*, Brno, 2003, 101 s., Diplomová práce na Vysokém učení technickém v Brně, Fakulta strojního inženýrství
- [34] ŠVAŘÍČEK, K.: *Využití numerických simulací a neuronových sítí*, Brno, 2007, 41 s., Pojednání k doktorské zkoušce na Vysokém učení technickém v Brně, Fakulta strojního inženýrství
- [35] ŠVAŘÍČEK, K.: *Využití numerických simulací a neuronových sítí ke zdokonalení odvrtávací metody*, Brno, 2007, 122 s., Disertační práce na Vysokém učení technickém v Brně, Fakulta strojního inženýrství
- [36] ŠVAŘÍČEK, K., VLK, M.: Rozvoj metody vrtání otvoru do oblasti pružně plastických deformací v tenké stěně, In *43. konf. EAN*, Skalský Dvůr, 2005, s. 87-88, ISBN 80-214-2941-0
- [37] ŠVAŘÍČEK, K., VLK, M.: Stanovení zbytkových napětí pomocí metody vrtání otvoru v oblasti pružně plastických deformací, In *21. konf. Computational Mechanics*, Vol. II, Nečtiny, 2005, s. 589-596, ISBN 80-7043-400-7
- [38] TIETZ, H.D.: *Grundlagen der Eigenspannungen. Entstehung in Metallen, Hochpolymeren und silikatischen Werkstoffen – Messtechnik und Bewertung*, Leipzig, 1983, 314 s
- [39] VALENTINI, E., BENINCASA, A., BERTELLI, A.: An Automatic System for Measuring Residual Stresses by the Ring-Core Method, In *40<sup>th</sup> National Convention*, Palermo, Italy, September 2011
- [40] VÁCLAVÍK, J., et al.: Evaluation of Residual Stresses using Ring Core Method, In *ICEM 14 – 14<sup>th</sup> International Conference on Experimental Mechanics*, Poitiers, France, July 2010
- [41] VÁCLAVÍK, J., et al.: Residual Stress Evaluation According ASTM E-837-08 Revision, In *47. mezinárodní konference Experimentální analýza napětí EAN 2009*, Sychrov, 2009, p. 263–268
- [42] Vishay Measurement Group Inc.: *Measurement of Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain Gage Method, TN 503 – 5*, Raleigh, North Carolina, 1993
- [43] VLK, M., et al.: Odporová tenzometrie, *Experimentální mechanika*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2003, Kapitola 5, s. 57-145
- [44] WANG, J. Y.: Refined Analysis of the Relieved Strain Coefficients for the Off-Center Hole-Drilling Case, In *Experimental Mechanics*, December 1990, Vol. 30, no. 4, p. 367-371
- [45] WERN, H.: Finite Element Solutions for Mechanical Drilling Methods: a New Integral Formalism, *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 1995, 63, p. 365-372
- [46] WOLF, H., BORGMANN, H., STÜCKER, E.: Weiterentwicklung des Ring-Kern-Verfahrens zur Messung von Eigenspannungen, *Archiv für das Eisenhüttenwesen*, May 1973, Nr. 5, p. 369-373
- [47] WOLF, H., BÖHM, W.: Das Ringkern-Verfahren zur Messung von Eigenspannungen und seine Anwendungen bei Turbinen und Generatorwellen, *Arch. Eisenhüttenwesen* 42, 1971, p. 195-200
- [48] ZHU, W. X., SMITH, D. J.: Residual Stresses by Hole-Drilling in Curved Components, In *Proceedings of Recent Advances in Experimental Mechanics*, 1994, p. 777-782
- [49] ZUCCARELLO, B.: Optimization of Depth Increment Distribution in the Ring-Core Method, *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, July 1996, Vol. 31, no. 4, p. 251-258

## SEZNAM VLASTNÍCH PRACÍ VZTAHUJÍCÍCH SE K TÉMATU DISERTAČNÍ PRÁCE

- [50] CIVÍN, A., VLK, M.: Theoretical Analysis of Ring-Core Method for Residual Stress Determination, In *Konference ANSYS 2009*, Plzeň, 2009, ISBN 978-80-254-5437-4, p. 205-212
- [51] CIVÍN, A., VLK, M.: Analysis of Calibration Coefficients for Incremental Strain Method Used for Residual Stress Measurement by Ring-Core Method, In *12<sup>th</sup> International Scientific Conference Applied Mechanics 2010*, Jablonec nad Nisou, 2010, ISBN 978-80-7372-586-0, p. 25-28
- [52] CIVÍN, A., VLK, M.: New Information about Incremental Strain Method Used for Residual Stress Measurement by Ring-Core Method, In *International Conference Engineering Mechanics 2010*, Svratka, 2010, ISBN 978-80-87012-26-0, p. 15-16

- [53] CIVÍN, A., VLK, M.: Assessment of Incremental Strain Method Used for Residual Stress Measurement by Ring-Core Method, In *48<sup>th</sup> International Scientific Conference Experimental Stress Analysis 2010*, Velké Losiny, 2010, ISBN 078-80-244-2533-7, p. 27-34
- [54] CIVÍN, A., VLK, M.: Determination of Principal Residual Stresses' Directions by the Incremental Strain Method, In *Computation Mechanics 2010* [CD-ROM], Nečtiny, 2010, ISBN 978-80-7043-919-7
- [55] CIVÍN, A., VLK, M.: Ring-Core Residual Stress Measurement: Analysis of Calibration Coefficients for Incremental Strain Method, *Bulletin of Applied Mechanics*, Vol. 6, no. 24, 2010, ISSN 1801-1217, URL: < [bulletin-am.cz/index.php/vam/article/.../167](http://bulletin-am.cz/index.php/vam/article/.../167) >
- [56] CIVÍN, A., VLK, M.: Determination of Principal Residual Stresses' Directions by the Incremental Strain Method, In *Applied and Computation Mechanics*, Vol. 5, 2011, Plzeň, 2011, ISSN 1802-680X, p. 5-14, URL: < <http://www.kme.zcu.cz/acm/index.php/acm/article/view/137/89> >
- [57] CIVÍN, A., VLK, M., NAVRÁTIL, P., MATUG, M.: Introduction into Integral Equation Method for Ring-Core Residual Stress Measurement, In *13th Conference Applied mechanics 2011*, Velké Bílovice, 2011, ISBN 978-80-87434-03-1, p. 27-30
- [58] CIVÍN, A., VLK, M., NAVRÁTIL, P., MATUG, M.: Ring-Core Residual Stress Measurement: Analysis of Depth Increment Distribution for Integral Equation Method, In *International Conference Engineering Mechanics 2011*, Svratka, 2011, ISBN 978-80-87012-33-8, p. 83-86
- [59] CIVÍN, A., VLK, M., NAVRÁTIL, P.: Integral Equation Method for Ring-Core Residual Stress Measurement, In *49<sup>th</sup> International Scientific Conference Experimental Stress Analysis 2011*, Znojmo, 2011, ISBN 978-80-214-4275-7, p. 31-38

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol:	Jednotka:	Význam:
$a, b, c$	[-]	Označení mřížek tenzometrické růžice a působících zbytkových napětí
$A, B$	[MPa]	Relaxační koeficienty (Metoda přírůstků deformace)
$a_{ij}, b_{ij}$	[1]	Kalibrační činitelé (Integrální metoda)
$\bar{a}, \bar{b}$	[1]	Maticе kalibračních činitelů (Integrální metoda)
$D$	[mm]	Průměr otvoru
$d$	[mm]	Průměr sloupku
$E$	[MPa]	Modul pružnosti v tahu
$e_i, d_i, m_i$	[1]	Funkce délkového přetvoření (Integrální metoda)
$H$	[mm]	Celková hloubka drážky
$K_1, K_2$	[mm <sup>-1</sup> ]	Kalibrační koeficienty (Metoda přírůstků deformace)
$n$	[1]	Celkový počet úběrů
$R$	[mm]	Zaoblení povrchu tělesa
$r$	[mm]	Velikost zaoblení dna drážky
$s_i, p_i, q_i$	[MPa]	Funkce napětí (Integrální metoda)
$s$	[mm]	Šířka mezikruhové drážky
$t$	[mm]	Tloušťka plastické vrstvy (Integrální metoda)
$w, l$	[mm]	Šířka, délka měřicí mřížky tenzometrické růžice
$x, y, z$	[-]	Osy souřadnicového systému
	[mm]	Poloha excentricity tenzometrické růžice (Integrální metoda)
$z$	[mm]	Hloubka drážky
$\alpha$	[1°]	Úhel směru působení hlavního zbytkového napětí
$\varepsilon$	[1]	Deformace
$\mu$	[1]	Poissonův poměr
$\sigma$	[MPa]	Tahové / tlakové napětí

# AUTOROVO CV

## Osobní údaje:

Jméno a příjmení: **Adam CIVÍN**  
Datum narození: 24-06-1983, Nové město na Moravě  
Trvalé bydliště: Hamry nad Sázavou 234, 591 01 Žďár nad Sázavou  
Kontakt: tel.: +420 737 878 705  
e-mail: [civin.adam@seznam.cz](mailto:civin.adam@seznam.cz)

## Dosažené vzdělání :

- 2008– Vysoké učení technické v Brně - Fakulta strojního inženýrství  
Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky  
Doktorské prezenční studium – obor Inženýrská mechanika
- 2003–2008 Vysoké učení technické v Brně - Fakulta strojního inženýrství  
Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
- 1999–2003 Sřední průmyslová a Vyšší odborná škola ve Žďáře nad Sázavou  
Obor strojní inženýrství

## Praxe při studiu:

- 08/2008– Divize letecké techniky *První brněnská strojírna*  
oddělení Projekty a vývoj *Velká Bíteš, a.s.*  
Projektant výpočtář *595 12 Velká Bíteš*
- 08–12/2005 Technický pracovník *Tokoz a.s.*  
*591 01 Žďár nad Sázavou*
- 08/2003 Konstruktor *WAE Engineering*  
*591 01 Žďár nad Sázavou*

**Cizí jazyky:** Angličtina - velmi dobře slovem i písmem (05/2010 zkouška FCE)  
Ruština - středně pokročilý slovem i písmem

**Řidičský průkaz:** B (aktivní řidič)

## Kurzy a certifikace:

- 09/2010 Kurz základů vědecké práce v Akademii věd ČR  
05/2010 First Certificate in English – Council of Europe Level B2

**Zájmy a dovednosti:** Microsoft Windows, Microsoft Office, AutoCAD, Inventor,  
ProEngineer, Solid Edge, ANSYS, Matlab, Mathcad

**Záliby:** sport, četba, hudba, film, cestování, získávání nových zkušeností

## **ABSTRAKT**

Tato práce představuje komplexní analýzu metody uvolňování sloupku, určenou pro vyhodnocení zbytkové napjatosti v závislosti na hloubce odvrtného materiálu. Jedná se o polodestruktivní experimentální metodu, jejíž princip, výhody, nevýhody a aplikovatelnost jsou v této práci diskutovány. Současně je zde také vzájemně porovnána metoda uvolňování sloupku s metodou vrtání otvoru, která je v praxi více rozšířena. Analýza všech aspektů metody uvolňování sloupku je realizována pomocí metody konečných prvků. Simulace, provedené na výpočtovém modelu, ověřily principy integrální metody a metody přírůstků deformace, a také poskytly podklady pro posouzení vybraných zdrojů nejistot, které významně ovlivňují přesnost měření a tím i přesnost vyhodnocení velikosti zbytkové napjatosti. Hlavním cílem práce je vytvořit globální teoretický přehled všech aspektů metody uvolňování sloupku a zpracovat je v přehledném a uceleném tvaru.

## **ABSTRACT**

Comprehensive analysis of the ring-core method used for the determination of the residual stresses in mechanical components is presented in this thesis. Principles, advantages, disadvantages and applicability of this semi-destructive experimental method are discussed too. At the same time the ring-core method is compared with the hole drilling method, which is used more frequently. All aspects of the ring-core method are analyzed by the finite element method. FE simulations, performed on the universal numerical model, verified principles of the integral method and the incremental strain method. FE simulations also provided basic information for the uncertainty analysis, which significantly affects the accuracy of the residual stress measurement. The main goal, which the present work deals with, is to create a global overview of all ring-core methods' aspects elaborated in a clear and complex form.