

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra pružnosti a pevnosti

Měření zbytkových napětí odvrtávací metodou

Measurement of Residual Stresses Hole Drilling Method

Student:

Bc. Tomáš Kubica

Vedoucí diplomové práce:

Ing. František Fojtík, Ph.D.

Ostrava 2014

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Tomáš Kubica**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 3901T003 Aplikovaná mechanika
Téma: **Měření zbytkových napětí odvrtávací metodou**
Measurement of Residual Stresses Hole Drilling Method

Zásady pro vypracování:

1. Rozbor metod vhodných pro analýzu zbytkových napětí odvrtávací metodou.
2. Návrh experimentu na ověření konstant použité metody.
3. Realizace experimentu - měření zbytkových napětí při postupném odvrtávání.
4. Srovnání experimentálního a numerického řešení.

Seznam doporučené odborné literatury:

- ASTM E 837 – 08: Determining Residual Stresses by the Hole – Drilling Strain-Gage Method. Norma pro měření zbytkových napětí odvrtávací metodou.
- Kirsch: Die Theorie der Elastizität und die Bedürfnisse der Festigkeitslehre. Zeitschrift des VDI, 42,1898, s. 797 – 807.
- TECH NOTE TN – 503 – 5: Measurement of Residual Stresses by the Hole – Drilling Strain Gage Method. Firemní materiál Vishay, 1993.
- Schajer, G. S.: Measurement of Non – Uniform Residual Stresses Using the Hole – Drilling Method. Patr I – Stress Calculation aaprocedures. Journal of Engineering Materials and Technology, 1988, Vol. 110, s. 339 – 343.
- Schajer, G. S.: Measurement of Non – Uniform Residual Stresses Using the Hole – Drilling Method. Patr II – Practigal Aplication of the Integral Method, Journal of Engineering Materials and Technology, 1988, Vol. 110, s. 344 – 349.
- Datenblatt D 24.32.0: Bohrlochrosette RY 61 mit Zentrier – und Bohrhilfe. Firemní materiál fy Hottinger.
- Macura, P. a kol.: Zbytková napětí jako parametr kvality výrobků. Hutnické listy č. 9, 2002, s. 22-28.
- Macura, P.: Experimentální metody v pružnosti a plasticitě. Skripta VŠB-TU Ostrava, 2001, 107s.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. František Fojtík, Ph.D.**

Datum zadání: 13.12.2013
Datum odevzdání: 19.05.2014



doc. Ing. Radim Halama, Ph.D.
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 18.5. 2014

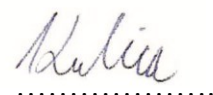
A handwritten signature in cursive script, appearing to read 'Kulica', written over a dotted line.

podpis

Prohlašuji, že:

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- betu na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užit (§ 35 odst.3).
- Souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užit dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užit své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě... 18.5.2014



podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Tomáš Kubica

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Mezi Cestami 1233, Dolní Lutyně

Anotace diplomové práce

Kubica,T. *Měření zbytkových napětí odvrtávací metodou: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra pružnosti a pevnosti, 2014, 75 s., Vedoucí práce: Fojtík,F.

Diplomová práce se zabývá vyšetřováním zbytkových napětí po tloušťce zkušebního vzorku odvrtávací metodou. Z naměřených uvolněných deformací, které byly zjištěny experimentem, se dopočítaly výsledná zbytková napětí a to postupem uvedeným v americké normě ASTM E837-13a jak pro předpoklad homogenního rozložení po tloušťce, tak pro nehomogenní rozložení napětí po tloušťce. Poté byl sestrojen numerický model metodou konečných prvků, s kterým se experiment srovnával. Poslední část této práce porovnává výsledky zbytkových napětí vypočítaných dle kalibračních koeficientů uvedených v normě ASTM s napětími získanými pomocí nových koeficientů zjištěných z MKP modelu.

Annotation of thesis

Kubica,T. *Measurement of residual stresses hole drilling method: master thesis*. Ostrava VŠB – Technical university of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanics of Materials, 2014, 75 p. Thesis head: Fojtík, F.

This thesis deals with investigation of residual stress on the thickness of the test sample by hole drilling method. From the measured relaxed strains, which were found by experiment, we calculated resulting residual stress with procedure describe in ASTM E837-13a standard for linear and nonlinear stress distribution along the depth. After that was construct numerical model with final element method, which was used for comparison with experiment. Last part of this thesis compares the results of residual stress calculated according to the calibration coefficients listed in ASTM standard with stress obtained from new coefficients identified from the FEM model.

Obsah:

Seznam použitých značek	- 8 -
1. ÚVOD	- 10 -
2. RESIDUÁLNÍ NAPĚTÍ.....	- 11 -
2.1 Rozdělení zbytkových napětí	- 11 -
2.2 Ovlivnění velikosti zbytkových napětí.....	- 13 -
2.3 Metody zjišťování zbytkových napětí.....	- 14 -
2.3.1 Destruktivní metody	- 15 -
2.3.2 Polodestruktivní metody	- 15 -
2.3.3 Nedestruktivní metody	- 18 -
3. TENZOMETRIE.....	- 22 -
3.1 Elektrické tenzometry	- 22 -
3.1.1 Elektrické odporové tenzometry	- 22 -
3.1.2 Princip měření elektrickými odporovými tenzometry	- 23 -
3.1.3 Způsoby měření malých změn odporu tenzometrů	- 24 -
3.1.4 Vliv provozních podmínek na tenzometrická měření	- 25 -
4. ODVRTÁVACÍ METODA	- 27 -
4.1 Volba měřeného místa.....	- 28 -
4.2 Tenzometrické růžice	- 28 -
4.2.1 Volba typu růžice	- 28 -
4.2.2 Volba velikosti růžice.....	- 29 -
4.2.3 Zbylé faktory ovlivňující výběr růžice.....	- 30 -
4.3 Odvrtávací zařízení.....	- 31 -
4.3.1 Zařízení RS-200 firmy Vishay	- 31 -
4.3.2 Zařízení MTS 3000 firmy SINT Technology	- 32 -
4.3.3 Výběr průměru díry	- 32 -
4.3.4 Vliv poloměru zaoblení dna na měřená data.....	- 33 -
4.3.5 Detekce nulové hloubky.....	- 34 -

4.3.6 Způsoby odvrtávání otvorů	- 34 -
5. ROZBOR PROBLÉMU	- 37 -
6. EXPERIMENT.....	- 38 -
7. NUMERICKÉ VÝPOČTY	- 43 -
7.1 Srovnání naměřených a spočítaných dat	- 48 -
8. VÝPOČET ZBYTKOVÝCH NAPĚTÍ.....	- 51 -
8.1 Výpočet pro homogenní rozložení napětí	- 51 -
8.1.1 Výpočet dle normy ASTM E837-13a	- 51 -
8.1.2 Stanovení a přepočet pro nové kalibrační konstanty.....	- 53 -
8.2 Výpočet pro nehomogenní rozložení napětí	- 59 -
8.2.1 Výpočet dle normy ASTM E837-13a	- 59 -
8.2.2 Kontrola metodiky výpočtu na MKP modelu	- 65 -
8.2.3 Výpočet nových kalibračních koeficientů.....	- 67 -
9. ZÁVĚR.....	- 70 -
Seznam použité literatury	- 73 -
Seznam příloh.....	- 74 -
Poděkování	- 75 -

Seznam použitých značek

a, b	[-]	matice kalibračních koeficientů
a_i, b_i	[-]	kalibrační koeficienty
c	[-]	matice druhých derivací
D	[mm]	průměr růžice
D_0	[mm]	průměr díry
E	[MPa]	modul pružnosti v tahu
GL	[mm]	délka mřížky tenzometru
GW	[mm]	šířka mřížky tenzometru
I_g, I_i	[A]	proud
j	[-]	fázový posun
k	[-]	deformační součinitel (k-faktor)
l	[m]	délka vodiče
n	[-]	počet odvrtávacích kroků
P, Q, T	[MPa]	matice transformovaných uvolněných napětí
P_i, Q_i, T_i	[MPa]	transformovaná uvolněná napětí
p, q, t	[-]	matice transformovaných deformací
p_i, q_i, t_i	[-]	transformované uvolněné deformace
p_{misfit}, q_{misfit}, t_{misfit}	[-]	matice rozdílu deformací
$p_{rms}, q_{rms}, t_{rms}$	[-]	střední hodnota chyby
R, R_i	[Ω]	odpor vodiče
r	[m]	poloměr vodiče
S	[m ²]	plocha průřezu vodiče
U_B	[V]	napájecí napětí
U_M	[V]	výstupní napětí
x	[Ω]	reaktance
Z	[Ω]	impedance
$\alpha_P, \alpha_Q, \alpha_T$	[-]	regulační faktory
$\alpha_{Pnova}, \alpha_{Qnova}, \alpha_{Tnova}$	[-]	upravené regulační faktory
ΔI_g	[A]	změna proudu
$\Delta R, \Delta R_i$	[Ω]	změna odporu
Δr	[m]	změna poloměru vodiče
ε	[-]	poměrná deformace
$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$	[-]	uvolněné deformace na tenzometrech růžice

μ	[-]	Poissonova konstanta
ρ	$[\Omega \cdot m^2 \cdot m^{-1}]$	měrný odpor materiálu (rezistivita)
$\sigma_{max}, \sigma_{min}$	[MPa]	hlavní napětí

1. ÚVOD

Zbytková, neboli residuální napětí mají velký vliv na životnost všech součástí a proto jsou pokládány čím dál větší nároky na přesné určení velikosti a směru působení těchto zbytkových napětí. Nejčastější příčiny vzniku takovýchto napětí bývá technologický postup výroby jednotlivých součástí, teplotními procesy, špatná manipulace, doprava a v neposlední řadě také v důsledku strukturálních poruch materiálu. Příklad takového poškození lze vidět na obrázku 1.



Obrázek 1 Lom vlivem residuálního napětí

Mezi jednu z nejrozšířenějších metod pro zjišťování zbytkových napětí patří odvrtávací metoda. Tato metoda spočívá v nalepení tenzometrické růžice na místo, ve kterém je nutno zjistit zbytkovou napjatost a následném postupném odvrtávání díry ve středu této růžice. Vlivem postupného odvrtávání dochází k uvolnění nahromaděného vnitřního napětí, které se projeví přetvořením povrchu a velikost tohoto přetvoření zaznamená tenzometrická růžice připojená k vyhodnocovací aparatuře.

Cílem této diplomové práce je zhodnotit pomocí změřených uvolněných deformací výsledná residuální napětí a to pomocí několika nepoužívanějších metod na nosníku stejné pevnosti. Tou první je zhodnocení pro homogenní i nehomogenní rozložení po průřezu dle kalibračních koeficientů uvedených v normě ASTM E837-13a a následně pomocí kalibračních koeficientů získaných z numerického modelu vytvořeného pomocí metody konečných prvků. V závěru dojde k srovnání jednotlivých přístupů a zhodnocení jejich použitelnosti v praktických úlohách.

2. RESIDUÁLNÍ NAPĚTÍ

Jak již bylo uvedeno v úvodu, zbytková napětí vznikají tehdy, vzniká-li v tělese pružně plastická deformace od vnějších vlivů a tato napjatost v objemu tělesa zůstává i poté, co původní iniciátory této napjatosti zmizí. Výslednice vnitřních sil je potom v daném průřezu nulová. Jako hlavní iniciátory vzniku napjatosti se označuje zejména vliv vzájemného působení těles nebo působení teplotního pole. Dle rozložení po hloubce materiálu se zbytková napjatost dělí na homogenní a nehomogenní. Takto vzniklá napětí mohou být žádoucí anebo nežádoucí.



Obrázek 2 Kuličkování turbínové lopatky

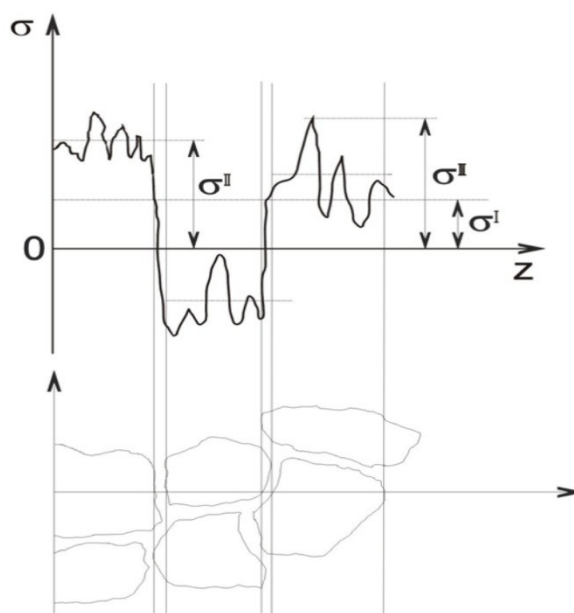
Jako prospěšná považujeme vysoká tlaková napětí, která vznikají například kuličkováním (brokováním) povrchu součástí ocelovými, skleněnými nebo keramickými kuličkami (viz obr. 2). Další stále používanější metodou je tzv. LP (Laser Peening) nebo také LSP (Laser Shock Peening), u nás známá jako laserové vyklepávání, které spočívá ve zpevňování povrchu materiálu pomocí rázových vln vygenerovaných laserem. Tato metoda se uplatňuje hlavně v leteckém průmyslu, kde se využívá k regeneraci povrchu lopatek turbín leteckých tryskových motorů, avšak její uplatnění můžeme najít i v běžném životě a to u vysoce odolných displejů chytrých mobilních telefonů. Takto ošetřené povrchy součástí se vykazují prodlouženou životností, zlepšením mechanických vlastností a opotřebení, snížení korozního praskání a mezikrystalové koroze.

Naopak jako velice nežádoucí se považují zbytková napětí tahová, která mají za následek vznik trhlin, napěťovou korozi, snížení meze únavy a křehkolomové odolnosti. Takto vzniklá napětí například v okolí chladnoucích svarů mohou způsobit trhlinu i v případě, kdy na součást působí menší síla, než na jakou byla dimenzována (obr. 1).

2.1 Rozdělení zbytkových napětí

Residuální napětí můžeme rozdělit dle velikosti objemů, v nichž se nemění velikost a směr působení těchto napětí a to na 3 základní druhy:

1. **Zbytková napětí I. druhu** (makroskopická) – jsou homogenní ve větším počtu zrn materiálu, viz obr. 3. Vnitřní síly a momenty spojené s residuálním napětím jsou v celé oblasti v rovnováze a zásah do této rovnováhy způsobí makroskopické změny rozměrů. Vznikají nejčastěji z důvodů výrobní technologie, jako obrábění, lití, povrchové úpravy a tepelného zpracování, ale také nevhodnou manipulací, montáží a v neposlední řadě provozním či zkušebním zatížením. Tento druh zbytkových napětí na rozdíl od 2 následujících lze vhodnou volbou výrobní technologie a následným zpracováním výrazně ovlivnit a tím i zvýšit životnost a bezpečnost jednotlivých součástí.
2. **Zbytková napětí II. druhu** (mikroskopická) – jsou přibližně homogenní v oblastech srovnatelných s velikostí zrn, viz obr. 3. Vnitřní síly a momenty působí v dostatečně velké oblasti a zásahem do této oblasti vzniká mikroskopická deformace. Takto vzniklá zbytková napětí jsou způsobena nejčastěji při tepelných procesech v materiálu s různou tepelnou roztažností v jednotlivých směrech materiálu, anebo u mechanicky zatížených součástí, které mají různé mechanické vlastnosti v jednotlivých směrech materiálu (tzv. jsou anizotropní).
3. **Zbytková napětí III. druhu** (submikroskopická) – jsou nehomogenní i v oblastech srovnatelných s meziatomovými vzdálenostmi, viz obr. 3. Jejich vznik je důsledkem strukturních poruch (bodových, čárových, apod.).



Obrázek 3 Rozložení zbytkových napětí v objemu materiálu [2]

V praxi se nejčastěji vyskytují všechny druhy zbytkových napětí současně, avšak největší vliv má na životnost součástí právě napětí I. druhu, a proto se v technické praxi považuje za důležité co největší ovlivnění právě těchto napětí.

2.2 Ovlivnění velikosti zbytkových napětí

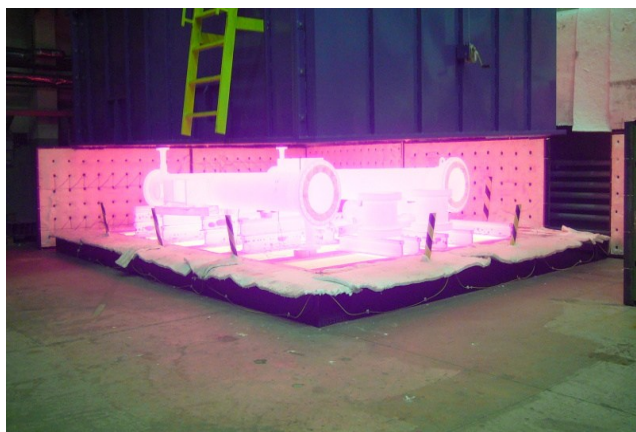
Jako základní prostředky pro ovlivnění výsledné velikosti zbytkových napětí můžeme považovat technologický a konstrukční návrh součásti.

Jako konstrukční návrh, kterým můžeme snížit velikost zbytkových napětí je vhodná volba množství přechodů, zápichů, osazení, velikost zaoblení apod. Nemůže se také opomenout vhodná volba tvaru polotovaru v případě lití, kdy dochází v případě špatně navržené formy během chladnutí k obrovským pnutím. Dalším výrazným iniciátorem zbytkových pnutí je nevhodná volba svarů, kdy například zbytečné předimenzování množství svarů způsobí velké teplotní zatížení v okolí svarů a následnou kumulaci napětí.

Mezi technologické návrhy patří vhodná volba výrobního postupu, kdy se volí například způsob obrábění součásti (volba stroje, otáček, posuvu, velikost úběru apod.) nebo v případě lití doba a způsob chlazení. U svařování se například volí svařování po částech, kdy se součást svařuje střídavě z obou stran, aby nedocházelo k jednostrannému vychýlení svařované součásti.

V případě, že již nelze technologickými a konstrukčními návrhy výsledná zbytková napětí omezit, je nutné odstranit pnutí dodatečným zásahem a to lokálním, popřípadě celkovým žiháním součásti nebo pomocí vibrací.

Při žihání se využívá změna fyzikálních vlastností oceli působením tepla, kdy dochází k poklesu meze kluzu a modulu pružnosti, čímž se sníží špičky napětí. Nejdůležitější částí této operace je rovnoměrné a pomalé ochlazení součásti (obr. 4). Z toho důvodu je výhodnější provádět žihání celkové nežli lokální, neboť u



Obrázek 4 Žihání strojních součástí

lokálního ochlazování může dojít k opětovnému vzniku residuálních napětí.

Nevýhodou této metody je však omezení v případě rozměrných součástí, kdy je žihání neefektivní, neboť se obtížně kontrolují deformace při žihací teplotě a zároveň je tato metoda i energeticky a finančně náročná, jelikož se musí výrobky převážet do zařízení

vybaveného dostatečně velkou pecí. Právě tyto důvody stojí za tím, že se pro velkorozměrné výrobky začala používat tzv. metoda vibrací pro snížení vnitřních pnutí. [1]

Tato metoda vibrací je založena na mechanickém způsobu uvolňování vnitřního pnutí, které spočívá ve využití vnitřního tření a tím ohřevu vedoucího ke snížení meze kluzu a uvolnění špiček napětí. Pro každý výrobek je potřeba stanovit optimální frekvence vibrací, které se volí na základě modální analýzy dané součásti.

Frekvence těchto vibrací je základním parametrem pro další postup zpracování obrobku. Zdrojem těchto vibrací je speciální motor se stupňovitě přestavitelným nevyvážkem, který je umístěn na stabilním a masivním místě obrobku a velikost takto vygenerovaných vibrací je snímána jedno nebo tříosým akcelerometrem (obr. 5). Celý proces je



Obrázek 5 Vibrační zařízení

rozdělen do 3 fází (načítání dat, pracovní proces a kontrola) a udávaná doba celé operace se pohybuje v rozmezí jedné až dvou hodin, z čehož samotná pracovní fáze trvá zpravidla 20 až 30 minut. I přesto, že pořizovací náklady těchto zařízení jsou vysoké, jejich výhoda daleko převyšuje použití žíhání, neboť lze zařízení použít přímo na pracovišti a není nutné převážet součást do žíhacích pecí a zpět. Dále odpadá odstraňování okují po žíhání a největší výhodou je výrazné zkrácení výrobního času a s tím spojená rychlá návratnost pořizovacích nákladů.

2.3 Metody zjišťování zbytkových napětí

Podle principu měření lze rozdělit metody měření zbytkových napětí:

1. **Mechanické** – spočívají v měření deformací
2. **Fyzikální** – měření změn vlastností
3. **Chemické** – změny vyvolané chemickými procesy

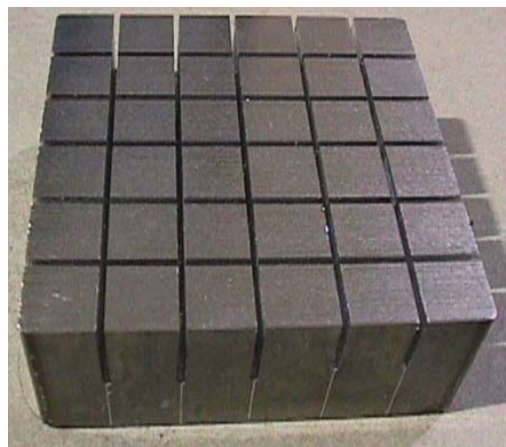
Podle charakteru měřené veličiny:

1. **Přímé**
2. **Nepřímé** – zbytkové napětí se určí podle změny jiných veličin

Podle velikosti narušení celistvosti vyšetřovaného tělesa se rozlišují 3 základní metody- destruktivní, semidestruktivní a nedestruktivní.

2.3.1 Destruktivní metody

Většina mechanických metod, kdy dochází k nevratnému poškození součásti. Všechny metody spadající do této kategorie jsou založeny na měření deformací při odstraňování jednotlivých vrstev materiálu. Dnes jsou tyto metody již nahrazovány ekonomičtěji a časově výhodnějšími metodami polodestruktivními a nedestruktivními. Avšak největší výhodou této metody je to, že nezáleží na tloušťce



Obrázek 6 Metoda kolmých řezů

vyšetřovaného tělesa, kdežto u polodestruktivních a nedestruktivních metod se s rostoucí měřenou hloubkou do jisté míry zmenšuje přesnost samotného měření.

Odstraněním jednotlivých vrstev materiálu dochází k porušení podmínky rovnováhy vnitřních sil, která se projeví změnou deformace, která se následně měří a vyhodnocuje se velikost zbytkových napětí.

Při samotném odstraňování vrstev je velice důležitá vhodná volba obrábění, jelikož hrozí možnost vnesení přídatných napětí, která se superponují na již zavedená napětí a tím zkreslují výsledná data. Jako vhodné obrábění se jeví řezání pásovými pilami, či jemné frézování úzkou jemnozubou frézou, kdy je zabezpečeno dostatečné chlazení. V případě, kdy se vyskytují vysoké gradienty napětí a je tedy nutné odebírat velice malé tloušťky jednotlivých vrstev, je výhodnější použít chemické nebo elektrochemické metody obrábění.

Jako nejrozšířenější z těchto metod lze uvést:

1. **Metoda postupného odleptávání povrchových vrstev**
2. **Metoda kolmých řezů** (obr. 6)
3. **Metoda šikmých řezů**
4. **Proužkování a plátkování**

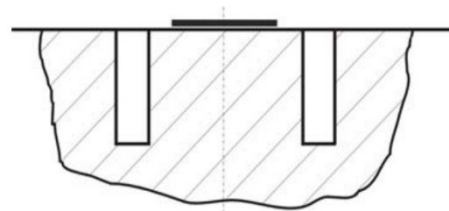
2.3.2 Polodestruktivní metody

Jedná se o metody, kdy dochází k částečnému znehodnocení součásti, ale na rozdíl od předchozí metody lze součást snadnou opravou uvést do původního stavu, případně je

poškozená oblast tak malá, že nehraje na pracovní funkci zařízení roli. Jako nejrozšířenější v této kategorii lze uvést:

1. **Odvrtávací metoda** – tato metoda tvoří základ této diplomové práce a bude jí věnována samostatná kapitola.

2. **Metoda sloupku** – po odvrtávací metodě druhá nejpoužívanější metoda pro zjišťování zbytkových napětí. Namísto díry se zde odstraňuje kruhový prstenec, čímž vznikne tzv. sloupek, který má průměr 15 – 150mm a



Obrázek 7 Metoda sloupku

hloubku zhruba $0,25 \div 1,5$ násobek průměru daného sloupku (obr. 7). Velikost uvolněných deformací je zaznamenána pomocí tenzometrické růžice nalepené uprostřed tohoto sloupku. Vzhledem k rozměrům je tato metoda vhodnější u rozměrnějších součástí, neboť v případě součástí menších by mohlo dojít k nenávratnému poškození.

Výhodou v porovnání s odvrtávací metodou je její vyšší citlivost a v případě homogenní napjatosti lze při odfrézování drážky na plnou hloubku ihned z naměřených uvolněných deformací dopočítat zbytkové napětí z konstitutivních vztahů a to i bez nutnosti použití kalibračních koeficientů. Zároveň jsou na tuto metodu kladeny i menší nároky na dodržení přesnosti rozměrů a tvaru uvolněného sloupku.

V případě řešení nehomogenního rozložení zbytkových napětí je nutné stanovit kalibrační koeficienty a to nejčastěji metodou konečných prvků. [2]

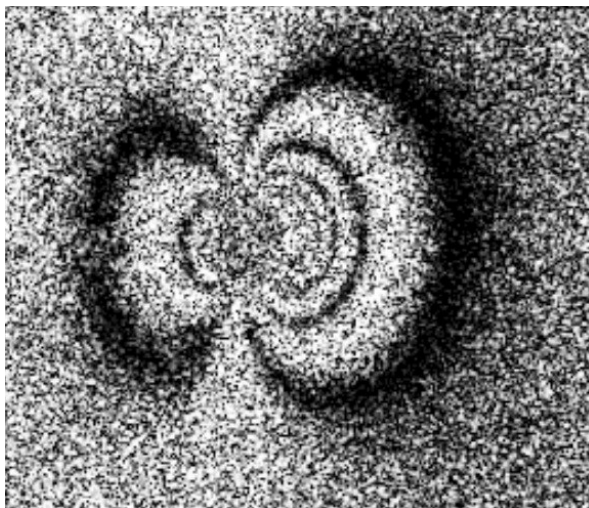
3. **Metoda Prism** – jedna z nejmladších metod, která využívá vrtání otvoru a digitálního zpracování obrazu. Je použitelná pro všechny materiály, které lze vrtat a není nutná žádná speciální příprava jako lepení tenzometrické růžice apod. (obr. 8) a i přesto je dosaženo vysoké přesnosti za velice krátký čas.



Obrázek 8 Sestava zařízení Prism [3]

Principem této metody je frézování kruhového otvoru do čistého povrchu s nízkou odrazivostí, kdy je tento povrch snímán tzv. elektronickou interferometrií „speckle“ obrazců, která využívá rozptylu laserového světla na nerovnostech povrchu zkoumaného tělesa. Povrch je osvětlen dvěma krátkými po sobě jdoucími pulzy rozptýleného laserového paprsku, jehož odraz snímá CCD kamera. Počítač poté zpracovává interferenční obrazce prvního pulzu mezi referenčním a odraženým paprskem od plochy nedeformované a druhého pulzu mezi tímž referenčním paprskem a paprskem odraženým od plochy deformované vrtáním. Zpracováním těchto dat se získá grafické vykreslení uvolněných pnutí, jak je uvedeno na obrázku 9.

Doba samotného vrtání i s vyhodnocením se uvádí kratší než 5 minut a v případě rozsáhlejších vrtání maximálně půl hodiny. Celé zařízení se dodává i s vyhodnocovací aparaturou, čímž se značně zjednodušuje celková obsluha a samotná měření můžou být prováděna v plně automatickém režimu. [3]



Obrázek 9 Grafický výstup metody Prism [3]

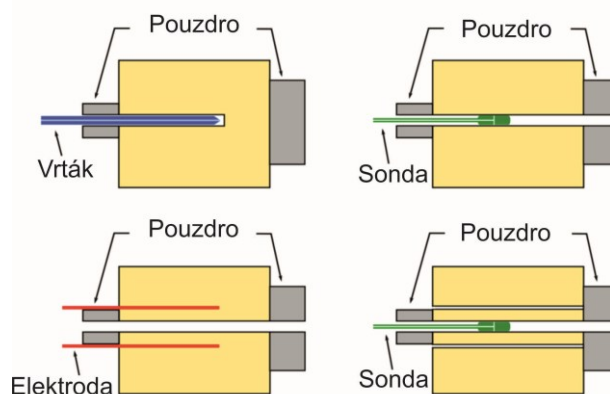
- 4. Metoda DHD** – princip této metody spočívá v odvrtávání hluboké díry až do hloubek přesahující 750mm. Touto metodou lze dosáhnout přesnosti změření uvolněných deformací až na mikroskopické úrovni.

Prvním krokem celé metody je umístění zkoušeného modelu z obou stran do pouzdra, které má za funkci zabránit efektu roztažení díry na jednotlivých koncích této díry. Poté se skrz celý materiál odvrtá referenční díra jistého průměru, která se následně v pravidelných intervalech změří po celé délce a obvodu pomocí vzduchové sondy. Tato sonda má tvar tenkého prutu, kde na jeho konci proudí dvěma malými otvory, kolmými na osu vrtání, stlačený vzduch. Posunováním této

sondy se s měnícím průměrem díry bude měnit i tlak v sondě, který pomocí kalibrovaného transformátoru převede změnu tlaku na volty a následně na deformaci. Následně se v okolí této díry (tzv. jádru) obrobí válec, čímž dojde k uvolnění vnitřních napětí, která způsobí deformaci uvnitř vrtané díry. Obrobení válce v okolí vrtané díry se provádí pomocí elektrického výboje, který nevnaší do materiálu žádná přídavná zbytková napětí. Poslední operací je opětovné změření vrtané díry vzduchovou sondou a jeho srovnáním s hodnotami naměřenými před vytvořením válce. Celý postup je schematicky naznačen na obrázku 10.

Ze zjištěných uvolněných deformací se následně například metodou konečných prvků sestrojí simulace celé úlohy a zjistí se velikost uvolněných vnitřních napětí.

Přesnost této metody se u hliníku pohybuje v rozsahu $\pm 10\text{MPa}$, u ocelí $\pm 30\text{MPa}$ a u titanu $\pm 15\text{MPa}$.



Obrázek 10 Princip metody DHD (Deep-Hole-Drilling)

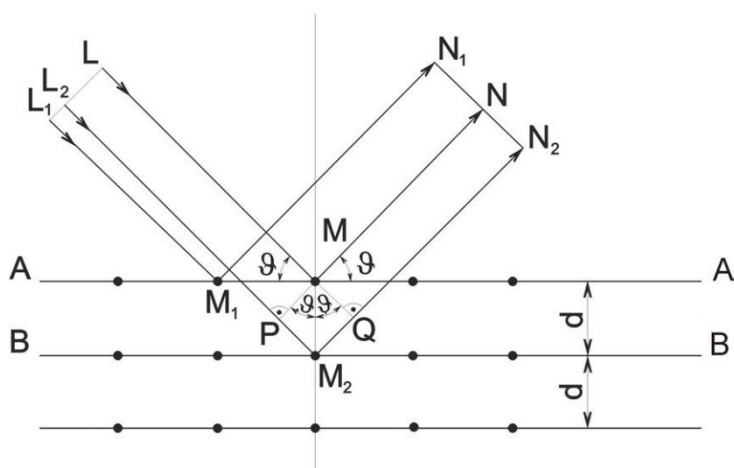
2.3.3 Nedestruktivní metody

Nedestruktivní metody se řadí mezi momentálně nejvíce se rozvíjející způsoby řešení velikostí zbytkových napětí a to hlavně z důvodu jejich použitelnosti bez poškození zkoušených obrobků, což vede k zlepšení výstupní kontroly jakosti u průmyslové výroby.

1. **Rentgenografická difrakční metoda** – princip metody spočívá v určení mřížkových deformací a jejich přepočtu na napětí pomocí vztahů lineární teorie elasticity.

Zasáhne-li svazek rentgenových paprsků atom, působí elektrické pole svazku na každý z elektronů atomů a urychluje jej (elektron pak vykonává kmitavý pohyb). Každý takovýto náboj se stává zdrojem elektromagnetických vln. Každý elektron v těchto nábojích bere jistou malou část energie z dopadajícího svazku a vysílá ji

všemi směry, tzv. ji „rozptyluje“. Superpozicí vln rozptýlených jednotlivými atomy vzniká difrakce, viz obr. 11.



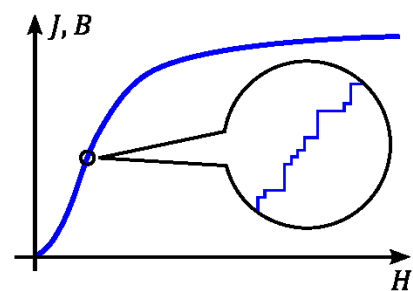
Obrázek 11 Schématické znázornění difrakční metody [2]

Celá difrakční metoda a samotné vyhodnocení zbytkových napětí není jednoduché, a proto zde nebude podrobně popisována, avšak řadí se mezi jedny z nejpřesnějších. Podrobný popis celé metody je uveden v [2].

Touto metodou lze řešit napětí v povrchové vrstvě o tloušťce 1 - 10 μ m, dále je možná separace zbytkových napětí I. a II. druhu (napětí II. druhu se projeví rozšířením difrakčních linií).

Mezi nevýhody se řadí možnost detekce pouze elastických deformací, omezení v případě měření krystalických materiálů a poměrně vysoké požadavky na vybavení a odbornost obsluhujících pracovníků.

- Barkhausenův šum** – princip této metody je založen na tom, že vliv působení zbytkových napětí způsobí změnu intenzity tohoto šumu procházejícího tělesem (tlakové napětí snižuje, tahové zvyšuje), díky které lze určit i velikost a směr hlavních napětí. Tato metoda se řadí do kategorie magnetických metod.



Obrázek 12 Barkhausenův šum

Barkhausenův šum vzniká u feromagnetických materiálů, na které působí silné magnetické pole, čímž dojde k náhlým změnám směru magnetického momentu, které do té doby působily v náhodných směrech, přesně do směru pole. Poté bude magnetizace přibývat po malých skocích a ne spojitě. Tím dojde v cívice, která je

kolem zkoušeného materiálu, k indukci proudových nárazů. Po zesílení je tento výstup znám jako Barkhausenův šum, viz obr. 12.

Využití této metody je velmi závislé na materiálových vlastnostech zkoušeného vzorku a to hlavně na vodivosti a permeabilitě. V běžných aplikacích se vyšetřovaná hloubka pohybuje od 0,01mm do 3mm.

Praktickým příkladem zařízení pro měření na základě Barkhausenova šumu je přístroj STRESSCAN firmy Stresstech. [2]

- 3. Magnetostrikční metoda** – magnetostrikcí se rozumí změna rozměrů těles z feromagnetických látek vlivem působení magnetického pole. Tato změna může být buď kladná (těleso se prodlužuje) nebo záporná (těleso se zkracuje). Dále je založena na reciprokém jevu, což je magnetoelastická, kdy magnetické vlastnosti materiálů se mění s mechanickými vlastnostmi.

Díky těmto jevům lze při deformaci zkoušeného vzorku pozorovat a vyhodnocovat změnu permeability, směru magnetického toku a remanentní indukci projevující se změnou tvaru magnetizační křivky.

V praxi se používají dva nejběžnější typy zařízení pracující na principu této metody a to magnetický snímač tvaru U a snímač magnetické anizotropie.

Přesnost těchto zařízení je v případě malých zbytkových napětí vyhovující, avšak v případě velkých napětí dochází k vysokým nepřesnostem, které lze snížit získáním kalibračních křivek. Tato kalibrace je však v reálném prostředí často velmi složitá až nereálná. To je jeden z hlavních důvodů, proč se pro měření zbytkových napětí dává přednost jiným nedeformačním způsobům.

- 4. Ultrazvukové (akustoelastické) metody** – fungují na principu přibližně lineární změny rychlosti šíření zvuku v kovech v závislosti na namáhání, neboli akustoelastický jev. Tyto metody se dělí dle použitých vln na podélné vlny, příčné vlny a Rayleighovy vlny.

Podélné vlny, kdy s body kontinua pohybují ve směru šíření vlnění, se používají pro určení celkových napětí. Rychlost těchto vln je úměrná součtu hlavních napětí.

Příčné vlny, kdy se body kontinua pohybují kolmo na směr vlnění, mají stejné využití jako podélné vlny, avšak vycházejí z rozdílu dvou příčných vln polarizovaných kolmo na směr šíření, který je úměrný rozdílu hlavních napětí.

Rayleighovy vlny nebo také povrchové akustické vlny procházejí po povrchu a těsně pod ním, kdy je tato hloubka rovna přibližně vlnové délce, což je u běžných

materiálů asi 1mm. Tento typ vln je kombinací podélných a příčných vln, a jelikož lze vyšetřovanou hloubku řídit podle použité frekvence vlnění, je tato metoda vhodná pro vyšetřování rozložení zbytkových napětí v různých hloubkách pod povrchem.

Použití této metody přináší všeobecně dobré výsledky ve velice rychlém čase, avšak velkou nevýhodou je její vysoká citlivost na další faktory jako tvrdost, krystalická textura, složení apod., čímž dojde k výraznému zkreslení naměřených dat. [2]

V tabulce 1 je uveden stručný přehled nepoužívanějších metod měření zbytkových napětí.

Metoda zjišťování zbytkových napětí	Tvar součásti	Způsob měření	
Mechanické	plochý	deformace pásku	změna délky
			změna zakřivení
		vrtání děr	válcová díra
			mezikruží
	rotační	změna rozměru válce	odstranění povrchové vrstvy
		trubka	rozříznutí trubky
			odstranění povrchové vrstvy
			odstranění vnitřní vrstvy
		kroužek	rozříznutí
			změna křivosti
	podélné pásy z kroužků		
	obecný tvar	metoda sítí	deformace sítě
křehké laky		vznik trhlin	
křehké modely		vznik trhlin	
Fyzikální RTG	obecný tvar	difrakce	vzdálenost meziatomových rovin
Fyzikální ultrazvuk		šíření vln	změna potenciálu procházejícího proudu
			změna velikosti vířivých proudů
			změna indukčního toku
Elektrické	obecný tvar	změna proudu	změna potenciálu procházejícího proudu
			změna velikosti vířivých proudů
			změna indukčního toku
Magnetické	obecný tvar	změna magnetismu	magnetická indukce
			zbytkový magnetismus
Akustické	obecný tvar	prozvučnitelnost	četnost akustických emisí
Chemické	obecný tvar	difúze vodíku	trhliny na povrchu
		změna chemické aktivity	změna struktury

Tabulka 1 Přehled metod pro zjišťování zbytkových napětí [4]

3. TENZOMETRIE

Jelikož je odvrťovací metoda založena na principu měření uvolněných deformací, které jsou zaznamenávány pomocí odporových tenzometrů, bude celá tato kapitola věnována problematice ohledně tenzometrie.

Jak už bylo uvedeno, tenzometry slouží k měření změny vzdáleností 2 bodů tělesa v důsledku změny zatížení a podle fyzikálního principu měření a dalšího zpracování naměřené veličiny lze tenzometry dělit na:

- 1) mechanické
- 2) mechanicko-optické
- 3) strunové
- 4) pneumatické
- 5) fotoelasticimetrické
- 6) elektrické

Avšak v současnosti naprosto převládají elektrické tenzometry, které se dále dělí na tenzometry indukční, kapacitní a odporové, z nichž odporové se řadí mezi nejrozšířenější a jsou použity i u metody odvrťovací.

3.1 Elektrické tenzometry

Elektrické tenzometry mění měřenou hodnotu (tzn. poměrné prodloužení) na elektrickou hodnotu a podle charakteru výstupní veličiny se dále dělí:

- 1) Indukční – transformují změnu délky na změnu impedance cívky, kterou protéká proud.
- 2) Kapacitní – změnu délky mění na změnu kapacity kondenzátoru.
- 3) Odporové – zdaleka nejrozšířenější a změna délky se zde transformuje na změnu odporu.

3.1.1 Elektrické odporové tenzometry

Podle druhu použitého odporového drátu se odporové tenzometry dělí na:

- 1) Uhlíkové – fungovaly na principu změny odporu ve sloupci uhlíkových destiček upevněných k povrchu tělesa. Dnes se již nepoužívají.
- 2) Polovodičové – založené na piezorezistentním jevu, což je změna elektrického odporu v závislosti na deformaci monokrystalu křemíku nebo germania. Výhodou

těchto tenzometru je velká citlivost na změnu deformací, avšak nevýhodou je nelineární změna odporu na deformaci a výrazný vliv teploty na velikost výstupního signálu.

3) Kovové -drátkové

-fóliové – vyrábí se fotochemickým způsobem z konstantanové nebo chromniklové fólie o tloušťce 5 - 15 μ m. Tyto tenzometry patří mezi nejvíce používané a to hlavně díky tomu, že výroba tvarově složitých snímačů je oproti drátkovým tenzometrům snazší a mají lepší odvod tepla, což dovoluje vyšší proudové zatížení, kterým se získá vyšší citlivost tenzometru. [5]

3.1.2 Princip měření elektrickými odporovými tenzometry

Ohmický odpor vodiče R v závislosti na jeho délce l , ploše průřezu S a měrném odporu materiálu ρ je dán vztahem:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad (1)$$

Pokud se uvažují všechny tyto veličiny jako proměnné, bude totální diferenciál funkce vypadat:

$$dR = \frac{l}{S} d\rho + \frac{\rho}{S} dl + \frac{\rho l}{S^2} dS \quad (2)$$

Z rovnic (1) a (2) potom plyne:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} + \frac{dS}{S} \quad (3)$$

Dále lze označit poměrnou deformaci jako:

$$\frac{dl}{l} = \varepsilon \quad (4)$$

Za předpokladu, že poměrná změna měrného odporu je lineárně závislá na poměrném prodloužení ε , lze psát:

$$\frac{d\rho}{\rho} = p \cdot \varepsilon \quad p = konst. \quad (5)$$

Následně se vypočte změna průřezu vodiče kruhového průřezu jako rozdíl průřezů po a před deformací.

$$dS = \pi(r - \Delta r)^2 - S = \pi r^2 \left(1 - \frac{\Delta r}{r}\right)^2 - S = S(1 - \mu\varepsilon)^2 \cong -2\mu\varepsilon S \quad (6)$$

Pak lze rovnici (3) přepsat do tvaru:

$$\frac{dR}{R} = p\varepsilon + \varepsilon + 2\mu\varepsilon = (p + 1 + 2\mu)\varepsilon = k\varepsilon \quad (7)$$

Hodnota k uvedená v rovnici (7) je tzv. deformační součinitel (nebo také k -faktor) a v praxi se určuje experimentálně. Při výrobě se používají takové materiály, které mají hodnotu tohoto součinitele konstantní pro co nejširší spektrum deformací a ta bývá nejčastěji kolem $k \cong 2$.

Pro konečnou hodnotu změny odporu R lze rovnici (7) přepsat do tvaru:

$$\frac{\Delta R}{R} = k\varepsilon \quad (8)$$

3.1.3 Způsoby měření malých změn odporu tenzometrů

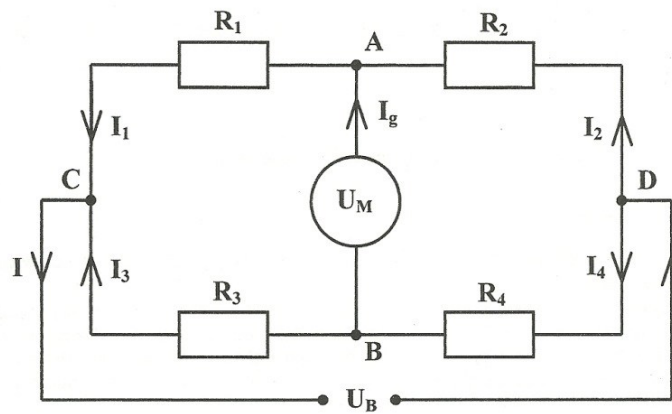
Při pružných deformacích je dosaženo poměrné deformace v rozsahu 10^{-6} až 10^{-3} , což znamená, že změna naměřeného odporu v případě tenzometru s nominálním odporem 120Ω bude dle rovnice (8):

$$\Delta R = Rk\varepsilon = 120 \cdot 2 \cdot (10^{-6} \div 10^{-3}) = 2,4(10^{-4} \div 10^{-1})\Omega \quad (9)$$

Měření takto malých odporových změn se v praxi provádí pomocí Wheatstonova můstku, viz obr. 13.

Při napájení můstku stejnosměrným proudem s konstantním napájecím napětím U_B jsou závislosti mezi proudem napětími a odpory dány Kirchhoffovými zákony:

$$\begin{aligned} -R_1 I_1 &+ R_3 I_3 &- R_g I_g &= 0 \\ -R_2 I_2 &+ R_4 I_4 + R_g I_g &&= 0 \\ &-R_3 I_3 - R_4 I_4 &&= -U_B \\ -I_1 &+ I_2 &&+ I_g = 0 \\ &-I_3 &+ I_4 &- I_g = 0 \end{aligned} \quad (10)$$



Obrázek 13 Zapojení odporů do Wheatstonova můstku [3]

Rovnice (10) jsou soustavou 5 rovnic o 5 neznámých proudech ve větvích můstku I_1 až I_4 a proud I_g , protékající měřicím galvanometrem s odporem R_g . Výslednou hodnotu proudu I_g zjistíme řešením rovnice (10) a to například pomocí determinantů:

$$I_g = \frac{U_B}{D_S} (R_1 R_4 - R_2 R_3) \quad (11)$$

Z rovnice (11) vyplývá, že pro vyvážený můstek, tedy nulovou hodnotu I_g musí platit:

$$R_1 R_4 = R_2 R_3 \quad (12)$$

V praxi je nejvhodnější, aby $R_1 = R_2$ a $R_3 = R_4$, popřípadě aby se všechny odpory ve větvích rovnaly. [5]

Tenzometry, zapojené do Wheatstonova můstku mohou a taky nemusí být deformovány v průběhu zatěžování tělesa, potom se deformované tenzometry označují jako aktivní a nedeformované tenzometry, nalepené zpravidla na nezatížené destičce z téhož materiálu jako měřená součást poblíž aktivních tenzometrů, se označují jako kompenzační. Pro měření odporových změn tenzometrů se používají 2 metody:

- a) nulová metoda (pro staticky působící síly)
- b) výchylková metoda (pro dynamicky působící síly)

3.1.4 Vliv provozních podmínek na tenzometrická měření

Na přesnost výsledků naměřených poměrných deformací tenzometrickou metodou mají vliv nejrůznější vnější faktory. Níže jsou uvedeny nejdůležitější z nich.

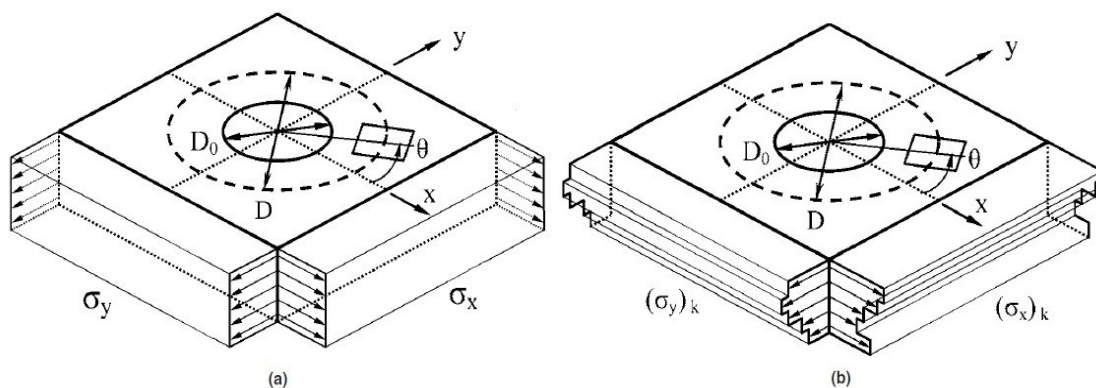
- a) Teplota a její změny v místech nalepení aktivních tenzometrů. Vliv teploty lze eliminovat několika způsoby. Jedním z nejpoužívanějších jsou samokompenzační tenzometry, které jsou vyrobené z materiálů s téměř nulovou poměrnou změnou odporu v celém rozsahu teplot, ve kterých měření probíhá. Další možností je přidání kompenzačních tenzometrů do měřicího můstku tak, aby došlo ke změně odporu pouze vlivem teplotní změny. Tyto tenzometry jsou shodné jako aktivní, avšak jsou nalepeny v místech s nulovou deformací. Poté bude výsledný signál, způsobený změnou teploty, nulový.
- b) Vlhkost může snížit izolační odpor tenzometrů vůči měřené součásti. Proto se vyrábějí tenzometry s ochrannou vrstvou proti vlhkosti nebo je nutné tyto tenzometry ošetřit zvláštní ochranou. V praxi by neměl u statických měření izolační odpor poklesnout pod $50M\Omega$.
- c) Hydrostatický tlak, který působí na aktivní tenzometr během měření, ovlivňuje hodnotu poměrných deformací a tím i napětí na povrchu měřené součásti. Naměřené hodnoty je potom třeba zkorigovat o jistou hodnotu.
- d) Poloměry zaoblení křivých ploch, na které se lepí tenzometry, mohou také ovlivnit výsledky. U každého tenzometru se udává minimální poloměr, na který se může nalepit, aniž by došlo k ovlivnění výsledků. V jiném případě se musí vyrobit speciální tenzometr, který bude již předem vytvarován.
- e) Radioaktivní záření prudce snižuje izolační odpor snímačů a způsobuje změnu odporu jejich vinutí, proto měření v tomto prostředí musí být pouze krátkodobá.
- f) Cyklické zatěžování vede k porušení tenzometrů obdobně jako tomu je i u běžných materiálů. To se projeví jako počáteční posun nulového bodu na začátku zatěžování. [5]

4. ODVRTÁVACÍ METODA

Jak už bylo uvedeno v úvodu, odvrtávací metoda je polodestruktivní, praktická, poměrně levná a široce používaná metoda pro řešení residuálních napětí v blízkosti povrchu materiálu. Tato metoda není omezena pouze na řešení napětí u ocelí, ale má široké uplatnění i u dalších druhů materiálu jako jsou plasty, kompozity apod.

Princip této metody spočívá v nalepení speciální tenzometrické růžice pro měření zbytkových napětí na předem zvolené místo součásti a jeho následné odvrtávání po krocích daných normou, kdy s každým odvrtaným krokem se zapisují uvolněné deformace, které vznikají vlivem narušení rovnovážného stavu součásti. Takto naměřené deformace vznikají v důsledku uvolnění napětí působícího na hranici odvrtané díry a zároveň na ně již nemá žádný vliv napětí působící za hranicí této díry. Je vhodné si také uvědomit, že množství uvolněného napětí rapidně klesá se vzdáleností od hrany vyvrtané díry, proto dosahují hodnoty deformací naměřených pomocí tenzometrů zpravidla od 25% do 40% skutečného zbytkového napětí působícího v místě odvrtané díry. [8]

Celou problematikou této metody se zabývá americká norma ASTM E837-13a a je v ní uveden postup pro měření a vyhodnocení jak lineárních, tak i nelineárních napětí (obr. 14) po tloušťce jak tenkých, tak i tzv. tlustých součástí. Dle této normy lze získat dostatečně přesné výsledky v případě, že zbytková napětí nepřekročí hranici 80% meze kluzu u tenkých materiálů a hranici 50% meze kluzu u materiálů „tlustých“. Za mezní hodnotu, po kterou lze považovat součást za tenkou, se udává tloušťka do $0,2D$ pro růžice typu A a B a $0,24D$ pro růžici typu C, kde hodnota D odpovídá střednímu průměru růžice. V případě tlustých součástí musí být tato hodnota aspoň rovna průměru D pro růžice A a B a $1,2D$ pro typ C.



Obrázek 14 Příklad homogenního (a) a nehomogenního (b) rozložení napětí po tloušťce materiálu [7]

4.1 Volba měřeného místa

Místo by mělo být vybráno tak, aby k němu byl umožněn dostatečný přístup jak s měřicí aparaturou, tak i se samotným vrtacím zařízením.

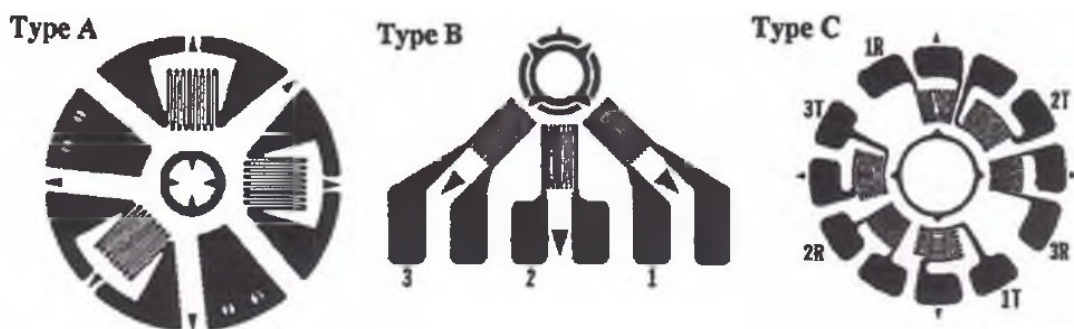
V ideálním případě by součást měla být rovná a díra by měla být v dostatečné vzdálenosti od hran, zaoblení apod. V praxi je ovšem většinou potřeba měření provádět v blízkosti různých ovlivňujících faktorů jako díry, přechody, hrany apod. V těchto případech je třeba získaná data prezentovat s opatrností, i přesto však mohou tyto data podat věrohodné výsledky. V nejhorších případech lze odchylky od ideálního stavu dopočítat metodou konečných prvků, kdy se dopočítají kalibrační koeficienty dle daného užití.

4.2 Tenzometrické růžice

Výběr správného typu tenzometrické růžice je velice důležitý, neboť správná volba délky mřížky tenzometru, popřípadě vhodná volba typu tenzometrické růžice povede k získání přesnějších hodnot uvolněných deformací. Nejznámější a největší firmy, které se specializují na vývoj a výrobu tenzometrů nejrůznějších velikostí a tvarů, jsou firmy Vishay Measurement Group a HBM.

4.2.1 Volba typu růžice

Všechny komerčně dostupné růžice pro měření zbytkových napětí jsou vybaveny středící značkou pro přesné navedení vrtacího nástroje. Dle normy ASTM E837-13a jsou používány 3 základní typy růžic, viz obr. 15.



Obrázek 15 Tvary používaných růžic [7]

Typ A – tento typ tenzometrů má 3 mřížky rozložené do 2 kvadrantů, mají univerzální využití a jsou dodávány v různých velikostech. Poprvé tento tenzometr představil Rendler a Vigness.

Typ B – má všechny 3 mřížky v jednom kvadrantu a jsou navrženy tak, aby je bylo možné nalepit co nejblíže překážkám jako koutovým svarům, rohům a zaoblením.

Typ C – se využívá tam, kde je kladen požadavek na vysokou citlivost měření a také vysokou teplotní stabilitu. Tyto tenzometry se skládají z 6 mřížek tvořících 3 páry, jelikož jsou vždy do půlmůstku zapojeny naproti sobě umístěné radiální a tečné tenzometry měřící v jednotlivých směrech (například 1R s 1T, 2R s 2T atd.). Tento typ růžice má oproti typům A a B vyšší citlivost zhruba o 70 až 140%. Nevýhodou je hlavně vyšší pořizovací cena, omezená dostupnost a výrazně delší čas potřebný k přípravě a zapojení takovéto růžice. Samozřejmostí je vybavení potřebné k připojení 6 prvkové růžice, která se zapojuje do 3 měřících kanálů.

4.2.2 Volba velikosti růžice

Volba velikosti použité růžice je závislá na několika faktorech:

- dle velikosti prostoru, na který se bude tenzometr lepit (tzn. vzdálenost od krajů, svarů apod.)
- dle hloubky, ve které se bude řešit zbytkové napětí, neboť větší růžice lépe vyhodnocují napětí ve větších hloubkách, naopak menší růžice jsou vhodnější pro řešení v hloubkách blízkých povrchu
- povolenému poškození, aby nedošlo k znehodnocení měřené součásti

Nejčastěji používané délky měřících mřížek mají v průměru 1,5 - 1,57mm. Takto dlouhé mřížky jsou nejpřesnější pro měření zbytkových napětí do hloubky přibližně 1mm. Nejběžnější rozměry používaných růžic jsou uvedeny na obrázku 16.

Důležité je také to, že menší rozměry tenzometrických mřížek jsou oproti

větším daleko náchylnější na vnesení chyby do měření (vrtáním mimo střed mřížky nebo

Rosette Type	D	GL ^B	GW ^B	R ₁ ^B	R ₂ ^B
Type A					
Conceptual	D	0.309D	0.309D	0.3455D	0.6545D
1/32 in. nominal	0.101 (2.57)	0.031 (0.79)	0.031 (0.79)	0.035 (0.89)	0.066 (1.68)
1/16 in. nominal	0.202 (5.13)	0.062 (1.59)	0.062 (1.59)	0.070 (1.77)	0.132 (3.36)
1/8 in. nominal	0.404 (10.26)	0.125 (3.18)	0.125 (3.18)	0.140 (3.54)	0.264 (6.72)
Type B					
Conceptual	D	0.309D	0.223D	0.3455D	0.6545D
1/16 in. nominal	0.202 (5.13)	0.062 (1.59)	0.045 (1.14)	0.070 (1.77)	0.132 (3.36)
Type C					
Conceptual	D	0.176D	30° sector	0.412D	0.588D



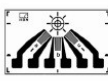
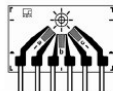







Obrázek 16 Nejběžnější používané rozměry růžic [7]

špatnou kontrolou vrtané hloubky). Naopak nevýhodou větších mřížek je nutnost použití větších vrtáku a s tím související větší úběr materiálu, kterým se do měření opět může vnést přídatné napětí. [8]

4.2.3 Zbylé faktory ovlivňující výběr růžice

Poslední faktory, které rozhodují o volbě použité růžice, jsou:

- čas potřebný pro instalaci a připojení k aparatuře
- teplotní kompenzace
- snadná obsluha při měření
- dostupnost
- cena

Gauge Pattern	Designation	Manufacturer	ASTM E837 Type	Resistance (Ω)	Nominal Gauge Factor	Grid Length (mm)	Grid Ctr Line Dia. (mm)	Min. dia. hole - dmin (mm)	Max. dia. hole - dmax (mm)	Carrier Length (mm)	Carrier Width (mm)	dmin/D	dmax/D	d/D
	1-RY61-1,5/120S	HBM	Type A (CCW)	120	1.94	1.5	5.1	1.5	2.2	10.2	10.2	0.29	0.43	
	1-RY61-1,5/120K	HBM	Type B (CCW)	120	1.93	1.5	5.1	1.5	2.2	10.2	5.2	0.29	0.43	
	1-RY61-1,5/120R	HBM	Type B (CCW)	120	1.93	1.5	5.1	1.5	2.2	10.2	5.2	0.29	0.43	
	K-RY61-1,5/120R (with pre-attached leads)	HBM	Type B (CCW)	120	1.93	1.5	5.1	1.5	2.2	10.2	5.2	0.29	0.43	
	1-VY61-1,5/120S	HBM		120	1.93	1.5	5.1	1.5	2.2	10.2	5.2	0.29	0.43	
	H2K-XX-030 RR	Vishay - Measurement Group	Type C (CW)	350		0.75	4.32	2.3	2.6	9.4	9.4			0.53
	EA-XX-031 RE	Vishay - Measurement Group	Type A (CW)	120	2.01	0.75	2.56	0.8	1	7.4	7.4			0.31
	EA-XX-062 RE	Vishay - Measurement Group	Type A (CW)	120	2.08	1.57	5.13	1.5	2	10.7	10.7			0.29
	CEA-XX-062 UL	Vishay - Measurement Group	Type A (CW)	120	2.05	1.57	5.13	1.5	2	12.7	11.7			0.29
	CEA-XX-062 UM	Vishay - Measurement Group	Type B (CW)	120	2.05	1.57	5.13	1.5	2	10.7	10.7			0.29
	EA-XX-125 RE	Vishay - Measurement Group	Type A (CW)	120	2.05	3.18	10.26	3	4.1	19.8	19.8			0.29

Obrázek 17 Přehled nejpoužívanějších tenzometrů pro měření zbytkových napětí [8]

Přehled nejdostupnějších a nejpoužívanějších tenzometrických růžic pro měření zbytkových napětí je uveden na obrázku 17. [8] [10]

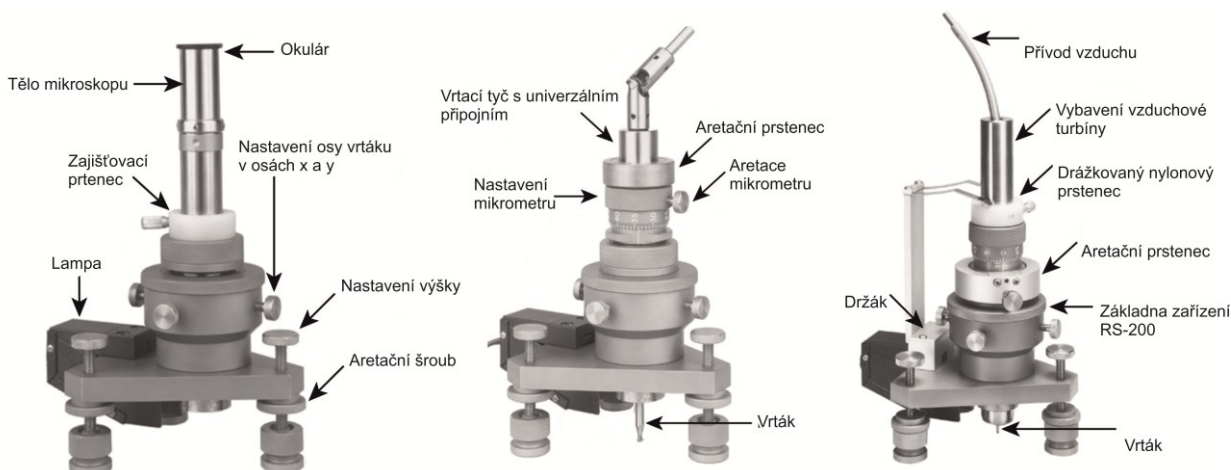
4.3 Odvrtávací zařízení

Pro získání co nejlepších výsledků je nutné, aby vrtání proběhlo co možná nejpřesněji ve středu tenzometrické růžice. K tomuto účelu je nutné použít speciální vrtací zařízení, které zajistí kvalitní spojení s vrtaným podkladem, jeho přesné vycentrování do středu růžice a zároveň co nepřesnější krokové odvrtání samotné díry.

Tato zařízení jsou sestavena tak, že pomocí mikroskopu s měřícím křížem se seřizuje osa vrtáku se středem tenzometrické růžice. Tyto mikroskopy jsou dle typu zařízení umístěna buď na pevno (u zařízení MTS 3000 firmy SINT Technology), kdy se pod něj po odměření umístí samotná vrtací hlavička, nebo jsou tyto mikroskopy pouze nasunuty do těla zařízení a po přesném odměření polohy se mikroskop nahradí vrtací hlavičkou (zařízení RS-200 firmy VISHAY Precision Group).

Dle normy ASTM E837-13a by rozdíl mezi osou vrtáku a středem tenzometrické růžice neměl překročit hodnotu $\pm 0,004$ násobku průměru tenzometrické růžice.

4.3.1 Zařízení RS-200 firmy Vishay



Obrázek 18 Zařízení RS-200 měření, nízkootáčkové vrtání a vysokootáčkové vrtání [9]

Vrtací zařízení RS-200 firmy Vishay se řadí mezi nejběžněji používané a byl použit i při samotném měření této diplomové práce. Na obrázku 18 je uvedeno několik způsobů použití tohoto zařízení.

Správnou polohu zařízení zajišťují 3 nožky umístěné v otočných čepích, což zaručuje stabilitu i na nerovném povrchu.

Dle technického listu je přesnost vycentrování vrtáku vůči růžici v řádech několika setin milimetru. Zároveň je možné použít tento mikroskop pro přesné měření průměru díry po odvrtání.

Základna RS-200 je uzpůsobena pro vložení vysokootáčkové vzduchové vrtačky, která je obecně vhodná pro měření ve většině materiálů a v případě tvrdších materiálu je tato metoda dokonce požadována. Do základny se může vložit i aparatura pro odvrtávání nízkootáčkové, která se používá v případě měkkých ocelí, popřípadě hliníkových slitin.[9]

4.3.2 Zařízení MTS 3000 firmy SINT Technology

Konkurenčním výrobkem k zařízení firmy Vishay je zařízení MTS 3000 firmy SINT Technology (obr. 19), který do České republiky dodává firma HBM.

Oproti modelu RS-200 je toto zařízení technicky poněkud vyspělejší, ale zároveň příprava takového měření je zdouhavější, neboť frézku je možné pohánět pouze tlakem vzduchu, což znamená nutnost připojení dalších zařízení jako je kompresor, vedení apod. Takováto rozměrná soustava přináší jisté komplikace hlavně v případech, kdy se měří zbytková napětí přímo v provozu.



Obrázek 19 Zařízení MTS 3000

Středící mikroskop je zde umístěn na pevno k tělu zařízení. Po vystředění zařízení do středu tenzometrické růžice pomocí mikroskopu se vloží přímo pod mikroskop vzduchová turbína s frézku. Takto sestavená konstrukce do značné míry eliminuje vznik nepřesností vlivem excentricity díry vůči růžici.[8]

4.3.3 Výběr průměru díry

V praxi je doporučeno, aby minimální mezera mezi okrajem díry a tenzometrem byla 0,30mm. Zároveň se také uvádí, že minimální průměr díry by měl dosahovat 60% maximálně dovoleného průměru, viz obr. 20, kde jsou uvedeny i doporučené hodnoty průměrů otvorů v případě měření lineárního i nelineárního rozložení napětí po hloubce materiálu a zároveň jsou uvedeny i hraniční hodnoty mezi tenkými a tlustými materiály.

Rosette Type	D	Max. thickness of a "Thin" workpiece	Min. thickness of a "Thick" workpiece	Uniform Stresses			Non-Uniform Stresses		
				Min. hole diameter	Max. hole diameter	Practical depth steps ^a	Min. hole diameter	Max. hole diameter	Practical depth steps ^a
Type A									
Conceptual	D	0.2 D	D	0.6 Max D ₀	Max D ₀	0.02 D	Min D ₀	Max D ₀	0.01 D
1/2 in. nominal	0.101 (2.57)	0.020 (0.51)	0.101 (2.57)	0.024 (0.61)	0.040 (1.01)	0.002 (0.05)	0.037 (0.93)	0.040 (1.00)	0.001 (0.025)
1/16 in. nominal	0.202 (5.13)	0.040 (1.03)	0.202 (5.13)	0.060 (1.52)	0.100 (2.54)	0.004 (0.10)	0.075 (1.88)	0.085 (2.12)	0.002 (0.05)
1/8 in. nominal	0.404 (10.26)	0.081 (2.06)	0.404 (10.26)	0.132 (3.35)	0.220 (5.59)	0.008 (0.20)	0.150 (3.75)	0.170 (4.25)	0.004 (0.10)
Type B									
Conceptual	D	0.2 D	D	0.6 Max D ₀	Max D ₀	0.02 D	Min D ₀	Max D ₀	0.01 D
1/16 in. nominal	0.202 (5.13)	0.040 (1.03)	0.202 (5.13)	0.060 (1.52)	0.100 (2.54)	0.004 (0.10)	0.075 (1.88)	0.085 (2.12)	0.002 (0.05)
Type C									
Conceptual	D	0.24 D	1.2D	0.6 Max D ₀	Max D ₀	0.024 D	Min D ₀	Max D ₀	0.012 D
1/16 in. nominal	0.170 (4.32)	0.041 (1.04)	0.204 (5.18)	0.060 (1.52)	0.100 (2.54)	0.004 (0.10)	0.075 (1.88)	0.085 (2.12)	0.002 (0.05)

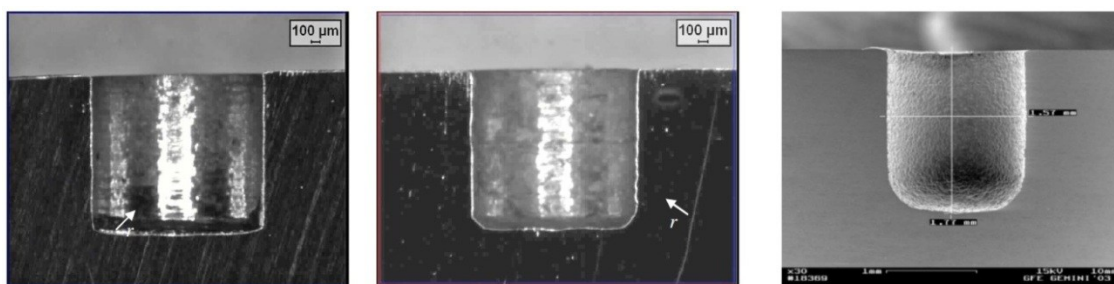
Obrázek 20 Doporučené průměry otvorů pro nejběžnější typy tenzometrů dle ASTM E837-13a [7]

Pro nejběžnější délky mřížek v rozmezí od 1,50 - 1,57mm se používají frézy o průměrech 1,6 - 2mm. V případě použití excentrického obrábění je průměr díry výrazně větší než průměr frézy.

Obecně platí, že pro vyšší citlivost metody je nevhodnější co největší průměr díry.

4.3.4 Vliv poloměru zaoblení dna na měřená data

Poloměr zaoblení na dně vytvořené díry se může lišit dle použité vrtací metody a posléze i druhu použité frézy od 4% - 30% průměru díry D_0 . Velikost těchto zaoblení má vliv na výsledná odměřená zbytková napětí.



Obrázek 21 Poloměry zaoblení dna dle použité metody obrábění [8]

Na obrázku 21 lze vidět srovnání několika použitých metod obrábění, kdy dva obrázky zleva byly vytvořeny vysokootáčkovým vrtáním pomocí kuželové frézy z tvrdokovu a obrázek napravo byl vytvořen obráběním pomocí elektrického výboje.

Z experimentů bylo zjištěno, že v případě kdy je poloměr zaoblení zhruba 0,1 násobek poloměru díry D_0 , bude maximální odchylka naměřených deformací do 5%. V případě, kdy bude poloměr zaoblení kolem 0,3 násobku D_0 , vzroste odchylka více než na 20%. [8]

4.3.5 Detekce nulové hloubky

Jelikož se při postupném odvrtávání dle normy ASTM E837-13a odstraňuje vrstva materiálu o tloušťce pouhých 0,05mm, je důležité, aby byla správně stanovena nulová hloubka, kdy je fréza v kontaktu s povrchem měřené součásti, avšak nedochází k žádnému úběru materiálu. Ještě před samotným kontaktem s povrchem součásti je nutné profrézovat ochrannou vrstvu tenzometrické mřížky.

Chyby, které vznikají při nastavování nulové hloubky, jsou:

- určení doteku v případě materiálu s drsným povrchem
- kontakt pouze na jedné straně frézy z důvodu nesprávně nastavené kolmosti k vrtanému povrchu
- vytvoření tzv. kruhové drážky při použití frézy s konkávním tvarem
- nepřesnosti způsobené axiální vůlí ložisek vrtací hlavice
- chyby způsobené při vrtání skrz vrstvu tenzometru

Nejpoužívanější způsoby pro detekci nulové hloubky jsou pomocí elektrického kontaktu nebo pomocí pozorování.

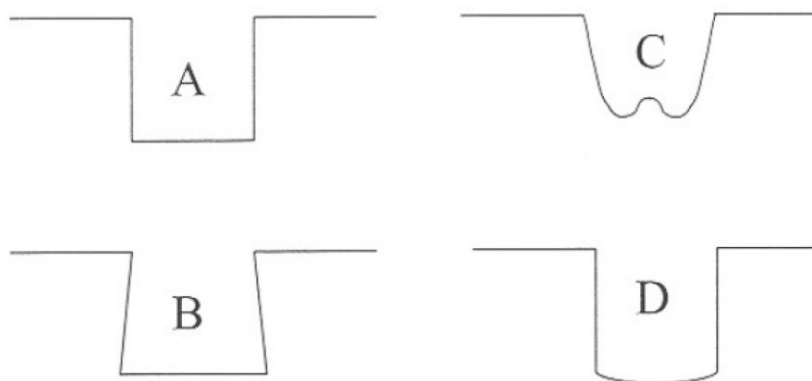
4.3.6 Způsoby odvrtávání otvorů

Při volbě způsobu odvrtávání jsou důležité 2 faktory:

- zavádění přídavných zbytkových napětí vlivem samotného odvrtávání
- schopnost použité metody vytvořit co nejlepší geometricky přesný otvor, kdy je požadována válcová díra s plochým dnem

Základní způsoby odvrtávání otvorů tedy jsou:

- 1) vysokootáčkové vrtání
- 2) nízkootáčkové vrtání
- 3) hloubení pomocí abraziva
- 4) elektro-chemické obrábění
- 5) vysokootáčkové excentrické obrábění



Obrázek 22 Tvary otvorů podle použité metody A – vysokootáčkové hloubení B – nízkootáčkové hloubení C – hloubení s abrazivem D – elektro – chemické obrábění [8]

Vysokootáčkové hloubení

K tomuto typu odvrtávání se používá speciální pneumatické vrtací zařízení, neboť výstupní otáčky jsou vyšší než 400 000 ot/min. Typickým nástrojem pro takovát obrábění je kuželová fréza z tvrdokovu, která je schopna vytvořit přesnou válcovou díru s plochým dnem (viz obr. 22-A).

Tento způsob obrábění je vhodný pro většinu materiálů a výhodou je i to, že zbytková napětí vnesená do součásti samotným hloubením jsou minimální.

Odvrtávání při středních otáčkách

V případech, kdy není možné použít pneumatickou vrtačku, lze použít vysokootáčkovou elektrickou vrtačku, která by pro získání použitelných výsledků měla točit 14 000 – 40 000 ot/min.

Nízkootáčkové hloubení

Tato metoda se řadí mezi první techniky používané pro měření zbytkových napětí, avšak kvůli vnášení vysokých přídavných napětí se tato metoda dnes již jeví jako nevhodná.

Hloubení pomocí abraziva

Hloubení díry se provádí pomocí trysky malého průměru, ze které pod vysokým tlakem proudí vzduch s obsahem abrazivního prachu. Tímto dochází k rychlému vytvoření díry.

Takto vytvořený otvor je velice nepravidelný a přesnost vytvořeného průměru a hloubky díry je také velice přibližná (viz obr. 22-C). Obecně není tato metoda vhodná pro méně tvrdé materiály a materiály s nelineárním rozložením napětí po hloubce.

Elektro - chemické hloubení

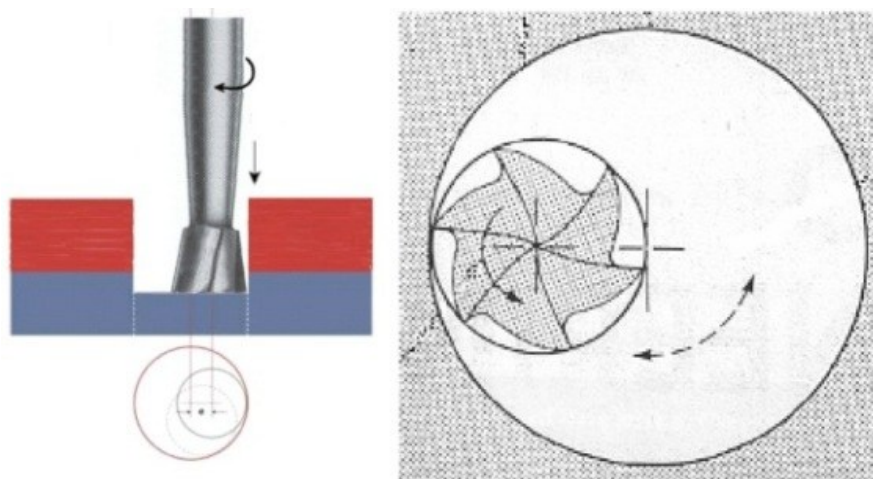
Tato metoda je založena na principu obrábění elektrickým výbojem a elektrochemického obrábění.

Takto vytvořená díra je do jisté míry vhodná pro měření zbytkových napětí i přesto, že dno vytvořené díry je lehce vyduté (viz obr. 22-D). Avšak právě kvůli této nepřesnosti je nutné brát výsledky s jistou rezervou, neboť i takto obrobené dno může mít vliv na naměřené hodnoty.

Nevýhodou je možnost použití pouze pro elektricky vodivé materiály, které se obrábí vlivem elektrického výboje za přítomnosti chemických látek. Vlivem těchto látek může docházet i k poškození tenzometrických mřížek. Tyto nevýhody brání širšímu používání a vývoji této metody.

Vysokootáčkové excentrické obrábění

Při obrábění vysoce tvrdých materiálů jako pružinové a ložiskové ocele apod. je vysoce účinná metoda excentrického hloubení. Při excentrickém obrábění je oddělení materiálu jednodušší a více efektivní a zároveň je možné vytvářet větší průměry otvorů, viz obr. 23. [8]



Obrázek 23 Excentrické obrábění [8]

5. ROZBOR PROBLÉMU

Cílem této diplomové práce je zhodnotit přesnost používaných metod pro řešení velikostí residuálních napětí. Jako referenční budou brána napětí získaná z kalibračních koeficientů uvedených v normě ASTM E837-13a jak pro lineární, tak pro nelineární rozložení napětí po průřezu. Poté se sestrojí numerický model, se kterým se výsledky z normy ASTM budou srovnávat, posledním krokem bude pomocí tohoto numerického modelu stanovení nových kalibračních konstant pro každou různici zvlášť a celkové srovnání všech získaných údajů a jejich použitelnost v technické praxi.



Obrázek 24 Zkoušený nosník stejné pevnosti

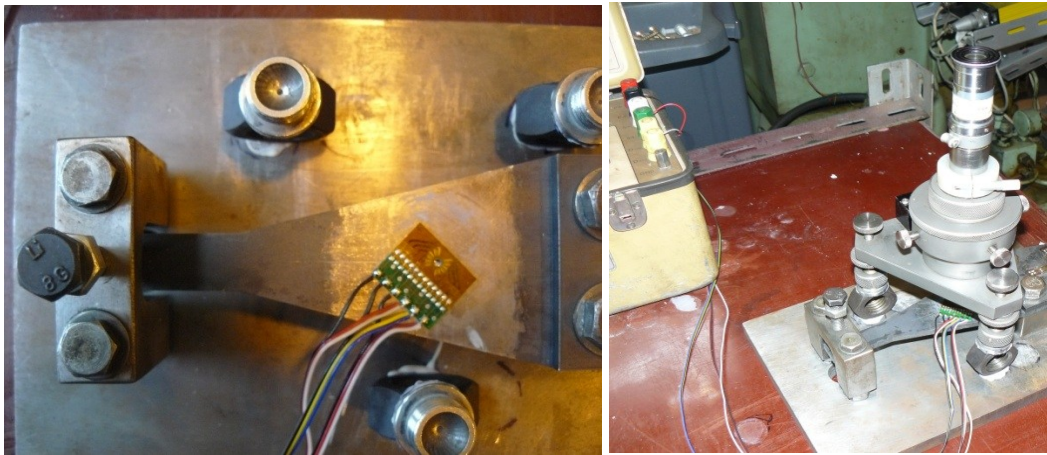
Jako testovaná součást byl zvolený 5mm tlustý válcovaný plech, který byl obroben do takového tvaru, aby při působení ohybového napětí bylo na celé jeho ploše v jednotlivých vrstvách vždy stejné ohybové napětí, tzv. nosník stejné pevnosti, viz obr. 24. Tento plech se před samotným měřením důkladně vyžíhal a to z důvodu zajištění co nejmenších zbytkových napětí, které by mohly ovlivnit naměřené výsledky a znemožnit tak další ověřovací výpočty.

Celý experiment proběhl ve speciálním upínacím nástroji, který simuloval čistý ohyb vetknutého nosníku.

Následný numerický model byl vytvořen v programu MSC Patran 2012.2 a jako řešič byl použit program MSC Nastran 2012.2.

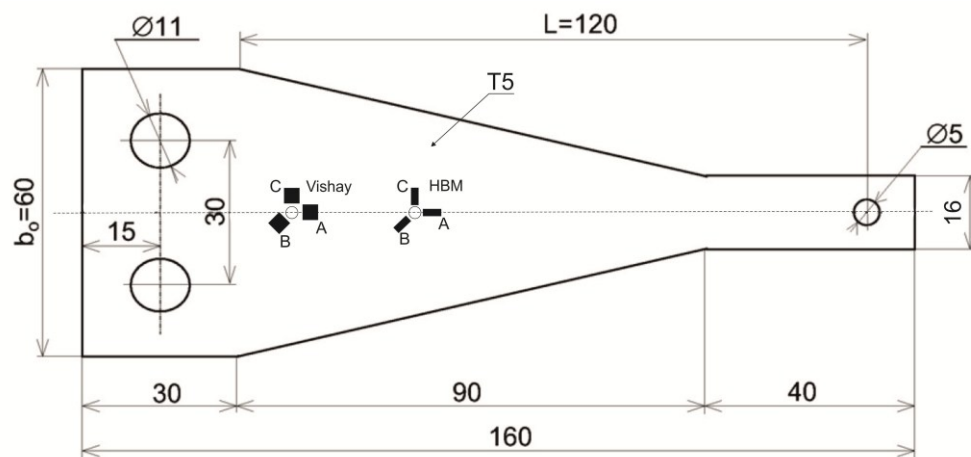
Detailně popsány postup experimentu, jakožto i postup tvorby numerického modelu je popsán v samostatných kapitolách.

6. EXPERIMENT



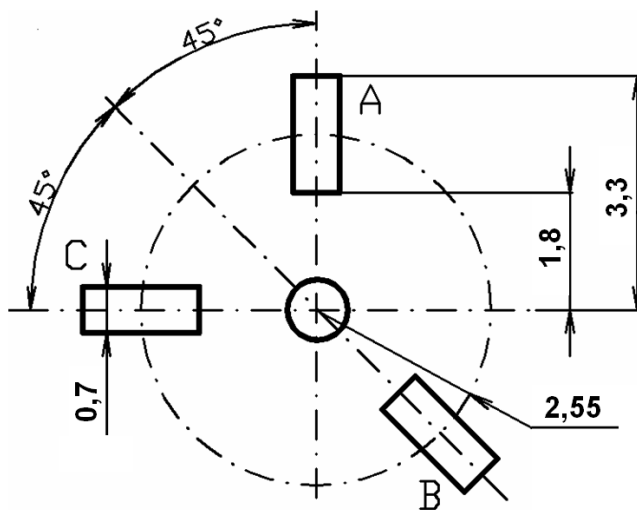
Obrázek 25 Způsob uložení nosníku a vrtacího zařízení

Na obrázku 25 je vidět způsob, jakým byl měřený nosník stejné pevnosti uložen v testovacím rámu, který simuloval zatížení nosníku ohybovým napětím a to pomocí stavěcího šroubu, který tlačil na kuličku vloženou do 5mm otvoru v nosníku, viz obr. 26, kde jsou uvedeny i jednotlivé rozměry nosníku.



Obrázek 26 Měřený nosník stejné pevnosti

Ve vzdálenosti 62,5mm od levého okraje byla nalepena tenzometrická růžice typu RY61-S firmy HBM, jejíž rozměry jsou uvedeny na obrázku 27 a ve vzdálenosti 39,5mm od levého okraje byla přilepena růžice EA-062 RE firmy Vishay (viz obr. 29).



Obrázek 27 Rozměry růžice RY61-S firmy HBM

Pro samotné odvrtávání bylo použito zařízení RS-200 firmy Vishay, kdy byla po krocích 0,1mm odvrtávána díra průměru 1,93mm až do hloubky zhruba 1mm.

Po přípravě a sestavení celého experimentu došlo k zatěžování vetknutého nosníku ohybem pomocí šroubu do doby, dokud na výstupu tenzometrů A (viz obrázek 26), nebyla naměřena hodnota $476\mu\text{S}$, což odpovídá povrchovému napětí o velikosti 100MPa.

V té chvíli došlo k vynulování naměřených dat a přistoupilo se k samotnému odvrtávání díry. Po každém odvrtaném kroku se postupně odečítaly hodnoty naměřených uvolněných deformací na jednotlivých tenzometrech, které se zapisovaly do tabulky. Tento postup se opakoval pro obě dvě tenzometrické růžice.



Obrázek 28 Celá měřicí souprava

Soupis použitého zařízení, viz obr. 28:

- Vrtací zařízení RS-200 firmy Vishay
- Tenzometr RY61-S firmy HBM (obr. 27 a 29)
- Tenzometr EA-062 RE firmy Vishay (obr. 29)

- 3x Indikátor deformací P-3500 firmy Vishay
- Sestava pro simulaci ohybového zatížení



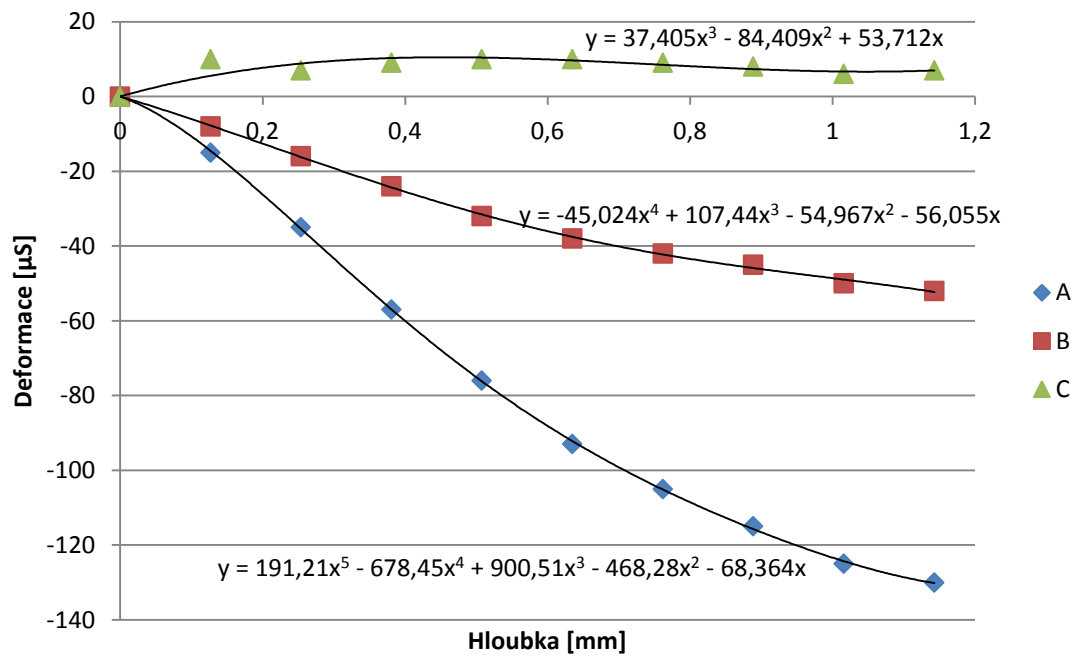
Obrázek 29 Detail použitých růžic, nalevo Vishay, napravo HBM

Tabulka naměřených hodnot:

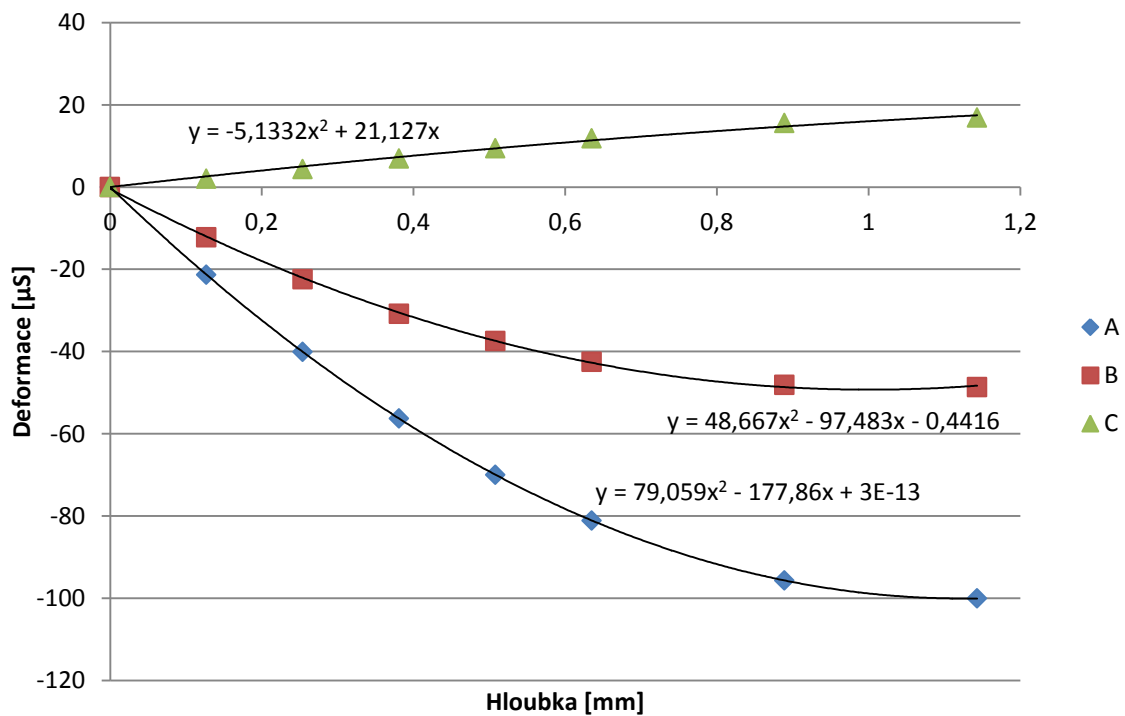
Hloubka [mm]	HBM			Vishay		
	A (ϵ_1) [μS]	B (ϵ_2) [μS]	C (ϵ_3) [μS]	A (ϵ_1) [μS]	B (ϵ_2) [μS]	C (ϵ_3) [μS]
0	0	0	0	0	0	0
0,127	-15	-8	10	-21	-12	2
0,254	-35	-16	7	-40	-22	4
0,381	-57	-24	9	-56	-31	7
0,508	-76	-32	10	-70	-37	9
0,635	-93	-38	10	-81	-42	12
0,762	-105	-42	9	-90	-45	13
0,889	-115	-45	8	-96	-48	15
1,016	-125	-50	6	-98	-48	16
1,143	-130	-52	7	-100	-49	17

Tabulka 2 Naměřená data z experimentu

Jelikož naměřená data v tabulce 2 po jednotlivých přírůstcích neodpovídají normovaným přírůstkům dle normy ASTM, bylo nutné proložit získané body polynomickou funkcí, která se následně přepočítala na normované přírůstky.



Obrázek 30 Proložení dat pro různici HBM



Obrázek 31 Proložení dat pro různici Vishay

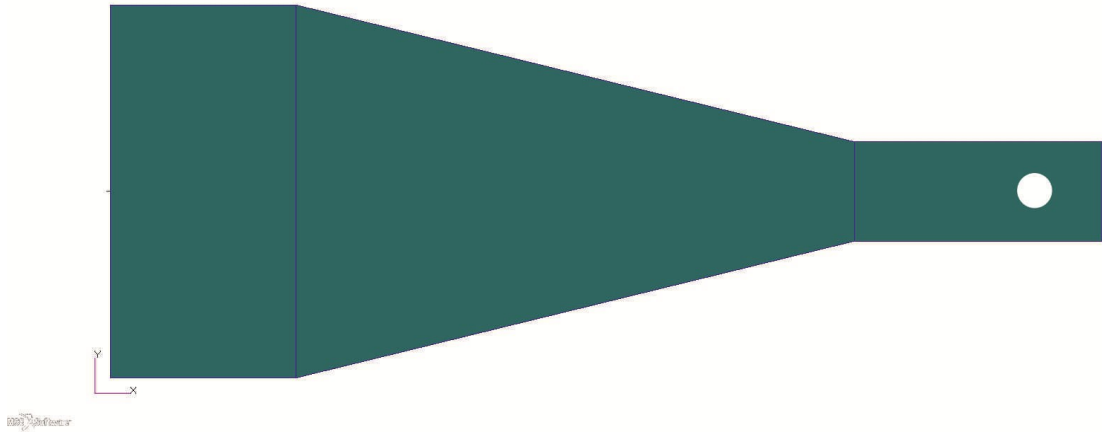
Poté již bylo možné přepsat výsledky pro normované přírůstky 0,05mm do tabulky.

Hloubka [mm]	Vishay			HBM		
	A (ϵ_1) [μS]	B (ϵ_2) [μS]	C (ϵ_3) [μS]	A (ϵ_1) [μS]	B (ϵ_2) [μS]	C (ϵ_3) [μS]
0	0	0	0	0	0	0
0,05	-8,69535	-5,19408	1,043517	-5,77031	-3,34256	1,713124
0,10	-16,9954	-9,70323	2,061368	-12,3733	-6,65837	3,242319
0,15	-24,9002	-13,969	3,053553	-19,5944	-9,93234	4,595273
0,20	-32,4096	-17,9915	4,020072	-27,2423	-13,1504	5,779672
0,25	-39,5238	-21,7707	4,960925	-35,1476	-16,2993	6,803203
0,30	-46,2427	-25,3065	5,876112	-43,1618	-19,3671	7,673553
0,35	-52,5663	-28,5989	6,765633	-51,1562	-22,3426	8,398408
0,40	-58,4946	-31,648	7,629488	-59,0206	-25,2157	8,985456
0,45	-64,0276	-34,4538	8,467677	-66,6626	-27,9773	9,442383
0,50	-69,1652	-37,0163	9,2802	-74,0062	-30,6193	9,776875
0,55	-73,9077	-39,3354	10,06706	-80,9907	-33,1345	9,99662
0,60	-78,2548	-41,4112	10,82825	-87,5696	-35,5167	10,1093
0,65	-82,2066	-43,2437	11,56377	-93,7099	-37,7609	10,12261
0,70	-85,7631	-44,8328	12,27363	-99,3902	-39,863	10,04424
0,75	-88,9243	-46,1786	12,95783	-104,6	-41,8197	9,881859
0,80	-91,6902	-47,281	13,61635	-109,34	-43,6289	9,643168
0,85	-94,0609	-48,1401	14,24921	-113,617	-45,2895	9,33585
0,90	-96,0362	-48,7559	14,85641	-117,449	-46,8013	8,967591
0,95	-97,6163	-49,1283	15,43794	-120,856	-48,1651	8,546079
1,00	-98,801	-49,2574	15,9938	-123,868	-49,3829	8,079

Tabulka 3 Naměřené hodnoty pro normované přírůstky

7. NUMERICKÉ VÝPOČTY

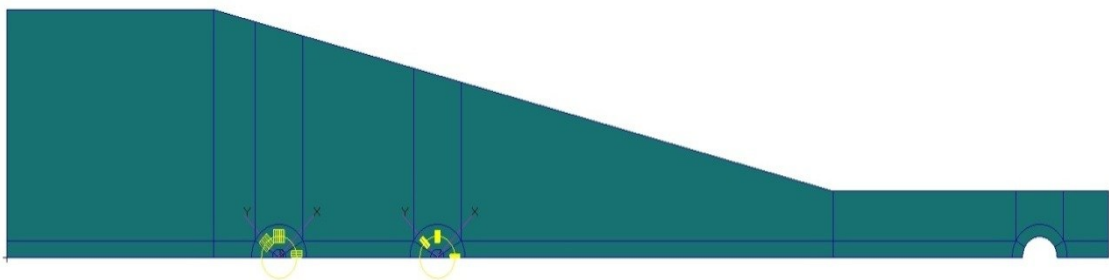
Prvním krokem bylo sestavení celého geometrického modelu dle rozměrů uvedených na obrázku 26.



Obrázek 32 Vytvořený geometrický model

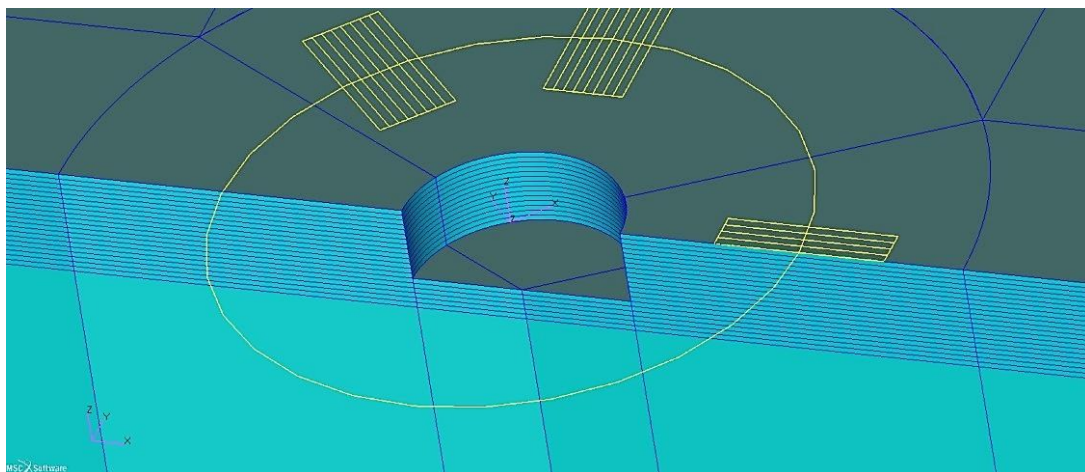
Na obrázku 32 lze vidět, že zkoušený model má jednu osu symetrie, proto byl výpočet proveden pouze pro jednu polovinu modelu, čímž se částečně ulehčila výpočtová náročnost. Zároveň byl model nařezán tak, aby bylo možné vytvořit co nejkvalitnější síť s elementy typu Hex, viz obr. 33.

Na obrázku 34 je vidět detail tenzometrické růžice HBM a jednotlivé nařezání modelu po přírůstcích 0,05mm.



Obrázek 33 Geometrie připravená na síťování

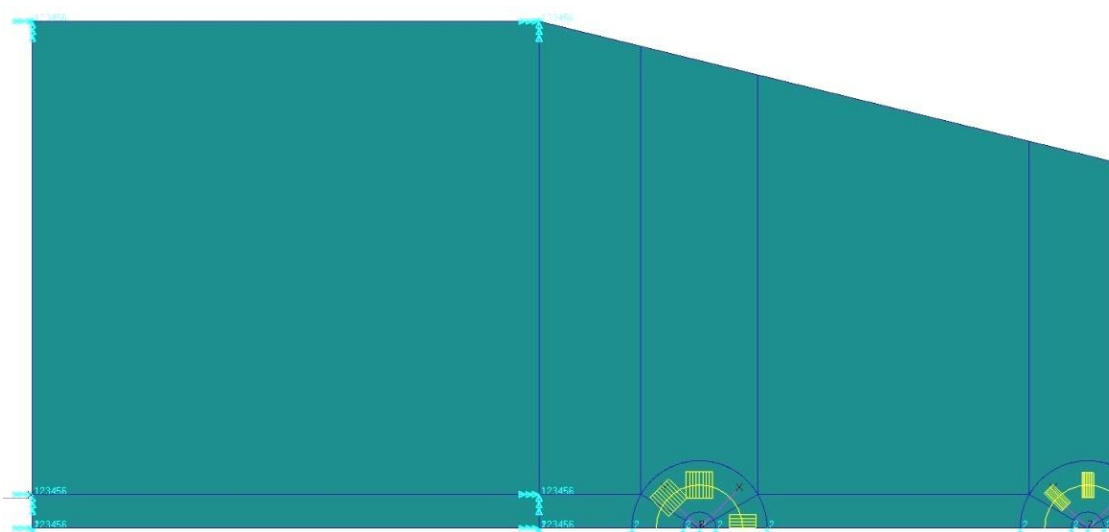
Celkově bylo vytvořeno 21 výpočtů od hloubky 0mm až po hloubku 1mm s přírůstkem po 0,05mm, které doporučuje norma ASTM E837-13a.



Obrázek 34 Detail nařezané geometrie pro přírůsteky 0,05mm, zde pro hloubku 0,7mm

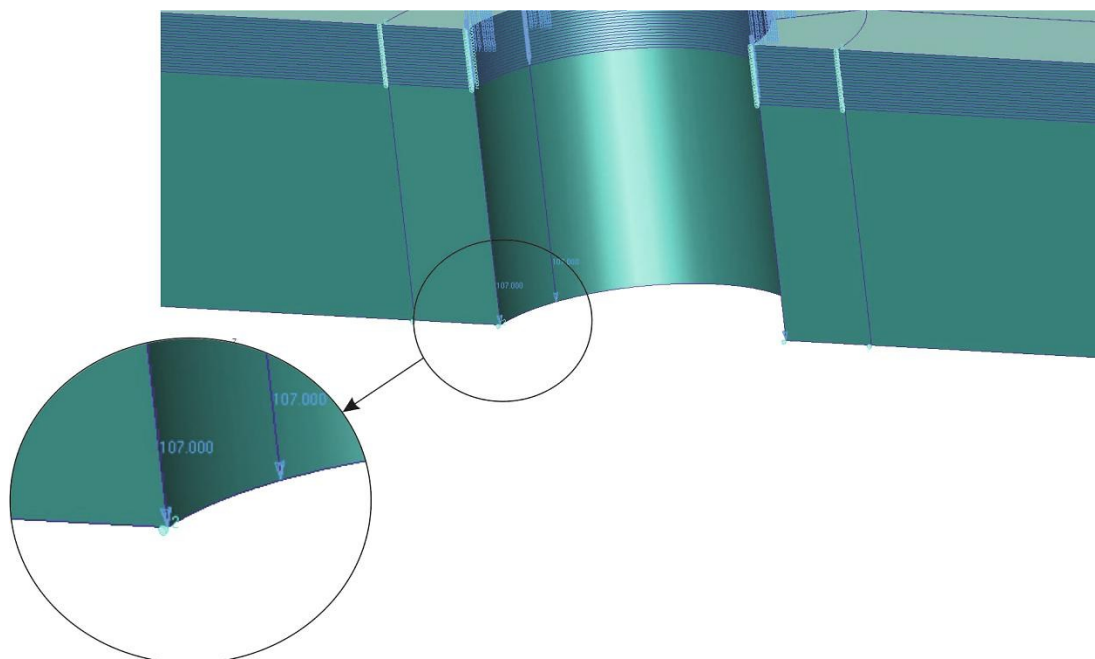
Dalším krokem bylo nastavení materiálových vlastností modelu, což znamená modul pružnosti E , který byl 210 000MPa a Poissonova konstanta μ , která byla 0,3.

Následně byly zadány okrajové podmínky, kdy širší strana modelu byla celá vetknutá, a z důvodu využití symetrie bylo zabráněno posuvu ve směru kolmém na celou rovinu této symetrie, viz obr. 35.



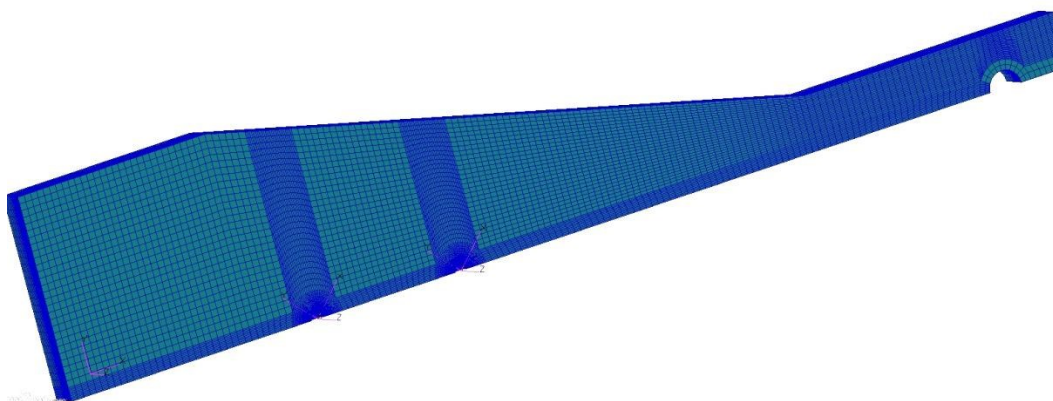
Obrázek 35 Detail okrajové podmínky vetknutí a symetrie

Poslední okrajovou podmínkou bylo vložení síly do otvoru v zúžené části modelu. Velikost této síly byla zvolena tak, aby naměřená hodnota deformací pod tenzometry A odpovídala hodnotě 476 μ S. Velikost působící síly tedy byla zvolena 107N (obr. 36).

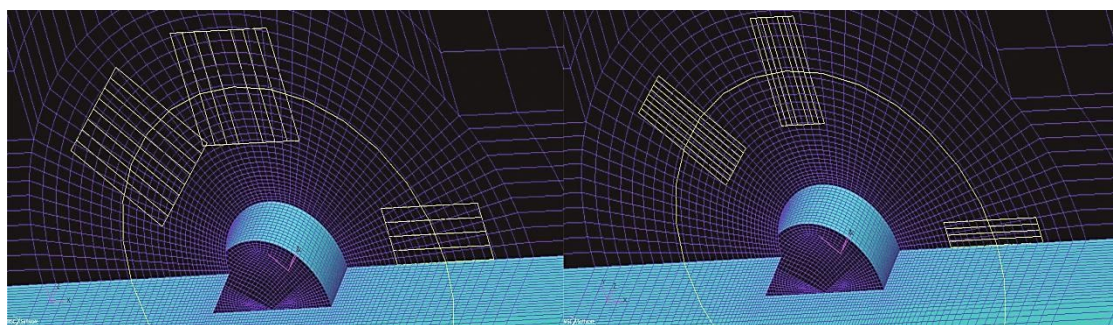


Obrázek 36 Detail vložení působící síly

Posledním chybějícím krokem bylo samotné vysítování celého modelu. Jelikož je u těchto výpočtů nutné získat co nejpřesnější výsledky v místech nalepených tenzometrů, byla v okolí těchto různých nastavena dostatečně jemná velikost elementů (obr. 37 a 38).



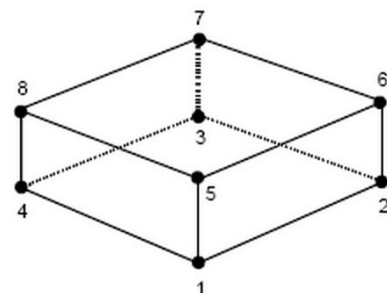
Obrázek 37 Vysítovaný model



Obrázek 38 Detail zahuštění sítě v okolí různých HBM a Vishay, zde pro hloubku 0,7mm

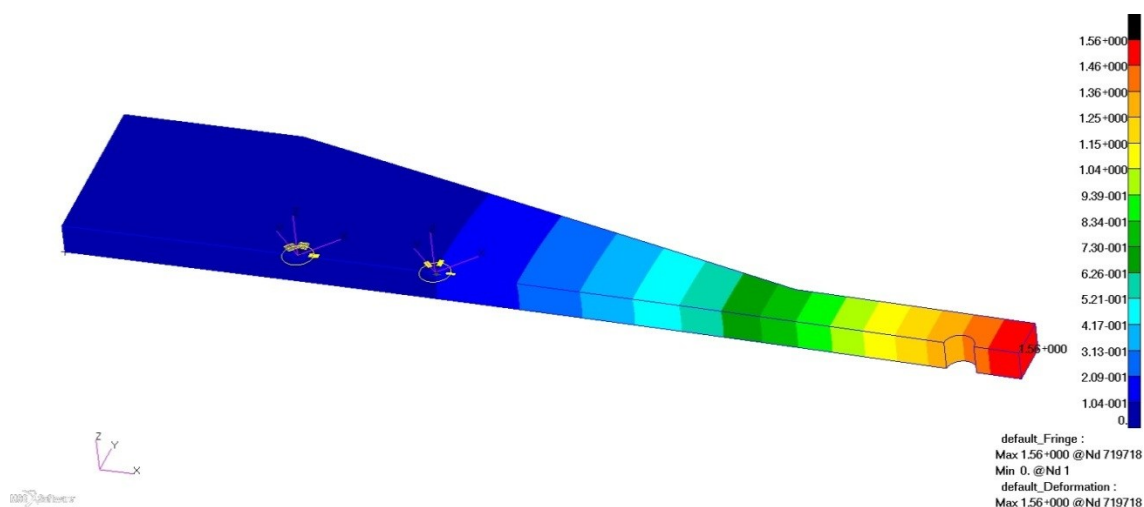
Takováto síť obsahuje dle počítané hloubky zhruba 415 000 uzlů s 410 000 elementy typu Hex8.

Použité šestistěnné elementy typu Hex8 programu MSC Nastran 2012.2 obsahují 8 uzlů v jednotlivých rozích daného elementu a každý takovýto uzel má 3 stupně volnosti a to posuvy ve směrech x, y a z, viz obr. 39.

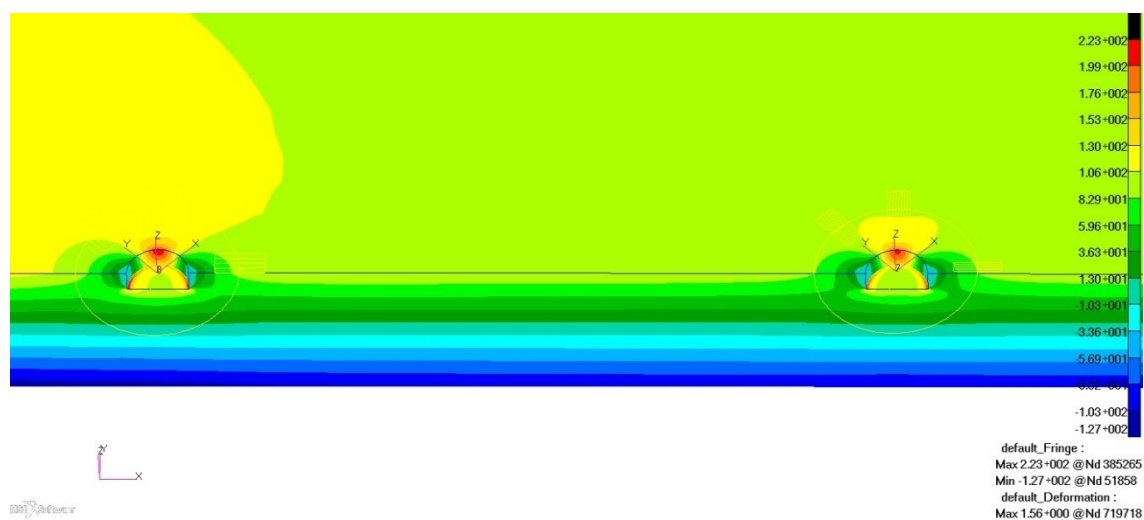


Obrázek 39 Tvar elementu Hex8

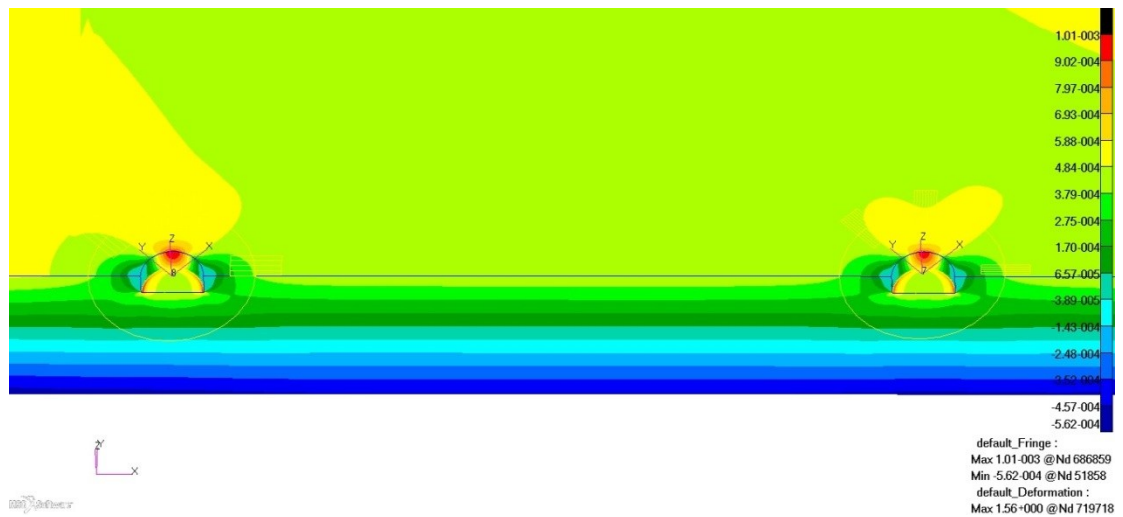
V této chvíli již bylo možné nechat celou úlohu spočítat a postupně extrahovat potřebné výsledky z jednotlivých přírůstků hloubek.



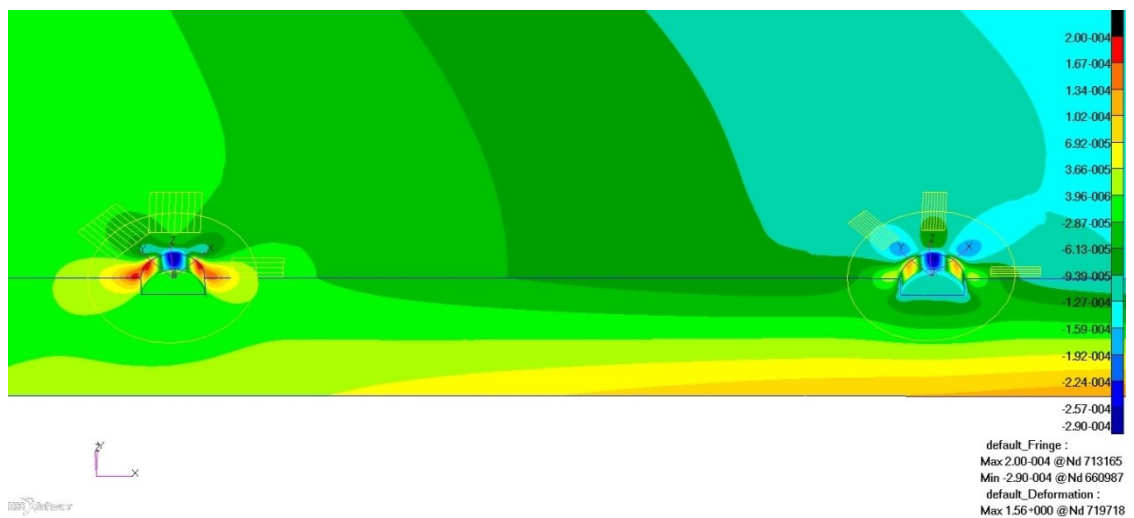
Obrázek 40 Celkové posunutí při hloubce díry 0,7mm [mm]



Obrázek 41 Detail ohybového napětí v okolí otvorů pro hloubku 0,7mm [MPa]

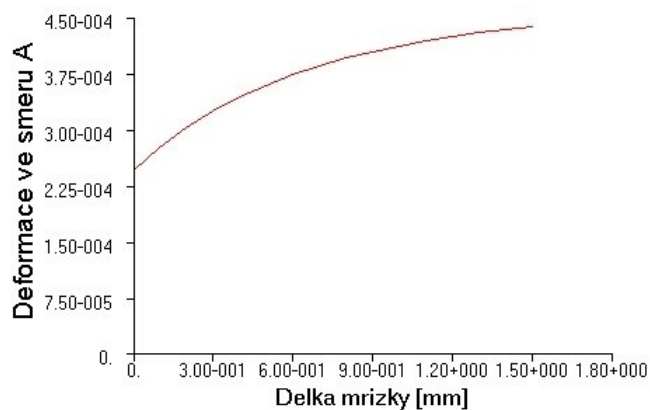


Obrázek 42 Průběhy deformací ve směru tenzometrů A pro hloubku 0,7mm [μS]



Obrázek 43 Průběhy deformací ve směru tenzometrů C pro hloubku 0,7mm [μS]

Obrázky 40 až 43 odpovídají pouze hodnotám naměřených pro díry o hloubce 0,7mm. Na obrázcích 42 a 43 lze vidět deformace ve směru tenzometrů A (obr. 42) a ve směru tenzometrů C (obr. 43), ze kterých se formou dat z tabulky získaly výsledné deformace pro jednotlivé tenzometry. Obdobným způsobem se odečetly hodnoty deformací pod tenzometry B, avšak s tím rozdílem, že musel být použit pootočený souřadnicový systém.



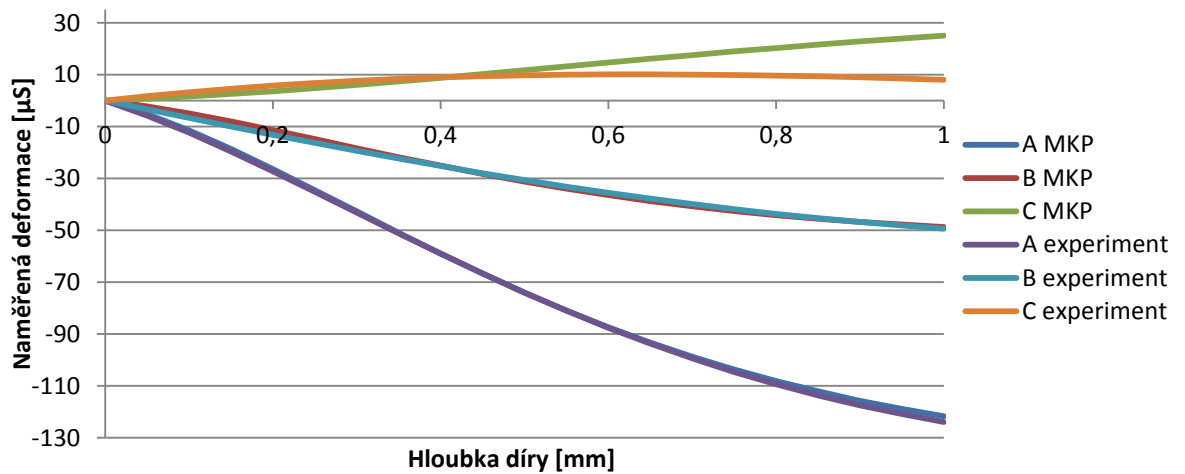
Obrázek 44 Graf naměřené deformace pod tenzometrem A

Obrázek 44 vykresluje naměřenou deformaci pod tenzometrem A při odvrtné hloubce 0,7mm. Takovýto postup se opakoval pro několik míst daného tenzometru a posléze se všechna získaná data zprůměrovala a tím byla získána výsledná naměřená hodnota pro daný tenzometr v dané hloubce. Stejný postup se opakoval pro tenzometry B a C a to ve všech hloubkách od 0 do 1mm s krokem 0,05mm.

7.1 Srovnání naměřených a spočítaných dat

Hloubka [mm]	HBM MKP			HBM Experiment			Chyba		
	A (ϵ_1) [μS]	B (ϵ_2) [μS]	C (ϵ_3) [μS]	A (ϵ_1) [μS]	B (ϵ_2) [μS]	C (ϵ_3) [μS]	A [%]	B [%]	C [%]
0	0 (476)	0 (189)	0 (-113)	0	0	0	0	0	0
0,05	-5,12	-2,17	0	-5,77	-3,34	1,71	11,3	35,2	55,4
0,10	-11,46	-4,90	0,76	-12,37	-6,66	3,24	7,3	26,3	50,09
0,15	-18,66	-8,02	1,62	-19,59	-9,93	4,59	4,7	19,2	44
0,20	-26,43	-11,38	2,57	-27,24	-13,15	5,78	2,9	13,4	37,2
0,25	-34,52	-14,85	3,63	-35,15	-16,30	6,80	1,7	8,8	29,6
0,30	-42,76	-18,35	4,79	-43,16	-19,37	7,67	0,9	5,2	21,1
0,35	-50,95	-21,78	6,05	-51,16	-22,34	8,39	0,4	2,5	12
0,40	-58,96	-25,10	7,39	-59,02	-25,22	8,98	0,1	0,4	2,1
0,45	-66,67	-28,25	8,79	-66,66	-27,98	9,44	0	0,9	8,4
0,50	-74,00	-31,20	10,24	-74,00	-30,62	9,77	0	1,9	19,8
0,55	-80,90	-33,93	11,72	-80,99	-33,13	9,99	0,1	2,4	32,1
0,60	-87,32	-36,43	13,21	-87,57	-35,52	10,10	0,2	2,5	45,3
0,65	-93,25	-38,70	14,69	-93,71	-37,76	10,12	0,4	2,4	59,5
0,70	-98,68	-40,73	16,15	-99,39	-39,86	10,04	0,7	2,1	75
0,75	-103,6	-42,54	17,58	-104,6	-41,82	9,88	0,9	1,7	91,9
0,80	-108,1	-44,14	18,96	-109,34	-43,63	9,64	1,1	1,1	110,5
0,85	-112,9	-45,54	20,30	-113,6	-45,29	9,33	1,3	0,5	131,1
0,90	-115,7	-46,76	21,59	-117,45	-46,80	8,96	1,4	0,1	154,1
0,95	-118,9	-47,81	22,80	-120,86	-48,17	8,54	1,6	0,7	180,2
1,00	-121,7	-47,71	23,95	-123,87	-49,38	8,09	1,7	1,3	209,8

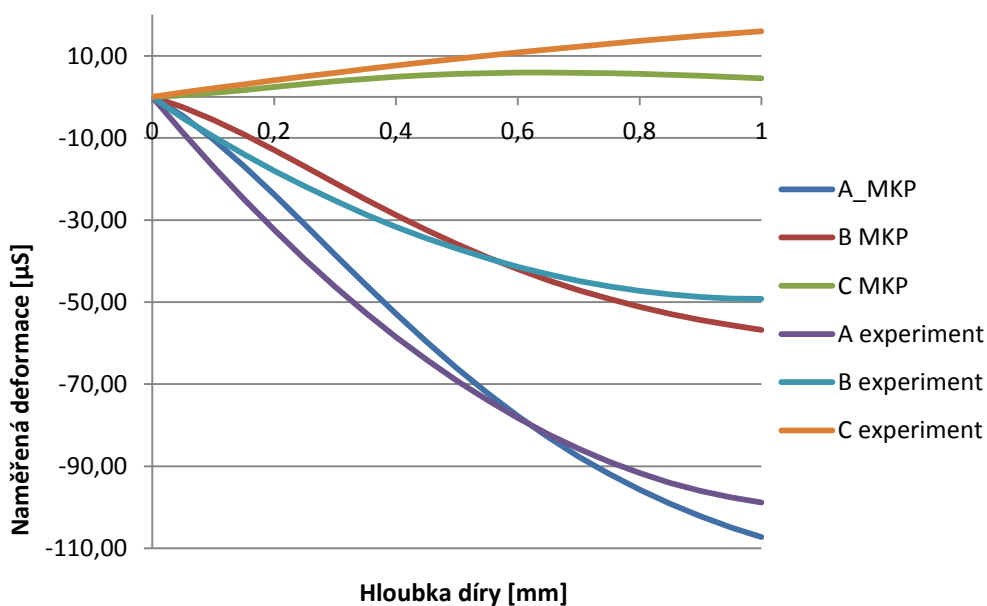
Tabulka 4 Naměřené a spočítané deformace pro různé HBM



Obrázek 45 Grafické zobrazení naměřených a spočítaných deformací pro různé HBM

Hloubka [mm]	Vishay MKP			Vishay Experiment			Chyba		
	A (ϵ_1) [μS]	B (ϵ_2) [μS]	C (ϵ_3) [μS]	A (ϵ_1) [μS]	B (ϵ_2) [μS]	C (ϵ_3) [μS]	A [%]	B [%]	C [%]
0	0 (475)	0 (244)	0 (-20)	0	0	0	0	0	0
0,05	-4,62	-2,47	0,39	-8,70	-5,19	1,04	46,8	52,4	62,5
0,10	-10,36	-5,60	0,97	-17,00	-9,70	2,06	39,1	42,3	52,8
0,15	-16,85	-9,16	1,66	-24,90	-13,97	3,05	32,3	34,4	45,5
0,20	-23,83	-12,99	2,39	-32,41	-17,99	4,02	26,5	27,8	40,5
0,25	-31,09	-16,97	3,11	-39,52	-21,77	4,96	21,3	22,0	37,4
0,30	-38,44	-20,99	3,77	-46,24	-25,31	5,88	16,9	17,1	35,8
0,35	-45,73	-24,95	4,37	-52,57	-28,60	6,77	13,0	12,8	35,5
0,40	-52,83	-28,78	4,87	-58,49	-31,65	7,63	9,7	9,0	36,2
0,45	-59,65	-32,44	5,27	-64,03	-34,45	8,47	6,8	5,8	37,7
0,50	-66,11	-35,88	5,58	-69,17	-37,02	9,28	4,4	3,1	39,9
0,55	-72,16	-39,07	5,78	-73,91	-39,34	10,07	2,4	0,7	42,5
0,60	-77,78	-42,01	5,90	-78,25	-41,41	10,83	0,6	1,4	45,5
0,65	-82,94	-44,68	5,92	-82,21	-43,24	11,56	0,9	3,3	48,8
0,70	-87,64	-47,10	5,87	-85,76	-44,83	12,27	2,2	5,1	52,2
0,75	-91,90	-49,26	5,76	-88,92	-46,18	12,96	3,4	6,7	55,6
0,80	-95,74	-51,18	5,58	-91,69	-47,28	13,62	4,4	8,2	59,0
0,85	-99,16	-52,88	5,36	-94,06	-48,14	14,25	5,4	9,8	62,4
0,90	-102,21	-54,36	5,10	-96,04	-48,76	14,86	6,4	11,5	65,7
0,95	-104,90	-55,65	4,81	-97,62	-49,13	15,44	7,5	13,3	68,9
1,00	-107,25	-56,76	4,49	-98,80	-49,26	15,99	8,6	15,2	71,9

Tabulka 5 Naměřené a spočítané deformace pro různé Vishay



Obrázek 46 Grafické zobrazení naměřených a spočítaných deformací pro různé Vishay

Na obrázku číslo 45 a tabulce 4 lze vidět, že rozdíly mezi naměřenými a spočítanými deformacemi různé HBM na tenzometrech A a B jsou víceméně zanedbatelné, největší chyby je dosaženo pouze u počátečních přírůstků hloubky, kdy jsou uvolněné deformace minimální a rozdíly v řádech několika jednotek μS vytvoří chybu v desítkách procent. Proto si je třeba uvědomit, že rozdíl několika μS je naprosto zanedbatelný.

Naopak u tenzometru C je tato chyba již významnější, takže lze předpokládat, že zde již hraje roli i jistá zbytková napjatost, která v kombinaci s možnou chybou měření, která mohla během experimentu nastat, mohla vyvolat takovýto rozdíl oproti numerickému modelu. Jistou chybu může zapříčinit i samotný numerický model, který z důvodu takto malých změn deformací po odvrtávacích krocích nemusí být dostatečně přesný jako v případě větších uvolněných deformací v případě různé A a B.

V případě různé Vishay se naměřená data zobrazená v tabulce 5 a obrázku 46 do jisté míry liší po celé délce odvrtaného otvoru, avšak v případě různé A a B je rozdíl až na několik prvních odvrtaných kroků, kdy rozdíl opět dělá jen pár jednotek μS , maximálně v rozmezí 10%. V případě různé C je chyba opět o něco vyšší a opět je zde předpoklad vnesených chyb, který byl již uveden v případě různé HBM. Rozdíly u různé Vishay mezi naměřenými a spočítanými daty mohou být také částečně způsobeny jejím samotným umístěním, kdy se různé nalepila blízko vetknutí, které mohlo výsledky ovlivnit. Tomu by částečně odpovídal i průběh samotných deformací, neboť vetknutí v případě numerického výpočtu je oproti experimentu dokonalé a jeho vliv na naměřená data je tedy výraznější.

Nelze také zanedbat možný vliv samotných vnitřních napětí, která v součásti mohla zůstat i přes jeho důkladné vyžihání a se kterými numerický model nepočítá.

8. VÝPOČET ZBYTKOVÝCH NAPĚTÍ

Výpočet zbytkových napětí jak pro homogenní, tak i pro nehomogenní rozložení po tloušťce byl proveden dle normy ASTM E837-13a a následně integrální metodou pro koeficienty stanovené z numerického výpočtu. [7] [11]

8.1 Výpočet pro homogenní rozložení napětí

8.1.1 Výpočet dle normy ASTM E837-13a

Výpočty pro homogenní rozložení napětí po tloušťce se v této americké normě dělí podle šířky měřeného obrobku. Hranice mezi tenkým a tlustým obrobkem je uvedena na obrázku 20. V rámci toho, že zkoušený materiál má tloušťku 5mm, budou další výpočty provedeny pro tlusté materiály, avšak uvedeny budou i výpočty pro tenké obrobky, neboť z nich dojde následně k přepočítání kalibračních koeficientů.

Prvním krokem je přepočet naměřených uvolněných deformací na transformované uvolněné deformace:

$$p_i = \frac{(\varepsilon_{3i} + \varepsilon_{1i})}{2} \quad (13)$$

$$q_i = \frac{(\varepsilon_{3i} - \varepsilon_{1i})}{2} \quad (14)$$

$$t_i = \frac{(\varepsilon_{3i} + \varepsilon_{1i} - 2\varepsilon_{2i})}{2} \quad (15)$$

Index i označuje jednotlivé odvrtné hloubky. V případě homogenního rozložení jsou doporučené přírůstky hloubky 0,1mm.

Poté se pro každý přírůstek hloubky z tabulky na obrázku 47 stanoví jednotlivé kalibrační koeficienty a a b pro různici typu A, která odpovídá jak různici Vishay, tak i HBM.

Rosette A		\bar{a}					\bar{b}				
Blind Hole Depth in. (mm)	Hole Diameter, in. (mm)					Hole Diameter, in. (mm)					
	0.060 (1.52)	0.070 (1.78)	0.080 (2.03)	0.090 (2.29)	0.100 (2.54)	0.060 (1.52)	0.070 (1.78)	0.080 (2.03)	0.090 (2.29)	0.100 (2.54)	
0.000 (0.0)	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	
0.004 (0.1)	.008	.011	.015	.021	.026	.016	.021	.028	.037	.045	
0.008 (0.2)	.019	.027	.036	.047	.059	.037	.050	.066	.084	.103	
0.012 (0.3)	.032	.044	.059	.076	.097	.062	.084	.110	.137	.171	
0.016 (0.4)	.045	.062	.083	.106	.136	.088	.119	.155	.193	.241	
0.020 (0.5)	.057	.078	.104	.134	.170	.115	.154	.200	.248	.307	
0.024 (0.6)	.068	.093	.124	.158	.199	.140	.187	.242	.299	.367	
0.028 (0.7)	.078	.106	.140	.178	.222	.164	.218	.280	.345	.418	
0.032 (0.8)	.082	.117	.154	.195	.241	.185	.246	.314	.385	.463	
0.036 (0.9)	.093	.126	.165	.208	.256	.204	.270	.343	.419	.501	
0.040 (1.0)	.098	.133	.173	.218	.267	.221	.291	.370	.449	.533	
Through Hole	.088	.120	.157	.199	.244	.283	.371	.463	.554	.642	
Rosette B		\bar{a}					\bar{b}				
Blind Hole Depth in. (mm)	Hole Diameter, in. (mm)					Hole Diameter, in. (mm)					
	0.060 (1.52)	0.070 (1.78)	0.080 (2.03)	0.090 (2.29)	0.100 (2.54)	0.060 (1.52)	0.070 (1.78)	0.080 (2.03)	0.090 (2.29)	0.100 (2.54)	
0.000 (0.0)	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	
0.004 (0.1)	.009	.012	.016	.022	.027	.018	.024	.032	.041	.050	
0.008 (0.2)	.021	.029	.039	.051	.063	.042	.057	.074	.093	.115	
0.012 (0.3)	.034	.047	.064	.082	.105	.070	.094	.123	.153	.191	
0.016 (0.4)	.048	.066	.089	.114	.146	.100	.134	.175	.216	.270	
0.020 (0.5)	.061	.084	.112	.143	.183	.130	.174	.225	.278	.343	
0.024 (0.6)	.073	.100	.132	.169	.213	.159	.211	.272	.335	.409	
0.028 (0.7)	.083	.114	.150	.190	.237	.185	.246	.314	.385	.466	
0.032 (0.8)	.092	.125	.164	.207	.256	.209	.277	.352	.430	.515	
0.036 (0.9)	.099	.134	.175	.221	.271	.231	.305	.385	.468	.557	
0.040 (1.0)	.105	.142	.184	.231	.282	.249	.328	.413	.500	.592	
Through Hole	.094	.128	.167	.212	.260	.322	.421	.523	.621	.716	
Rosette C		\bar{a}					\bar{b}				
Blind Hole Depth in. (mm)	Hole Diameter, in. (mm)					Hole Diameter, in. (mm)					
	0.060 (1.52)	0.070 (1.78)	0.080 (2.03)	0.090 (2.29)	0.100 (2.54)	0.060 (1.52)	0.070 (1.78)	0.080 (2.03)	0.090 (2.29)	0.100 (2.54)	
0.000 (0.0)	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	
0.004 (0.1)	.019	.027	.038	.050	.061	.032	.043	.056	.070	.082	
0.008 (0.2)	.046	.064	.086	.111	.139	.076	.103	.132	.161	.193	
0.012 (0.3)	.076	.105	.141	.182	.235	.128	.172	.221	.269	.333	
0.016 (0.4)	.106	.147	.197	.253	.324	.184	.246	.315	.383	.468	
0.020 (0.5)	.134	.186	.248	.316	.400	.240	.320	.407	.490	.589	
0.024 (0.6)	.160	.221	.292	.371	.464	.293	.389	.491	.587	.695	
0.028 (0.7)	.182	.250	.330	.416	.515	.343	.452	.566	.673	.784	
0.032 (0.8)	.201	.275	.361	.453	.556	.387	.507	.631	.745	.858	
0.036 (0.9)	.217	.296	.386	.482	.588	.427	.556	.687	.806	.918	
0.040 (1.0)	.230	.312	.405	.505	.613	.461	.597	.734	.856	.968	
Through Hole	.246	.335	.437	.553	.681	.519	.648	.758	.831	.860	

Obrázek 47 Kalibrační koeficienty pro homogenní rozložení [7]

Se získanými daty již bylo možné dopočítat hledaná transformovaná zbytková napětí.

$$P_i = -\frac{E \cdot p_i}{\bar{a}_i(1 + \mu)} \quad (16)$$

$$Q_i = -\frac{E \cdot q_i}{\bar{b}_i} \quad (17)$$

$$T_i = -\frac{E \cdot t_i}{\bar{b}_i} \quad (18)$$

Uvedené rovnice (16) až (18) jsou vhodné pro výpočet tenkých materiálů, pro počítaný obrobek je tedy výhodnější doporučený tvar rovnic:

$$P_i = -\frac{E}{(1 + \mu)} \frac{\sum(\bar{a} \cdot p_i)}{\sum \bar{a}^2} \quad (19)$$

$$Q_i = -E \frac{\sum(\bar{b} \cdot q_i)}{\sum \bar{b}^2} \quad (20)$$

$$T_i = -E \frac{\sum(\bar{b} \cdot t_i)}{\sum \bar{b}^2} \quad (21)$$

Posledním krokem již bylo dopočítání hlavních napětí.

$$\sigma_{max}, \sigma_{min} = P \pm \sqrt{Q^2 + T^2} \quad (22)$$

Tento postup je shodný jak pro různé Vishay, tak pro různé HBM. A v rámci toho, že obě různé spadají do typu tenzometru A, byly použity i shodné kalibrační koeficienty.

Veškeré zde uvedené výpočty byly počítány v programu Mathcad14 nebo v programu Microsoft Excel 2010 a jelikož jsou tyto výpočty značně zdlouhavé, budou zde uvedeny pouze výsledné hodnoty. Celý postup výpočtů je však uveden v poskytnuté příloze A.

	Vishay	HBM
Hloubka [mm]	σ_{\max} [MPa]	σ_{\max} [MPa]
0,1	153,8	109,8
0,2	127,5	102,5
0,3	112,4	98,7
0,4	102,3	96,4
0,5	95,6	95,1
0,6	90,5	94,1
0,7	86,7	93,6
0,8	83,6	93,1
0,9	81,1	92,8
1,0	78,9	92,5

Tabulka 6 Spočítané hlavní napětí dle normy ASTM

V tabulce 6 lze vidět výsledné hodnoty maximálních hlavních napětí jak pro různé Vishay, tak pro různé HBM. Je patrné, že nepřesné hodnoty naměřených deformací různé Vishay se nepříznivě podepisují i na samotných přepočítaných napětích, kdežto v případě různé HBM jsou výsledky u prvních přírůstků hloubky daleko reálnější.

Obecně lze ale říci, že výpočet dle homogenního rozložení má tendenci s rostoucí hloubkou díry pouze k malým změnám napětí. I z tohoto důvodu lze předpokládat, že hodnoty vypočítané u různých Vishay i HBM jsou do jisté míry zkreslené.

Dalším krokem byl pokus o přepočítání kalibračních konstant z numerického výpočtu.

8.1.2 Stanovení a přepočet pro nové kalibrační konstanty

Přepočet kalibračních konstant byl proveden tak, že z modelu vytvořeného metodou konečných prvků se krom uvolněných deformací dále získaly hodnoty působících napětí ve směru osy nosníku (pro výpočet *a*) a směru kolmém na tento směr (pro výpočet *b*) v okolí

jednotlivých rŕžic. Díky tŕmto datŕm lze za pouŕitŕ upravenŕch rovnic (16) a (17) doloŕt novŕ koeficienty a a b pro obŕ dvŕ rŕŕice.

Hloubka [mm]	Vishay		HBM	
	smŕr x [MPa]	smŕr y [MPa]	smŕr x [MPa]	smŕr y [MPa]
0,1	105,7	27,7	97,4	6,6
0,2	101,4	26,5	93,4	6,3
0,3	97,0	25,4	89,3	6,0
0,4	92,6	24,2	85,3	5,8
0,5	88,2	23,0	81,2	5,5
0,6	83,8	21,9	77,2	5,2
0,7	79,4	20,7	73,1	4,9
0,8	75,0	19,6	69,0	4,6
0,9	70,6	18,4	65,0	4,4
1,0	66,2	17,2	60,9	4,0

Tabulka 7 Napŕtŕ pro jednotlivŕ hloubky zŕskanŕ z MKP modelu

Takto zŕskanŕ napŕtŕ v tabulce 7 bylo tŕeba pŕeŕoŕtŕt na transformovanŕ zbytkovŕ napŕtŕ pomocí rovnic:

$$P_i = \frac{\sigma_{yi} + \sigma_{xi}}{2} \quad (23)$$

$$Q_i = \frac{\sigma_{yi} - \sigma_{xi}}{2} \quad (24)$$

Namŕřenŕ uvolnŕnŕ deformace z MKP modelu jsou jŕž uvedeny v tabulkŕch ŕslo 4 a 5.

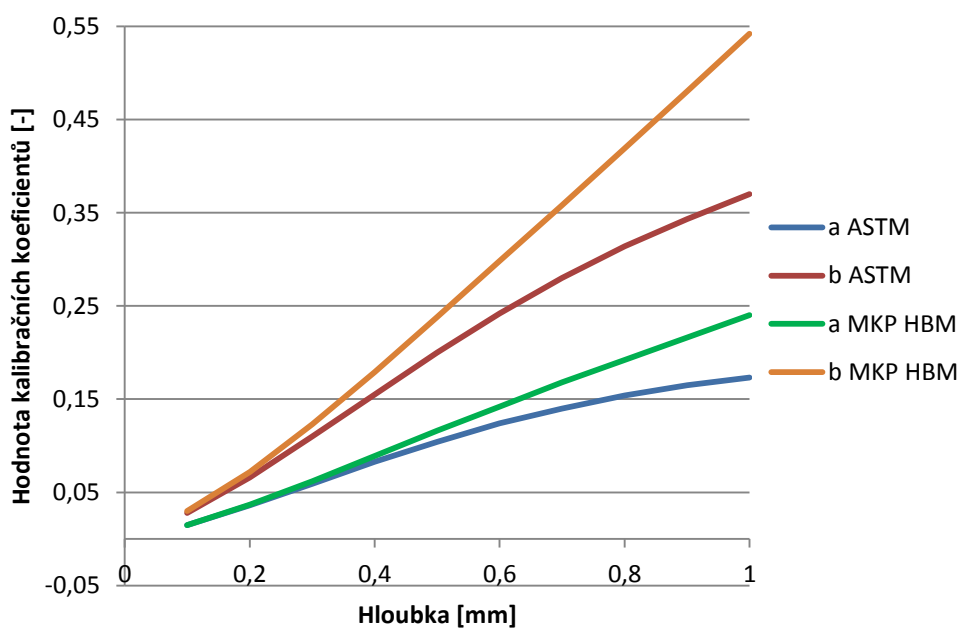
A nakonec pouŕitŕ upravenŕ rovnice (16) a (17) majŕ tvar:

$$\bar{a}_i = -\frac{E \cdot p_i}{P_i(1 + \mu)} \quad (25)$$

$$\bar{b}_i = -\frac{E \cdot q_i}{Q_i} \quad (26)$$

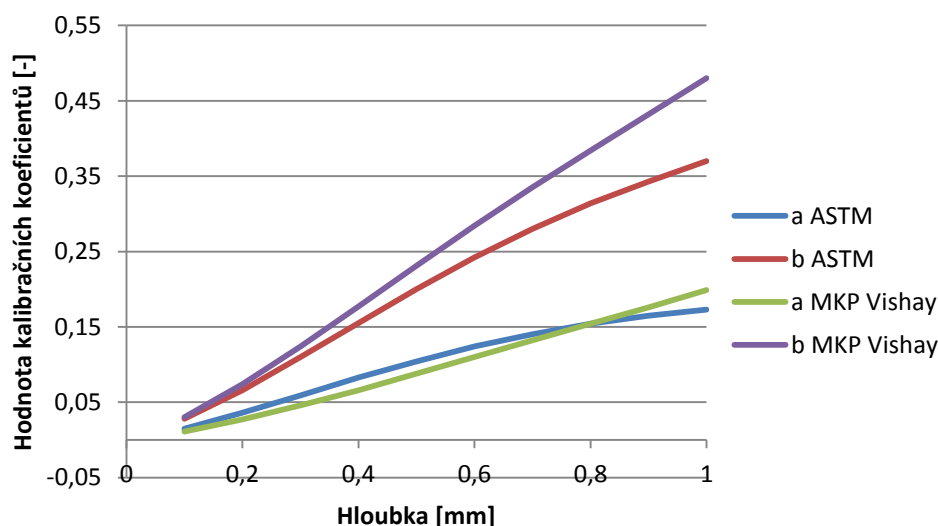
Hloubka [mm]	Vishay				HBM			
	a ASTM [-]	a MKP [-]	b ASTM [-]	b MKP [-]	a ASTM [-]	a MKP [-]	b ASTM [-]	b MKP [-]
0,1	0,015	0,011	0,028	0,03	0,015	0,015	0,028	0,03
0,2	0,036	0,027	0,066	0,074	0,036	0,037	0,066	0,072
0,3	0,059	0,046	0,11	0,124	0,059	0,062	0,11	0,123
0,4	0,083	0,066	0,155	0,177	0,083	0,089	0,155	0,179
0,5	0,104	0,088	0,2	0,231	0,104	0,116	0,2	0,238
0,6	0,124	0,11	0,242	0,284	0,124	0,142	0,242	0,298
0,7	0,14	0,132	0,28	0,335	0,14	0,168	0,28	0,358
0,8	0,154	0,154	0,314	0,384	0,154	0,192	0,314	0,419
0,9	0,165	0,176	0,343	0,432	0,165	0,216	0,343	0,48
1,0	0,173	0,199	0,37	0,48	0,173	0,24	0,37	0,542

Tabulka 8 Srovnání koeficientů podle normy ASTM a koeficientů získaných z MKP



Obrázek 48 Graf průběhu koeficientů u rúžice HBM

Obrázek 48 vykresluje rozdíly kalibračních koeficientů a a b získaných z normy ASTM a koeficientů vypočítaných z deformací a napětí získaných z numerického výpočtu pro rúžici HBM.



Obrázek 49 Graf průběhu koeficientů u růžice Vishay

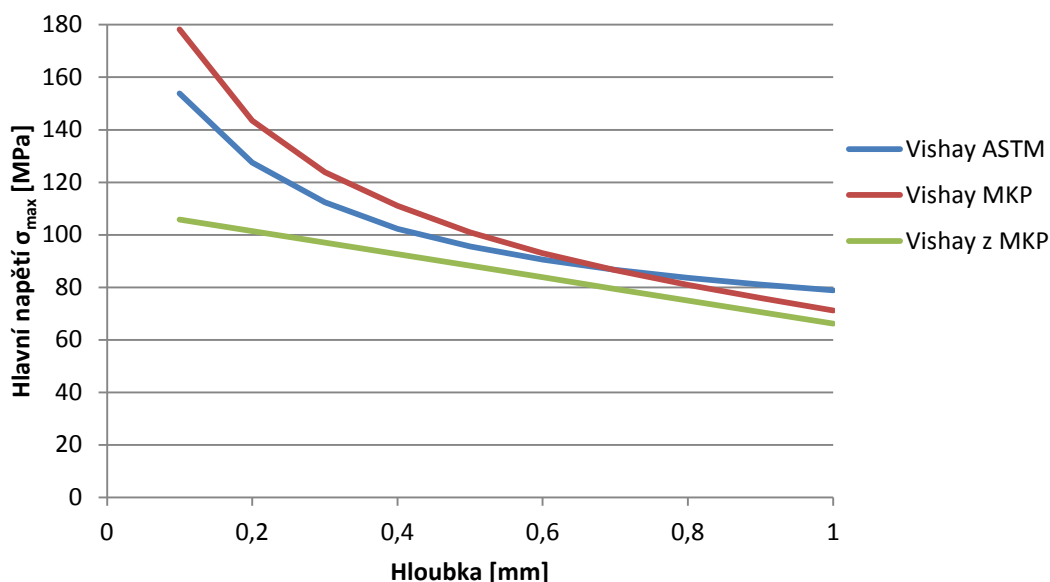
Obrázek 49 vykresluje rozdíly kalibračních koeficientů a a b získaných z normy ASTM a koeficientů vypočítaných z deformací a napětí získaných z numerického výpočtu pro růžici Vishay.

S novými kalibračními koeficienty získanými pro jednotlivé růžice se opět provedl výpočet zbytkových napětí a jeho následné srovnání s napětími získaných podle normy ASTM E837-13a. Postup výpočtu, až na změněné koeficienty byl naprosto shodný jako v případě výpočtu dle normy ASTM, proto zde již nebude opakován.

Hloubka [mm]	Vishay			HBM		
	σ_{\max} ASTM [MPa]	σ_{\max} MKP [MPa]	σ_{\max} z MKP [MPa]	σ_{\max} ASTM [MPa]	σ_{\max} MKP [MPa]	σ_{\max} z MKP [MPa]
	0,1	153,8	178,2	105,8	109,8	105,7
0,2	127,5	143,5	101,4	102,5	97	93,4
0,3	112,4	123,8	97	98,7	91,7	89,3
0,4	102,3	111	92,6	96,4	87,8	85,3
0,5	95,6	100,9	88,2	95,1	84,7	81,2
0,6	90,5	93	83,8	94,1	81,9	77,2
0,7	86,7	86,5	79,4	93,6	79,3	73,1
0,8	83,6	80,9	75	93,1	76,7	69
0,9	81,1	75,9	70,6	92,8	74,2	65
1,0	78,9	71,2	66,2	92,5	71,5	60,9

Tabulka 9 Srovnání vypočtených hodnot hlavních napětí

V tabulce 9 jsou uvedena výsledná maximální napětí pro koeficienty v případě normy ASTM (označena σ_{\max} ASTM), dále pro nové koeficienty získané z numerického výpočtu (označena σ_{\max} MKP) a v posledním sloupci jsou uvedeny výsledky odečtených hlavních napětí přímo z numerického výpočtu, jinak označovaná také jako ohybová napětí v nosníku (označena jako σ_{\max} z MKP).



Obrázek 50 Graf průběhu hlavního napětí po tloušťce v místě rýžice Vishay

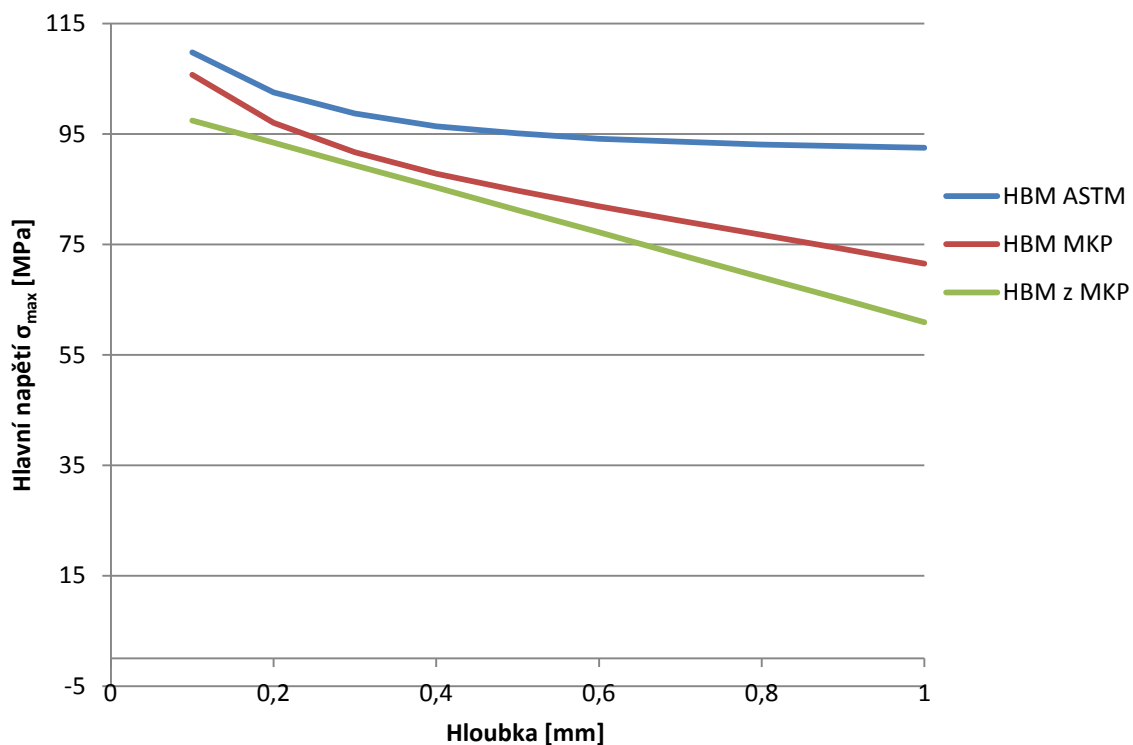
Obrázek 50 graficky srovnává výsledné hodnoty vypočítaných hlavních napětí v jednotlivých odvrtaných hloubkách rýžice Vishay. Jako referenční je třeba brát výsledky ohybových napětí přímo odečtených z MKP (na obrázku jako „Vishay z MKP“), kdy výsledná napětí nejsou ovlivněna žádnou zbytkovou napjatostí způsobenou technologií výroby, popřípadě dalším zpracováním. Tomuto předpokladu odpovídá i fakt, že výsledky těchto napětí jsou ze všech tří nejnižší.

V případě výsledků získaných z koeficientů uvedených v normě ASTM E837-13a (na obrázku 50 jako „Vishay ASTM“) dochází do hloubky 0,5mm k vysokým rozdílům, které jsou v rozmezí zhruba 50%, avšak od této hloubky chyba klesá a drží si svou hodnotu v rozmezí 10 až 15% až do finální odvrtané hloubky.

Naopak v případě nových kalibračních konstant získaných z MKP (na obrázku 50 jako Vishay MKP) je počáteční chyba daleko vyšší, avšak celý graf má oproti výsledkům dle normy ASTM daleko strmější charakter a v hloubce 0,6mm je rozdíl ve výsledcích pod 8%.

I přes částečné zlepšení v případě použití nových kalibračních koeficientů jsou výsledky v prvních několika přírůstcích hloubky vysoce nepřesné. Důvody těchto nepřesností vyplývají z velikostí naměřených deformací a okolních vlivů působících na

přesnost měření. Nelze však opomenout vliv i jistých zbytkových napětí, která ve zkoušeném materiálu působila.



Obrázek 51 Graf průběhu hlavního napětí po tloušťce v místě růžice HBM

Naopak v případě porovnání dat pro růžici HBM dochází při použití nových kalibračních koeficientů k výraznému zlepšení oproti napětím získaných dle normy ASTM, jak lze vidět na obrázku 51.

V případě dat spočítaných dle normy ASTM (na obrázku 51 jako „HBM ASTM“) lze vidět oproti referenčním ohybovým napětím získaných z numerického výpočtu (na obrázku 51 jako „HBM z MKP“) obrovský rozdíl jak v průběhu, tak i v samotných hodnotách, kdy chyba dosahuje až 53%

V případě použití nových kalibračních koeficientů (na obrázku 51 jako „HBM MKP“) průběh napětí daleko lépe odpovídá průběhu napětí získaných z MKP a chyba, mezi jednotlivými hloubkami činí maximálně 17%. V hloubkách okolo 0,3mm klesá výsledná chyba až na necelé 3%.

Celkově lze posoudit nové kalibrační koeficienty jako daleko přesnější, než v případě použití koeficientů z normy ASTM. I přesto je ale nutné podotknout, že v případě obou růžic je průměrná chyba po hloubce v rozmezí zhruba 20%, což je neakceptovatelné, ale očekávané, neboť použitá metodika je určena pro řešení homogenních napětí po tloušťce materiálu a ne pro nehomogenní rozložení jako v tomto případě.

8.2 Výpočet pro nehomogenní rozložení napětí

8.2.1 Výpočet dle normy ASTM E837-13a

Výpočet nehomogenního rozložení napětí po tloušťce materiálu dle americké normy ASTM má svůj základ v integrální metodě, kterou jako první uvedl G. S. Schajer v roce 1988. Tato metoda uvažuje velikosti jednotlivých příspěvků od všech uvolněných deformací po celé hloubce otvoru najednou. [12] [13] [14]

Prvním krokem je přepočtení naměřených deformací jednotlivých tenzometrů na transformované uvolněné deformace shodně jako v rovnici (13) až (15). Jediný rozdíl je v tom, že v případě nelineárního rozložení se výpočty provádějí pro přírůstky hloubky 0,05mm a ne jako v případě lineárního rozložení po 0,1mm.

Následně se pro různé typy A z tabulky kalibračních koeficientů a a b pro nelineární rozložení vypsaly všechny koeficienty, neboť v případě tohoto experimentu, kdy se odvrátila díra po 0,05mm do hloubky 1mm, jsou potřebné všechny koeficienty této tabulky, viz obr. 52.

Jelikož tabulka na obrázku 52 obsahuje hodnoty pro díru o průměru 2mm, je nutné dle normy ASTM celou matici vynásobit hodnotou $\left(\frac{D_0}{2}\right)^2$, kde hodnota D_0 je skutečný průměr odfrézované díry.

Zároveň se v této normě uvádí, že v případě, kdy je pouze několik přírůstků hloubky, lze použít pro výpočet transformovaných napětí následující rovnice.

$$\bar{a}P = \frac{E}{1 + \mu} p \quad (27)$$

$$\bar{b}Q = Eq \quad (28)$$

$$\bar{b}T = Et \quad (29)$$

Avšak v případech, kdy je počet přírůstků hloubek vyšší, jako v případě tohoto experimentu, bude matice koeficientů a a b špatně numericky podmíněná, což povede k tomu, že malé chyby v naměřených uvolněných deformacích povedou k vysokým chybám u zjištěných vnitřních napětí. K redukci tohoto efektu se v normě doporučuje použít Tikhonovu regulaci. Celý postup výpočtu pro nelineární rozložení dle normy ASTM je uveden v příloze B.

Hole Depth		Stress Depth									
in.	mm	0.002	0.004	0.006	0.008	0.010	0.012	0.014	0.016	0.018	0.020 in.
		0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50 mm
0.002	0.05	-0.00679									
0.004	0.10	-0.00815	-0.00714								
0.006	0.15	-0.00937	-0.00844	-0.00734							
0.008	0.20	-0.01046	-0.00960	-0.00858	-0.00739						
0.010	0.25	-0.01141	-0.01063	-0.00968	-0.00856	-0.00728					
0.012	0.30	-0.01223	-0.01152	-0.01064	-0.00960	-0.00839	-0.00701				
0.014	0.35	-0.01291	-0.01227	-0.01147	-0.01050	-0.00936	-0.00806	-0.00659			
0.016	0.40	-0.01360	-0.01287	-0.01207	-0.01132	-0.01015	-0.00893	-0.00759	-0.00615		
0.018	0.45	-0.01416	-0.01344	-0.01264	-0.01184	-0.01082	-0.00970	-0.00846	-0.00712	-0.00567	
0.020	0.50	-0.01463	-0.01392	-0.01312	-0.01223	-0.01134	-0.01031	-0.00917	-0.00793	-0.00657	-0.00511
0.022	0.55	-0.01508	-0.01434	-0.01354	-0.01270	-0.01173	-0.01072	-0.00977	-0.00854	-0.00730	-0.00600
0.024	0.60	-0.01545	-0.01471	-0.01391	-0.01306	-0.01211	-0.01113	-0.01013	-0.00906	-0.00791	-0.00670
0.026	0.65	-0.01578	-0.01503	-0.01422	-0.01340	-0.01243	-0.01146	-0.01049	-0.00938	-0.00842	-0.00722
0.028	0.70	-0.01606	-0.01531	-0.01450	-0.01366	-0.01271	-0.01175	-0.01078	-0.00970	-0.00869	-0.00765
0.030	0.75	-0.01629	-0.01554	-0.01473	-0.01390	-0.01294	-0.01199	-0.01102	-0.00996	-0.00892	-0.00795
0.032	0.80	-0.01649	-0.01574	-0.01493	-0.01410	-0.01313	-0.01217	-0.01123	-0.01018	-0.00919	-0.00815
0.034	0.85	-0.01665	-0.01590	-0.01510	-0.01426	-0.01330	-0.01234	-0.01138	-0.01036	-0.00938	-0.00836
0.036	0.90	-0.01679	-0.01604	-0.01523	-0.01441	-0.01344	-0.01248	-0.01151	-0.01049	-0.00955	-0.00852
0.038	0.95	-0.01692	-0.01617	-0.01536	-0.01452	-0.01357	-0.01261	-0.01164	-0.01063	-0.00967	-0.00866
0.040	1.00	-0.01704	-0.01628	-0.01548	-0.01465	-0.01368	-0.01272	-0.01176	-0.01074	-0.00978	-0.00877

Hole Depth		Stress Depth									
in.	mm	0.022	0.024	0.026	0.028	0.030	0.032	0.034	0.036	0.038	0.040 in.
		0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00 mm
0.022	0.55	-0.00464									
0.024	0.60	-0.00543	-0.00411								
0.026	0.65	-0.00604	-0.00485	-0.00364							
0.028	0.70	-0.00655	-0.00544	-0.00431	-0.00316						
0.030	0.75	-0.00693	-0.00589	-0.00484	-0.00378	-0.00270					
0.032	0.80	-0.00716	-0.00624	-0.00524	-0.00425	-0.00328	-0.00231				
0.034	0.85	-0.00738	-0.00644	-0.00555	-0.00464	-0.00373	-0.00283	-0.00195			
0.036	0.90	-0.00755	-0.00665	-0.00574	-0.00492	-0.00406	-0.00323	-0.00241	-0.00162		
0.038	0.95	-0.00770	-0.00679	-0.00592	-0.00508	-0.00432	-0.00353	-0.00277	-0.00203	-0.00131	
0.040	1.00	-0.00781	-0.00690	-0.00605	-0.00521	-0.00448	-0.00374	-0.00300	-0.00234	-0.00167	-0.00103

Table 5(b) Hole-Drilling Calibration Matrix b for a 1/16 in. Type A Rosette with a 0.080 in. (2 mm) Hole^a

Hole Depth		Stress Depth									
in.	mm	0.002	0.004	0.006	0.008	0.010	0.012	0.014	0.016	0.018	0.020 in.
		0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50 mm
0.002	0.05	-0.01264									
0.004	0.10	-0.01470	-0.01352								
0.006	0.15	-0.01656	-0.01554	-0.01414							
0.008	0.20	-0.01821	-0.01735	-0.01611	-0.01449						
0.010	0.25	-0.01967	-0.01897	-0.01789	-0.01642	-0.01458					
0.012	0.30	-0.02092	-0.02038	-0.01946	-0.01815	-0.01647	-0.01439				
0.014	0.35	-0.02197	-0.02159	-0.02083	-0.01968	-0.01815	-0.01624	-0.01395			
0.016	0.40	-0.02308	-0.02256	-0.02182	-0.02112	-0.01952	-0.01778	-0.01576	-0.01348		
0.018	0.45	-0.02400	-0.02351	-0.02280	-0.02202	-0.02072	-0.01917	-0.01735	-0.01525	-0.01289	
0.020	0.50	-0.02481	-0.02434	-0.02366	-0.02273	-0.02167	-0.02031	-0.01868	-0.01678	-0.01460	-0.01216
0.022	0.55	-0.02554	-0.02507	-0.02440	-0.02362	-0.02235	-0.02103	-0.01981	-0.01793	-0.01599	-0.01386
0.024	0.60	-0.02616	-0.02571	-0.02505	-0.02428	-0.02305	-0.02177	-0.02045	-0.01890	-0.01715	-0.01522
0.026	0.65	-0.02668	-0.02625	-0.02561	-0.02487	-0.02364	-0.02239	-0.02109	-0.01949	-0.01813	-0.01623
0.028	0.70	-0.02715	-0.02673	-0.02611	-0.02536	-0.02417	-0.02294	-0.02164	-0.02012	-0.01866	-0.01708
0.030	0.75	-0.02753	-0.02713	-0.02653	-0.02582	-0.02463	-0.02341	-0.02213	-0.02064	-0.01911	-0.01767
0.032	0.80	-0.02789	-0.02749	-0.02690	-0.02620	-0.02502	-0.02382	-0.02256	-0.02108	-0.01969	-0.01807
0.034	0.85	-0.02821	-0.02781	-0.02722	-0.02652	-0.02536	-0.02417	-0.02292	-0.02146	-0.02007	-0.01850
0.036	0.90	-0.02848	-0.02809	-0.02750	-0.02682	-0.02565	-0.02447	-0.02324	-0.02176	-0.02041	-0.01885
0.038	0.95	-0.02871	-0.02832	-0.02774	-0.02706	-0.02591	-0.02473	-0.02350	-0.02204	-0.02067	-0.01916
0.040	1.00	-0.02889	-0.02851	-0.02794	-0.02727	-0.02612	-0.02495	-0.02373	-0.02227	-0.02089	-0.01940

Hole Depth		Stress Depth									
in.	mm	0.022	0.024	0.026	0.028	0.030	0.032	0.034	0.036	0.038	0.040 in.
		0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00 mm
0.022	0.55	-0.01156									
0.024	0.60	-0.01310	-0.01081								
0.026	0.65	-0.01430	-0.01226	-0.01013							
0.028	0.70	-0.01531	-0.01345	-0.01149	-0.00944						
0.030	0.75	-0.01608	-0.01439	-0.01260	-0.01073	-0.00875					
0.032	0.80	-0.01652	-0.01511	-0.01344	-0.01172	-0.00995	-0.00812				
0.034	0.85	-0.01698	-0.01549	-0.01408	-0.01251	-0.01089	-0.00921	-0.00747			
0.036	0.90	-0.01736	-0.01590	-0.01441	-0.01312	-0.01159	-0.01004	-0.00847	-0.00688		
0.038	0.95	-0.01769	-0.01624	-0.01480	-0.01340	-0.01213	-0.01072	-0.00928	-0.00781	-0.00632	
0.040	1.00	-0.01796	-0.01655	-0.01511	-0.01367	-0.01249	-0.01121	-0.00989	-0.00856	-0.00719	-0.00581

Obrazek 52 Graf kalibračních koeficientů pro různici typu A

Prvním krokem u Tikhonovy regulace je stanovení standartní chyby u transformovaných uvolněných deformací.

$$p_{std}^2 = \sum_{j=1}^{n-3} \frac{(p_j - 3p_{j+1} + 3p_{j+2} - p_{j+3})^2}{20(n-3)} \quad (30)$$

$$q_{std}^2 = \sum_{j=1}^{n-3} \frac{(q_j - 3q_{j+1} + 3q_{j+2} - q_{j+3})^2}{20(n-3)} \quad (31)$$

$$t_{std}^2 = \sum_{j=1}^{n-3} \frac{(t_j - 3t_{j+1} + 3t_{j+2} - t_{j+3})^2}{20(n-3)} \quad (32)$$

Dále se sestrojí tři – diagonální matice druhé derivace \mathbf{c} , která je celá nulová krom hodnot $[-1 \ 2 \ -1]$ položených podél hlavní diagonály této matice. Pouze první a poslední řádek bude celý nulový a počet řádků a sloupců této matice musí odpovídat maximálnímu počtu přírůstků hloubky. Příklad takové matice je uveden ve vzorci (33).

$$\mathbf{c} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (33)$$

Poté se rovnice (27) až (29) upraví na tvar, kde vystupuje i matice druhých derivací \mathbf{c} .

$$(\bar{\mathbf{a}}^T \bar{\mathbf{a}} + \alpha_p \mathbf{c}^T \mathbf{c})P = \frac{E}{1 + \mu} \bar{\mathbf{a}}^T \mathbf{p} \quad (34)$$

$$(\bar{\mathbf{b}}^T \bar{\mathbf{b}} + \alpha_Q \mathbf{c}^T \mathbf{c})Q = E \bar{\mathbf{b}}^T \mathbf{q} \quad (35)$$

$$(\bar{\mathbf{b}}^T \bar{\mathbf{b}} + \alpha_T \mathbf{c}^T \mathbf{c})T = E \bar{\mathbf{b}}^T \mathbf{t} \quad (36)$$

Hodnoty α_p , α_Q a α_T slouží k regulaci vyhlazení funkce výsledných napětí a dle normy se doporučuje pro prvotní výpočet zvolit pro všechny 3 faktory hodnoty od 10^{-4} do 10^{-6} . V případě dosazení pouhých nul se získají shodné výsledky jako v případě neregulovaných výpočtů dle vzorců (27) až (29).

Následně již lze z rovnic (34) až (36) po úpravě dopočítat hodnoty transformovaných zbytkových napětí P , Q a T .

Jelikož použité uvolněné deformace jsou neregulované, vypočtené hodnoty transformovaných uvolněných deformací P , Q a T neodpovídají při zpětném přepočtu dle upravených rovnic (27) až (29) naměřeným deformacím. Proto je nutné dopočítat rozdíl mezi deformacemi před a po regulaci.

$$\mathbf{p}_{misfit} = \mathbf{p} - \frac{1 + \mu}{E} \bar{\mathbf{a}} P \quad (37)$$

$$\mathbf{q}_{misfit} = \mathbf{q} - \frac{1}{E} \bar{\mathbf{b}} Q \quad (38)$$

$$\mathbf{t}_{misfit} = \mathbf{t} - \frac{1}{E} \bar{\mathbf{b}} T \quad (39)$$

Poté se z rovnic (37) až (39) dopočítali střední hodnoty těchto vektorů.

$$p_{rms}^2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (p_{misfit})_j^2 \quad (40)$$

$$q_{rms}^2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (q_{misfit})_j^2 \quad (41)$$

$$t_{rms}^2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (t_{misfit})_j^2 \quad (42)$$

Jestli jsou výsledné hodnoty rovnic (40) až (42) v rozmezí do 5% od hodnot z rovnic (30) až (32), pak jsou výsledná transformovaná napětí P , Q a T dostatečně přesná.

$$chyba_p = \frac{p_{std}^2 - p_{rms}^2}{p_{std}^2} \cdot 100 \leq 5\% \quad (43)$$

$$chyba_q = \frac{q_{std}^2 - q_{rms}^2}{q_{std}^2} \cdot 100 \leq 5\% \quad (44)$$

$$chyba_t = \frac{t_{std}^2 - t_{rms}^2}{t_{std}^2} \cdot 100 \leq 5\% \quad (45)$$

V případě, že je tato chyba větší než 5%, je nutné změnit regulační faktory a to podle rovnic:

$$(\alpha_P)_{nova} = \frac{p_{std}^2}{p_{rms}^2} (\alpha_P) \quad (46)$$

$$(\alpha_Q)_{nova} = \frac{q_{std}^2}{q_{rms}^2} (\alpha_Q) \quad (47)$$

$$(\alpha_T)_{nova} = \frac{t_{std}^2}{t_{rms}^2} (\alpha_T) \quad (48)$$

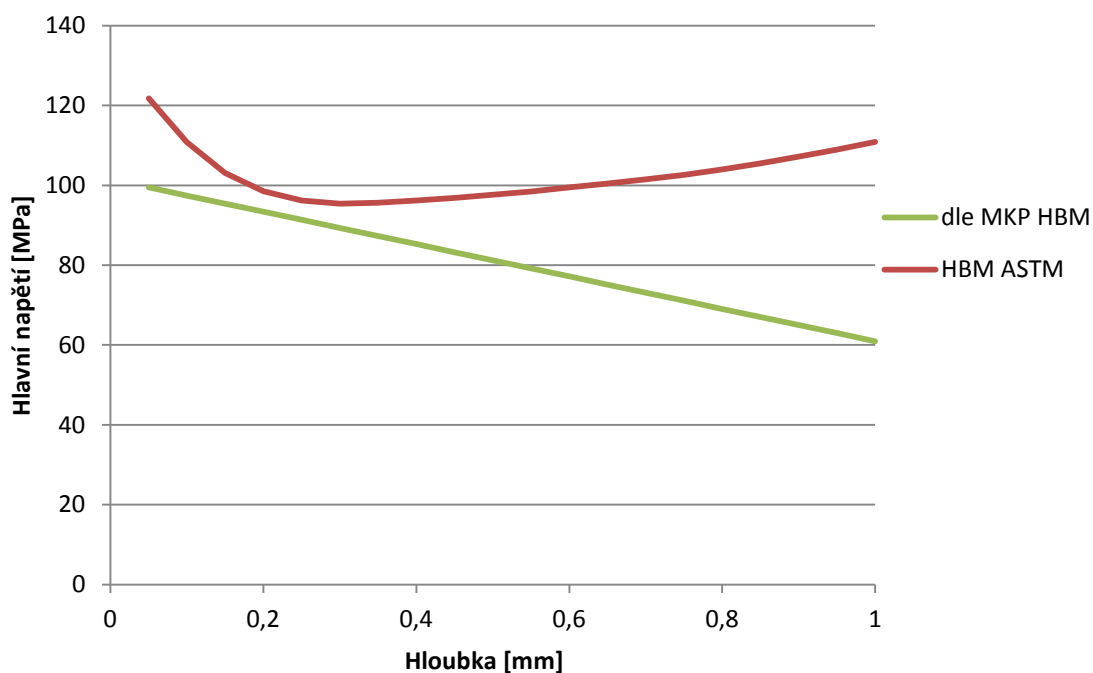
Rovnice (34) až (48) se opakují do té doby, než je dosaženo požadované přesnosti mezi p_{std}^2 a p_{rms}^2 , q_{std}^2 a q_{rms}^2 , t_{std}^2 a t_{rms}^2 do 5%.

Nakonec již lze z regulovaných transformovaných uvolněných napětí dopočítat velikosti hlavních napětí.

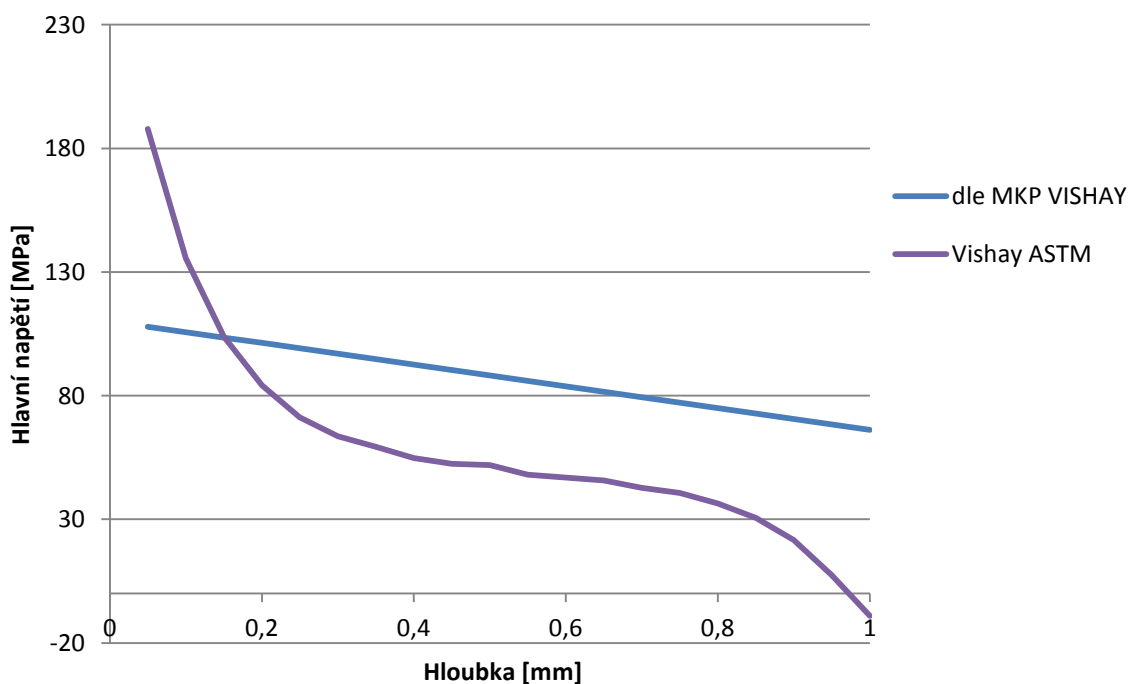
$$\sigma_{max}, \sigma_{min} = P_k \pm \sqrt{Q_k^2 + T_k^2} \quad (49)$$

Hloubka [mm]	Vishay			HBM		
	ASTM [MPa]	z MKP [MPa]	Chyba [%]	ASTM [MPa]	z MKP [MPa]	Chyba [%]
0,05	187,809	107,9	74,1	121,759	99,5	22,4
0,10	135,565	105,7	28,3	110,76	97,4	13,7
0,15	103,822	103,5	0,3	103,08	95,4	8,1
0,20	84,142	101,4	17,0	98,522	93,4	5,5
0,25	71,242	99,2	28,2	96,188	91,4	5,2
0,30	63,538	97	34,5	95,426	89,3	6,9
0,35	59,276	94,8	37,5	95,608	87,3	9,5
0,40	54,725	92,6	40,9	96,181	85,3	12,8
0,45	52,488	90,4	41,9	96,86	83,2	16,4
0,50	51,976	88,2	41,1	97,645	81,2	20,3
0,55	48,023	86	44,2	98,48	79,2	24,3
0,60	46,922	83,8	44,0	99,455	77,2	28,8
0,65	45,73	81,6	44,0	100,478	75,1	33,8
0,70	42,714	79,4	46,2	101,47	73,1	38,8
0,75	40,647	77,2	47,3	102,61	71,1	44,3
0,80	36,428	75	51,4	103,958	69	50,7
0,85	30,599	72,8	58,0	105,498	67	57,5
0,90	21,662	70,6	69,3	107,178	65	64,9
0,95	7,382	68,4	89,2	108,957	63	72,9
1,00	-9,024	66,2	113,6	110,857	60,9	82,0

Tabulka 10 Srovnání dpočítaných hlavních napětí dle ASTM s hodnotami získaných z MKP



Obrázek 53 Grafické srovnání hlavních napětí dle normy ASTM a hodnotami z MKP pro různici HBM



Obrázek 54 Grafické zobrazení hlavních napětí dle normy ASTM a hodnotami z MKP pro různici Vishay

V tabulce 10 jsou vypsány hodnoty hlavních napětí vypočítaných dle americké normy ASTM a to ze změřených uvolněných deformací pro obě dvě použité různice. Zároveň jsou v tabulce uvedeny i hodnoty ohybových napětí odečtených z MKP modelu (v tabulce 10 označeny jako „z MKP“), se kterými se výsledky dle normy ASTM srovnávaly.

Na obrázku 53 lze vidět graficky znázorněné porovnání mezi hodnotou napětí vypočítané dle normy ASTM z uvolněných napětí získaných z experimentu a hodnotou

ohybového napětí získaného z numerického modelu v závislosti na hloubce odvrtné díry u růžice firmy HBM. Velikost této chyby se v hloubce od zhruba 0,5mm markantně zvyšuje až k hodnotě 80% v hloubce 1mm.

V případě růžice Vishay (obr. 54) je rozdíl ve výsledcích ještě větší, neboť průměrná chyba mezi hloubkou 0,3mm až 0,9mm činí zhruba 50%. V krajních polohách díry tento rozdíl narůstá až na průměrných 90%.

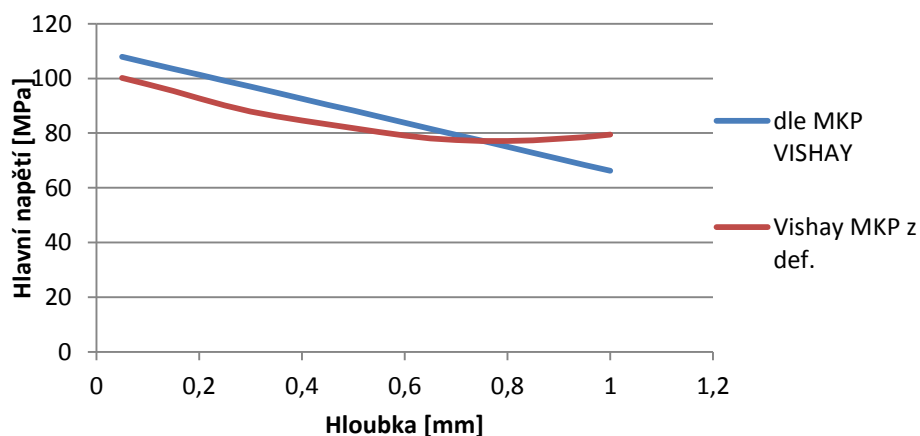
Jelikož není možné zhodnotit, jestli je důvodem takto markantních rozdílů chybná metodika výpočtu, špatná volba kalibračních koeficientů, či snad chyba v samotném experimentu, bude v následující podkapitole aplikována metodika výpočtu popsaná v normě ASTM E837-13a včetně uvedených kalibračních koeficientů na zjištěné uvolněné deformace z numerického výpočtu (tabulka 4 a 5). Výstupem budou hodnoty hlavních napětí v jednotlivých hloubkách, které se následně porovnájí s ohybovými napětími odečtenými přímo z MKP modelu. V případě, že si budou tyto výsledky blízké, bude možné zhodnotit příčinu vzniku tak vysokých chyb vykreslených na obrázku 53 a 54.

8.2.2 Kontrola metodiky výpočtu na MKP modelu

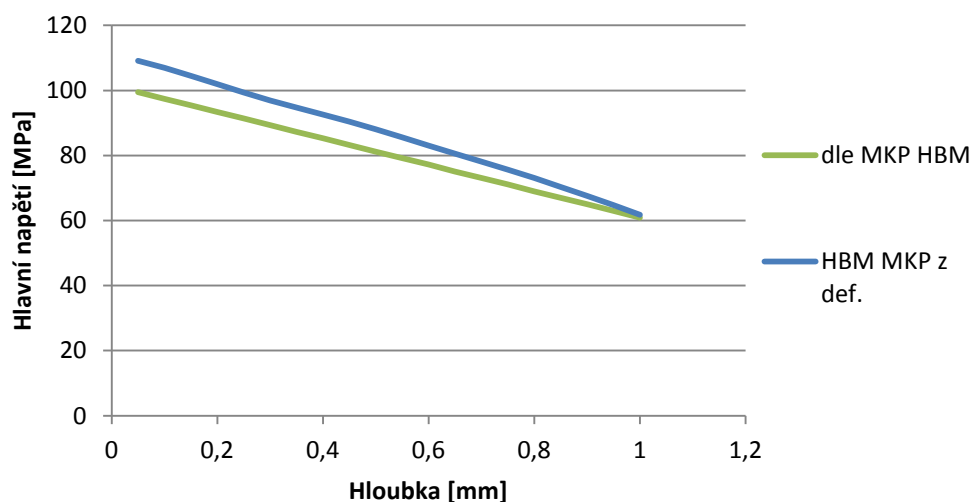
Jak bylo uvedeno v předchozí kapitole, pro kontrolu metodiky se použily hodnoty uvolněných deformací pro růžice Vishay a HBM z numerického výpočtu uvedené v tabulce 4 a 5, které se dosadily do rovnic (30) až (49). Tím se získaly výsledné maximální hodnoty uvolněných napětí, které se následně srovnávaly s referenčními hodnotami ohybových napětí získaných přímo z MKP modelu.

Hloubka [mm]	Vishay			HBM		
	DEF. z MKP [MPa]	z MKP [MPa]	Chyba [%]	DEF. z MKP [MPa]	z MKP [MPa]	Chyba [%]
0,05	100,164	107,9	7,2	109,136	99,5	9,7
0,10	97,906	105,7	7,4	106,922	97,4	9,8
0,15	95,43	103,5	7,8	104,542	95,4	9,6
0,20	92,744	101,4	8,5	101,969	93,4	9,2
0,25	90,146	99,2	9,1	99,372	91,4	8,7
0,30	87,927	97	9,4	96,935	89,3	8,5
0,35	86,135	94,8	9,1	94,709	87,3	8,5
0,40	84,611	92,6	8,6	92,578	85,3	8,5
0,45	83,187	90,4	8,0	90,397	83,2	8,7
0,50	81,777	88,2	7,3	88,072	81,2	8,5
0,55	80,374	86	6,5	85,578	79,2	8,1
0,60	79,119	83,8	5,6	83,033	77,2	7,6
0,65	78,115	81,6	4,3	80,529	75,1	7,2
0,70	77,433	79,4	2,5	78,075	73,1	6,8
0,75	77,114	77,2	0,1	75,609	71,1	6,3
0,80	77,125	75	2,8	73,05	69	5,9
0,85	77,407	72,8	6,3	70,364	67	5,0
0,90	77,913	70,6	10,4	67,566	65	3,9
0,95	78,591	68,4	14,9	64,702	63	2,7
1,00	79,447	66,2	20,0	61,819	60,9	1,5

Tabulka 11 Hodnoty výsledných napětí z konečnoprvkového modelu



Obrázek 55 Grafické srovnání výsledů pro různé Vishay



Obrázek 56 Grafické srovnání pro různici HBM

Tabulka 11 uvádí výsledné srovnání mezi napětími spočítanými metodikou uvedenou v normě ASTM E837-13a pro naměřené deformace z MKP (v tabulce označeno „DEF. z MKP“) s ohybovými napětími odečtenými přímo z MKP (označeno „z MKP“).

Na obrázku 55 lze vidět grafické srovnání napětí pro různici Vishay z dat uvedených v tabulce 11. Největší rozdíl mezi zjištěnými daty byl 20%, avšak pouze v konečných 2 odvtávacích krocích. V ostatních hloubkách chyba činí maximálně 9%, což ve srovnání s výsledky z experimentu, kde byla průměrná chyba 50%, činí výrazné zlepšení.

V případě grafického srovnání různice HBM uvedeného na obrázku 56 lze vidět, že průběh obou výsledků je téměř totožný a průměrný rozdíl mezi napětími činí 8%. V případě dat získaných z experimentu činila tato chyba v průměru 40%.

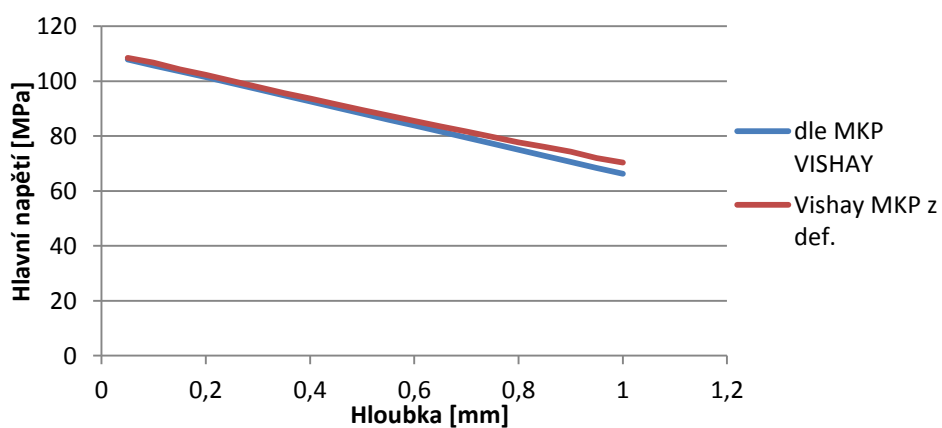
Závěr z těchto výsledků je takový, že použitá metodika dle normy ASTM, jakožto i uvedené doporučené matice kalibračních koeficientů, vykazuje dobrou shodu s referenčními hodnotami ohybových napětí odečtených přímo z MKP. To zavádí předpoklad, že výrazné chyby v případě hlavních napětí vypočítaných z dat z experimentu jsou způsobeny samotnou velikostí deformací z tohoto experimentu. Možností vzniku takovýchto chyb je celá řada a jejich odhalení by vyžadovalo nový experiment.

8.2.3 Výpočet nových kalibračních koeficientů

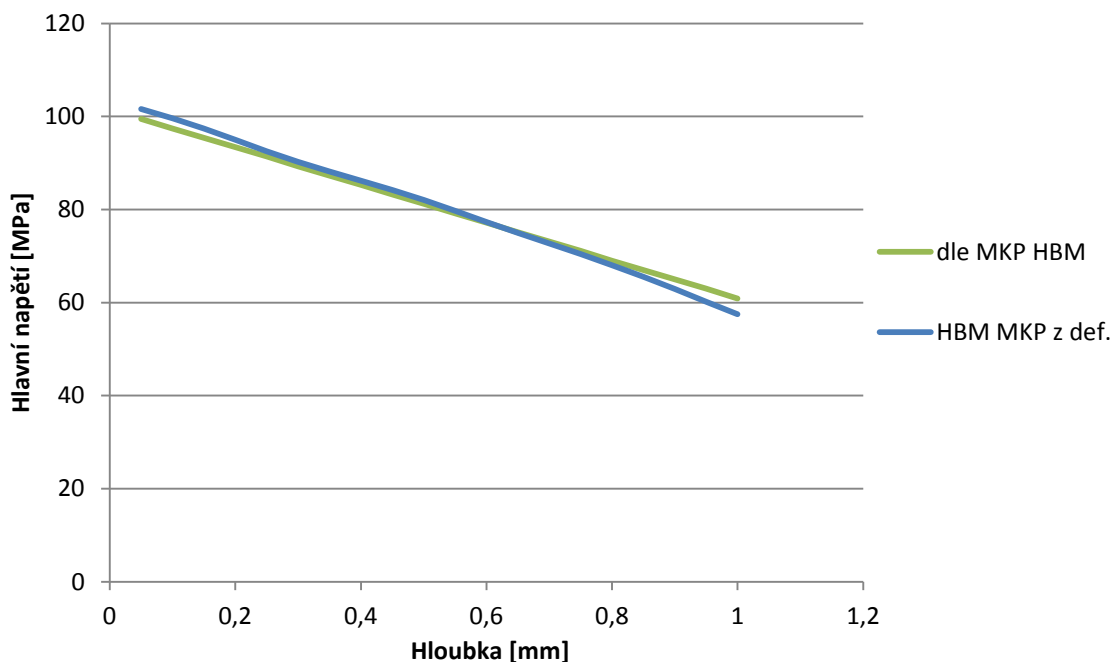
Jelikož bylo zjištěno, že výsledky z experimentu se v případě výpočtů pro nelineární rozložení dle normy ASTM výrazně liší oproti výsledkům z numerických výpočtů, budou nově navržené matice kalibračních koeficientů aplikovány pouze u výpočtů pro řešení zbytkového napětí pro uvolněné deformace naměřené přímo z MKP modelu. Celý postup stanovení nových koeficientů je podrobně rozebrán v literatuře [13] a [14].

Hloubka [mm]	Vishay			HBM		
	DEF. z MKP [MPa]	z MKP [MPa]	Chyba [%]	DEF. z MKP [MPa]	z MKP [MPa]	Chyba [%]
0,05	106,41	107,9	0,5	101,62	99,5	2,1
0,10	105,72	105,7	1,0	99,58	97,4	2,2
0,15	104,30	103,5	0,8	97,37	95,4	2,1
0,20	102,28	101,4	0,9	94,96	93,4	1,7
0,25	100,05	99,2	0,9	92,52	91,4	1,2
0,30	97,84	97	0,9	90,25	89,3	1,1
0,35	95,58	94,8	0,8	88,18	87,3	1,0
0,40	92,88	92,6	1,1	86,22	85,3	1,1
0,45	89,95	90,4	1,3	84,20	83,2	1,2
0,50	86,89	88,2	1,5	82,03	81,2	1,0
0,55	83,77	86	1,7	79,70	79,2	0,6
0,60	81,12	83,8	2,1	77,31	77,2	0,1
0,65	79,93	81,6	2,4	74,98	75,1	0,2
0,70	79,66	79,4	2,8	72,71	73,1	0,5
0,75	79,50	77,2	3,2	70,42	71,1	1,0
0,80	78,73	75	3,6	68,04	69	1,4
0,85	77,02	72,8	4,4	65,53	67	2,2
0,90	74,31	70,6	5,3	62,91	65	3,2
0,95	70,98	68,4	5,2	60,21	63	4,4
1,00	67,60	66,2	6,2	57,49	60,9	5,6

Tabulka 12 Srovnání hlavních napětí z MKP a napětí dle nových koeficientů



Obrázek 57 Grafické srovnání výsledných napětí pro různici Vishay



Obrázek 58 Grafické srovnání výsledných napětí pro různici HBM

V tabulce 12 jsou uvedeny hodnoty ohybových napětí odečtených přímo z numerického modelu (označeno „z MKP“) a hodnoty hlavních napětí vypočítaných dle metodiky uvedené v normě ASTM, avšak s použitím nových kalibračních koeficientů (označeno „DEF. z MKP“).

Obrázek 57 vykresluje grafické porovnání mezi ohybovými napětími přímo z MKP a daty získaných z nových koeficientů pro různici Vishay. Největší rozdíl ve výsledcích činí 6%, avšak průměrná chyba se pohybuje v rozmezí 3%. Lze také vidět, že s přibývajícím hloubkou se přesnost koeficientů lehce snižuje.

V případě různice HBM, jak je uvedeno na obrázku 58, jsou výsledky téměř totožné a průměrná chyba po celé hloubce činí zhruba 2%.

Vypočítané kalibrační koeficienty mají oproti koeficientům z normy ASTM vyšší přesnost, avšak pro kontrolu jejich správnosti by bylo vhodné je aplikovat i na data zjištěná z experimentu, což v případě této práce nemůže přinést uspokojivé výsledky. Důvodem je zejména to, že naměřené uvolněné deformace ve směru tenzometrů C se od uvolněných deformací získaných z numerických výpočtů podstatně liší. Tato jistá odchylka v deformacích způsobí velkou chybu ve výsledných vypočítaných napětích a to zejména z důvodu velkého množství odvrtávacích kroků, kdy je matice kalibračních koeficientů špatně numericky podmíněná.

I přesto, že koeficienty dle normy ASTM vykazují menší přesnost než nově dopočtené koeficienty, je maximální chyba ve výsledných napětích oproti referenčním hodnotám v rozmezí do 10%, což je v rámci odvrtávací metody vyhovující.

9. ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo zhodnotit způsoby stanovení zbytkových napětí z dat naměřených odvrtávací metodou. Výpočty těchto napětí se prováděly podle americké normy ASTM E837-13a, která popisuje metodu výpočtu jak pro lineární, tak i pro nelineární rozložení po průřezu materiálu. V této normě jsou zároveň stanoveny i doporučené kalibrační koeficienty pro různé typy použitých růžic. Jedním z úkolů této práce bylo také přepočítat uvedené koeficienty tak, aby lépe vyhovovaly zadání. Poslední částí bylo celkové srovnání získaných dat.

Jako zkoušený materiál byl zvolen nosník stejné pevnosti, který se zatěžoval ohybem. Polotovár tohoto nosníku byl vyráběn válcováním za studena, což znamená, že v objemu materiálu působila jistá nezanedbatelná zbytková napětí, proto bylo nutné před samotným započítáním experimentu nosník důkladně vyžítat, čímž by mělo dojít k eliminaci těchto napětí. Pro měření uvolněných deformací byly zvoleny dvě tenzometrické růžice a to růžice RY61-S firmy HBM a EA-062 firmy Vishay. Tyto růžice byly umístěny v dostatečné vzdálenosti od sebe, aby nedošlo k vzájemnému ovlivnění naměřených dat.

Po sestavení a zapojení celého experimentu (obr. 28) byl nosník zatěžován do doby, než na tenzometrech umístěných podél osy nosníku (tzn. A) byla naměřena hodnota $476\mu\text{S}$, což odpovídalo napětí 100MPa v krajních vláknech měřené součásti. Následně se hodnoty naměřených deformací vynulovaly a přešlo se k samotnému odvrtávání otvorů. Při každém určitém přírůstku hloubky se odvrtávání přerušilo, aby bylo možno odečíst velikost naměřených uvolněných deformací. Tento postup se opakoval až do hloubky 1mm .

Následovalo sestavení numerického modelu, který měl za úkol podat přesné informace o průběhu uvolněných deformací na součásti bez jakýchkoliv vnitřních vad a zbytkových napětí. Kvůli získání co nejpřesnějších dat bylo vytvořeno 21 modelů pro hloubky od 0 do 1mm po přírůstcích o velikosti $0,05\text{mm}$. Celý výpočet probíhal v programu MSC Patran 2012.2 s řešičem MSC Nastran 2012.2. Pro vysítování byly použity elementy typu Hex8 a jejich průměrný počet pro jednotlivé úlohy byl $410\,000$. Postup přípravy, jakožto samotné odečítání vypočítaných údajů je zobrazen na obrázcích 32 až 44.

Srovnáním uvolněných deformací mezi experimentem a numerikou bylo zjištěno, že v případě růžice HBM (tabulka 4) jsou rozdíly na tenzometrech A a B naprosto minimální, avšak na tenzometru C je tento rozdíl již markantnější, což posléze zapříčinilo velké potíže při stanovení nelineárního rozložení napětí. V případě růžice Vishay (tabulka 5) jsou zjištěné rozdíly mezi tenzometry A a B víceméně podobné a jejich výsledky se liší

průměrně o 10%, avšak opět v případě tenzometru C je tato chyba výraznější a odpovídá chybě průměrně kolem 50%. Vznik těchto rozdílů může být způsoben tím, že během experimentu se postupovalo po odvrtávacích přírůstcích o velikosti zhruba 0,1mm, kdežto norma doporučuje v případě nelineárního rozložení velikost těchto kroků v rozmezí 0,05mm. To mohlo vést k nedostatečně přesnému změření gradientu napětí a tím k částečnému ovlivnění naměřených dat. Dalšími faktory mohou být jisté vřely ve vrtacím zařízení, vysoké opotřebení nástroje, špatné určení nulové hloubky, vycentrování polohy frézy, pohon samotného vrtacího nástroje, kdy nebyla použita doporučovaná vysokootáčková vzduchová fréza, ale elektrická vrtačka a další.

Následně se z experimentu provedl výpočet zbytkových napětí pro metodiku lineárního rozložení po průřezu pro koeficienty dané normou ASTM. Vypočtená data jsou uvedena v tabulce 6. Poté se z údajů z MKP přepočítaly nové kalibrační koeficienty pro lineární rozložení napětí a byly použity pro nový výpočet zbytkových napětí z experimentu. Jako referenční napětí bylo bráno odečtené ohybové napětí z MKP po hloubce materiálu. Výsledné srovnání mezi koeficienty z ASTM a nově dopočítanými koeficienty pro jednotlivé růžice je zobrazeno na obrázku 50 a 51. Obecně lze říci, že nově dopočítané koeficienty dosahují výrazně menší chyby. I přesto je však velikost těchto chyb významná, což je způsobeno tím, že metodika jako taková není pro řešení vhodná, jelikož v případě tohoto experimentu se jedná o rozložení napětí nehomogenní.

Poslední částí tedy bylo vyhodnotit výsledná residuální napětí metodikou pro vyšetřování nehomogenních napětí, neboli metodou integrální. Zde ovšem v případě experimentu nastal problém, jelikož dříve zmíněné malé rozdíly v naměřených a vypočtených deformacích u tenzometru C růžice HBM a všech 3 tenzometrů A, B, C růžice Vishay způsobily vysoké chyby v případě vypočtených napětí (viz obr. 53 a 54). Tato chyba je způsobena hlavně samotnou nepřesností naměřených dat a velkým počtem odvrtávacích přírůstků a to i přesto, že byla použita Tikhonova regulace. Pro kontrolu použité metodiky byly do výpočtů pro zbytková napětí dosazeny hodnoty uvolněných deformací z numerického výpočtu a následně porovnávány s ohybovým napětím odečteným přímo z MKP (obr. 55 a 56, tabulka 11). Bylo zjištěno, že maximální chyba je v tomto případě do 10%, což potvrdilo domněnku, že data z experimentu nejsou pro kontrolu metodiky pro výpočet nelineárního rozložení napětí vhodná. I přesto však byly dle literatury [13] a [14] stanoveny z MKP modelu pro jednotlivé růžice nové kalibrační koeficienty, díky kterým klesla výsledná chyba až na průměrné 3%, viz tabulka 12 a obrázky 57 a 58. Přesto by však bylo vhodné nové koeficienty otestovat na datech zjištěných z experimentu.

Celkově lze shrnout, že nejpřesnější metodou je metoda integrální, neboť i v případě kalibračních koeficientů daných normou ASTM byla přesnost výsledku s chybou do 10%, což je v případě odvrtávací metody dostačující. Avšak i tato metoda sebou přináší jistá úskalí a to hlavně při samotném experimentu, kdy je tato metoda velmi citlivá na jakékoliv faktory ovlivňující přesnost měření, proto se doporučuje striktně dodržet doporučený postup daný normou ASTM E837-13a, neboť v případech malých rozdílů naměřených deformací dochází s přibývajícím hloubkou k velkým rozdílům u vypočtených zbytkových napětí. Proto v případech, kdy je potřeba znát pouze přibližný průběh zbytkových napětí po průřezu může dostatečně pomoci jednodušší, rychlejší a na chyby měření méně citlivá metodika pro homogenní rozložení po průřezu, avšak tyto výsledky je nutné interpretovat s jistou obezřetností.

Seznam použité literatury

- [1] HAVLŮJ, V. – MAREK, P. – POVAŽAN, J. *Vlastní pnutí v ocelových konstrukcích*, ČSVTS, 1979
- [2] VLK, M. – HOUFEK, L. – HLAVOŇ, P. – KREJČÍ, P. – KOTEK, V. – KLEMENT, V. *Experimentální mechanika VUT Brno*, 2003
- [3] *Residual stress measurement based on hole-drilling and ESPI* URL: <http://www.stresstechgroup.com/files/upload_pdf/96172/hd1000f_Prism_standard%20%28ID%2013898%29.pdf>
- [4] BUMBÁLEK, B. – BUMBÁLEK, L. *Zbytková napětí a jejich význam při řešení integrity povrchu*, 2006
- [5] MACURA, P. *Experimentální metody v pružnosti a plasticitě*, VŠB TUO, 2006
- [6] *Experimentální analýza napětí* URL: <<http://www.pruznost.unas.cz/EAN1.pdf>>
- [7] NORMA ASTM E837 – 13a
- [8] AJOVALASIT, A. – SCAFIDI, M. – ZUCCARELLO, B. – BEGHINI, M. – BERTINI, M. – SANTUS, C. – VALENTINI, E. – BENINCASA, E. – BERTELLI, L. *AIAS – TR01 The hole-drilling strain gauge method for the measurement of uniform or non-uniform residual stresses*, 2010
- [9] *Milling Guide for Residual Stress Measurements*, URL: <<http://www.vishaypg.com/docs/11304/rs200.pdf>>
- [10] *Strain gage rosettes: Selection, application and data reducing*, URL: <<http://www.vishaypg.com/docs/11065/tn-515.pdf>>
- [11] *Measurement of residual stresses by the hole-drilling strain gage method*, URL: <<http://www.vishaypg.com/docs/11053/tn503.pdf>>
- [12] ŠVAŘÍČEK, K. *Využití numerických simulací a neuronových sítí ke zdokonalení odvrtávací metody zjišťování zbytkové napjatosti*, VUT Brno, 2007
- [13] SCHAJER, G. S. *Measurement of non-uniform residual stresses using the hole drilling method. Part I – Stress calculation procedures* URL: <<http://www.scribd.com/doc/96684221/Measurement-of-Non-Uniform-Residual-Stresses-Using-the-Hole-Drilling-Method-Part-I-%C2%AAStress-Calculation-Procedures>>
- [14] SCHAJER, G. S. *Measurement of non-uniform residual stresses using the hole drilling method. Part II – Practical application of the integral method*, Journal of Engineering Materials and Technology, 1988

Seznam příloh

- Příloha **A** – Postup pro výpočet lineárního rozložení zbytkových napětí po průřezu materiálu dle koeficientů uvedených v normě ASTM E837-13a.
- Příloha **B** – Postup pro výpočet nelineárního rozložení zbytkových napětí po průřezu materiálu dle koeficientů uvedených v normě ASTM E937-13a.

Poděkování

Touto cestou bych chtěl velice poděkovat vedoucímu diplomové práce Ing. Františku Fojtíkovi, Ph.D. za jeho vstřícný přístup a cenné rady, bez kterých by tato práce nemohla vzniknout.