

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra pružnosti a pevnosti

Aplikace laserového přístroje Q100 pro měření 3D deformací
Application of Laser Sensor Q100 for 3D Strain Measurement

Student:

Daniel Vlček

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Radim Halama, Ph.D.

Ostrava 2014

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra pružnosti a pevnosti

Zadání bakalářské práce

Student: **Daniel Vlček**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 3901R003 Aplikovaná mechanika
Téma: Aplikace laserového přístroje Q100 pro měření 3D deformací
Application of Laser Sensor Q100 for 3D Strain Measurement

Zásady pro vypracování:

- 1) Popis principu a aplikace metody ESPI
- 2) Návrh srovnávacího měření
- 3) Realizace měření na trhačím stroji TESTOMETRIC 500-50CT
- 4) Modelování provedené zkoušky pomocí MKP
- 5) Vyhodnocení vhodnosti metody pro vybrané aplikace

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] TREBUŇA F., ŠIMČÁK F. Průručka experimentální mechaniky. Edice vedeckej a odbornej literatury, 1528 stran, Technická univerzita v Košiciach, Košice, 2008.
- [2] ANSYS® Academic Teaching Advanced, Release 14.0, Help System ANSYS, Inc.
- [3] ČSN ISO 690 Bibliografické citace. Obsah, forma a struktura. Praha: Český normalizační institut, 1996. 32 s.
- [4] Dokumentace k přístroji Dantec Dynamics Q100, Dantec Dynamics a Nova Instruments company, 2012. [<http://www.dantecdynamics.com/>]

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

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Radim Halama, 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

Místopřísežné prohlášení studenta

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

V Ostravě: 19.5.2014



Podpis studenta

Prohlašuji, že

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

V Ostravě:

19.5.2014



Podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce: Daniel Vlček

Adresa trvalého pobytu autora práce: Valašské Klobouky

Smolína 83

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Vlček, D. *Aplikace laserového přístroje Q100 pro měření 3D deformací: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra pevnosti a pružnosti, 2014, Vedoucí práce: Halama, R.

Tato bakalářská práce se zaměřuje na přesnost a použitelnost optického tenzometru Dantec Dynamics Q100 v praxi. Pro verifikaci přesnosti metody ESPI byl realizován kvazistatický test na duralovém vzorku při čtyřbodovém ohybu na přístroji TESTOMETRIC 500-50CT. Výsledky experimentu byly srovnány s výsledky analytického a numerického výpočtu. Pro numerickou analýzu byla zvolena metoda konečných prvků (MKP), která byla provedena v programu ANSYS 15. Poznatky z uvedené studie umožnily vyhodnocení dvou praktických úloh. První řešenou úlohou bylo stanovení kontur přetvoření u kompozitu namáhaného na smyk, druhým případem pak experimentální analýza napětí na pantu průmyslové pračky. Závěrem jsou formulovány výhody přístroje a nejpodstatnější omezení pro jeho použití.

ANNOTATION OF THESIS

Vlček, D. *Application of Laser Sensor Q100 for 3D Strain Measurement: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava. Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanics of Materials, 2014. Thesis head: Halama, R.

The Bachelor's thesis is focused on accuracy and applicability of the optical strain gauge Dantec Dynamics Q100 in practice. To verify accuracy of the method ESPI was realized quasi-static test on duralumin sample during four-point bend on TESTOMETRIC 500-50CT device. Results of experiment were compared with results of analytic and numeric evaluation. For numeric analysis was chosen method of finite elements (MKP) which was done in software ANSYS 15. Findings of mentioned study allowed the evaluation of two practical problems. First solved problem was determine the role of contour deformation of composites loaded in shear, second one was experimental analysis of tension on hinge of industry washing machine. At the end are formulated advantages of device and the most important restrictions for its use.

OBSAH

SEZNAM POUŽITÉHO ZNAČENÍ.....	9
1 Úvod	11
1.1 Holografie	11
1.2 Metoda ESPI	12
1.3 Přístroj Q100	12
1.3.1 Měření pomocí přístroje Q100	13
1.3.2 Technické parametry přístroje Q100	14
2 Návrh srovnávacího měření	14
2.1 Vhodnost čtyřbodového ohybu	14
2.2 Čtyřbodový ohyb.....	14
2.3 Popis realizace úloh.....	15
3 TESTOMETRIC 500-50CT	15
4 Realizace měření.....	17
5 Analytický výpočet pro úlohy č. 1 a č. 2	19
5.1 Úloha č. 1	19
5.1.1 Průběhy vnitřních silových účinků	19
5.1.2 Výpočet napětí	21
5.2 Úloha č. 2	22
5.2.1 Výpočet napětí	24
6 Vyhodnocení měřených experimentů	27
6.1 Úloha č. 1	27
6.1.1 Vyhodnocení napětí	27
6.1.2 Přímmost průřezu.....	28
6.1.3 Průhybová čára	29
6.1.4 Směry hlavních napětí	30

6.2 Úloha č. 2	31
6.2.1 Smykové napětí	31
6.2.2 Průběh posuvů	32
6.2.3 Směry hlavních napětí	32
7 Numerické řešení	34
7.1 Úloha č. 1	34
7.1.1 Geometrie	34
7.1.2 Konečnoprvkový model	35
7.1.3 Konečno prvková síť	35
7.1.4 Okrajové podmínky a kontakty	36
7.1.5 Výsledky	36
7.2 Úloha č. 2	38
7.2.1 Konečno prvkový model	38
7.2.2 Výsledky	39
8 Vyhodnocení výsledků	41
8.1 Úloha č. 1	41
8.1.1 Vyhodnocení normálového napětí	41
8.1.2 Kontrola přímosti průřezu	43
8.1.3 Kontrola průhybové čáry	44
8.1.4 Srovnání hlavních napětí	45
8.2 Úloha č. 2	45
8.2.1 Vyhodnocení smykového napětí	46
8.2.2 Vyhodnocení posuvů ve směru osy x	47
8.2.3 Srovnání hlavních napětí	48
9 Aplikace přístroje Q100 v praxi	49
9.1 Ukázka číslo 1	49

9.1.1 Zkouška namáhání smykem	49
9.1.2 Výsledky	50
9.2 Ukázka č.2	54
9.2.1 Naměřené výsledky	54
10 Závěr	56
11 Seznam použité literatury	58

SEZNAM POUŽITÉHO ZNAČENÍ

Symbol	Význam	Jednotka
L_1	Délka nosníku	[mm]
L_2	Vzdálenost mezi tlačnými válečky	[mm]
L_3	Vzdálenost mezi podpěrnými válečky	[mm]
L_4	Vzdálenost mezi tlačnými válečky	[mm]
L_5	Vzdálenost mezi podpěrnými válečky	[mm]
L_6	Umístění snímače	[mm]
σ_A	Hodnota normálového napětí v místě A	[MPa]
σ_B	Hodnota normálového napětí v místě B	[MPa]
σ_C	Hodnota normálového napětí v místě C	[MPa]
τ_z	Hodnota smykového napětí ve výšce řezu „z“	[MPa]
τ_0	Hodnota smykového napětí ve výšce řezu 0 mm	[MPa]
τ_5	Hodnota smykového napětí ve výšce řezu 5 mm	[MPa]
τ_{10}	Hodnota smykového napětí ve výšce řezu 10 mm	[MPa]
τ_{15}	Hodnota smykového napětí ve výšce řezu 15 mm	[MPa]
τ_{20}	Hodnota smykového napětí ve výšce řezu 20 mm	[MPa]
E_1	Modul pružnosti v tahu válečků	[MPa]
E_2	Modul pružnosti v tahu pro dural	[MPa]
E_3	Modul pružnosti v tahu pantu	[MPa]
μ_1	Poissonova konstanta válečků	-
μ_2	Poissonova konstanta pro dural	-
μ_3	Poissonova konstanta pantu	-
F	Zatěžující síla při čtyřbodovém ohybu	[N]
F_3	Zatěžující síla pantu	[N]
X_0	Poloha středu kružnice	[μ m]
Y_0	Poloha středu kružnice	[μ m]
X_1	Vzdálenost myšleného řezu	[mm]
X_2	Vzdálenost myšleného řezu	[mm]
X_3	Vzdálenost myšleného řezu	[mm]
X^4	Vzdálenost myšleného řezu	[mm]
M	Hodnota ohybového momentu	[M·m]
T	Hodnoty příčných sil	[N]

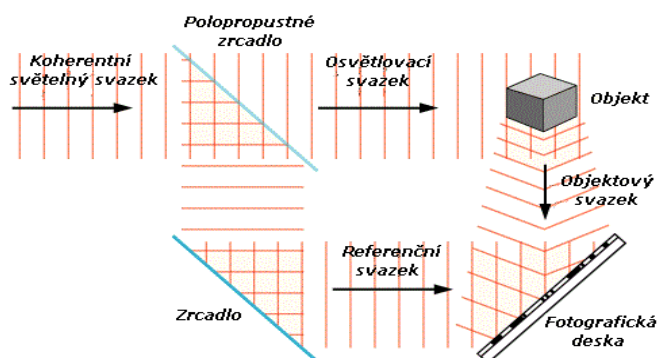
J	Kvadratický moment průřezu	[m ⁴]
b	Šířka nosníku	[mm]
h	Výška nosníku	[mm]
R ²	Hodnota spolehlivosti	-
k	Výška srovnávacího řezu	[mm]
ρ	Velikost poloměru	[μ m]
D	Průměr válečků	[mm]
V3	Kóta výšky nosníku	[mm]
H1	Kóta délky nosníku	[mm]
H9	Kóta polohy podpěrného válečku vůči konci nosníku	[mm]
H12	Kóta polohy podpěrného válečku vůči konci nosníku	[mm]
H4	Kóta polohy tlačného válečku vůči konci nosníku	[mm]
H7	Kóta polohy tlačného válečku vůči konci nosníku	[mm]
D6	Kóta průměru válečku	[mm]
D8	Kóta průměru válečku	[mm]
D10	Kóta průměru válečku	[mm]
D11	Kóta průměru válečku	[mm]
k	Srovnávací výška řezu	[mm]

1 Úvod

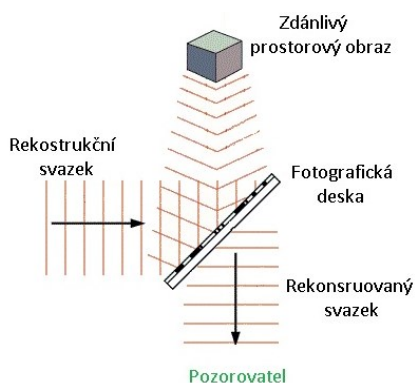
1.1 Holografie

Holografie se zabývá metodami pro záznam a zpětnou rekonstrukci intenzity vln, přičemž tyto vlny mohou být různého druhu: světelné, zvukové, rentgenové anebo korpuskulární (částicové). Tento princip objevil poprvé roku 1948 anglický fyzik Dennis Gábor. Princip této metody spočívá v zachycení všech důležitých informací o vlně, jako je amplituda a fáze, která slouží pro zachycení prostorové struktury dané vlny.

Holografie umožňuje na rozdíl od fotografie trojrozměrný záznam předmětů. Pokud při holografickém záznamu objektu, tedy zaznamenávání fází a amplitud vln ve formě interferenčního světla odraženého od zkoumaného objektu, měníme pozorovací polohu, snímáme objekt pod různými úhly, a proto je vnímám jako trojrozměrný (Obr.1.1).



Obr. .1.1 Holografický záznam objektu



Obr. 1.2 Holografická rekonstrukce objektu

Holografická rekonstrukce objektu je uvedena na Obr. 1.2. Velkým rozvojem této metody bylo vynalezení laseru a mimoosé holografie. Do této doby se experimenty prováděly za pomoci rtuťové lampy, což práci značně komplikovalo. Dalším odrazovým

můstkem bylo holografické zachycování v reálném čase, které ovšem potřebovalo opticky nelineární materiály, ovšem s příchodem digitalizace se začaly používat systémy využívající CCD kamery.

1.2 Metoda ESPI

Celým názvem Electronic Speckle-Pattern Interferometry. Princip spočívá v osvětlení ploch laserovým světlem z více různých směrů, odražené světlo zachytává CCD kamera s vysokým rozlišením. Na takto nasnímaných plochách se projevuje mikrostruktura testovaného povrchu, vzniká tzv. skvrnitý efekt. Tento snímek, se skvrnitým efektem, se využije jako referenční snímek pro následné vyhodnocování, kdy se pomocí korelací posuvů těchto skvrn vyhodnocuje deformace vzorku. Vhodně zvoleným srovnáním a korelací umožňuje vyhodnotit trojrozměrný pohyb kteréhokoliv snímaného bodu. Tenzor deformace lze pak vypočítat v každém bodě. ESPI systém Q100 pomocí řízeného svazků světla vyhodnocuje trojrozměrně deformaci ploch a je plnohodnotným bezkontaktním měřicím systémem, jehož výhodou je jednoduchost měření, rychlost realizace a přesnost. Při konvenčním měření napětí nebo deformací se v průmyslu nejvíce preferuje měření na základě tenzometrie tedy nejčastěji pomocí odporových tenzometrů, ovšem toto měření umožňuje získat pouze bodové hodnoty. Za tímto účelem tedy byl vyvinut nový experimentální způsob měření, který umožňuje snímat průběhy napětí (deformací) v určité oblasti a nejen v určitých bodech.[6]

1.3 Přístroj Q100

Tento přístroj je vyráběn firmou Dantec-Dynamics. Přístroj slouží k rychlému nedestruktivnímu snímání polí deformací a napětí na plochách zkoumaných součástí. Snímací hlava přístroje Q100 viz. Obr. 1.3 se umístí na určenou část povrchu a během několika jednoduchých kroků přístroj deformačně a napět'ově vyhodnotí téměř jakýkoliv povrch. Přístroj zaznamenává a vyhodnocuje veškeré údaje týkající se deformací a napětí, jako jsou: hlavní napětí, smyková napětí, normálová napětí, poměrné deformace, složky posuvů atd. Vyhodnocení všech naměřených údajů probíhá v softwaru Istram.

Stručný popis výhod a nevýhod přístroje Q100:

Výhody:

+ nedestruktivní metoda měření

+ relativně přesné výsledky naměřených hodnot

- + rychlé vyhodnocení výsledků
- + v praxi využitelná za chodu strojů
- + vyhodnocení na určité oblasti nejen jednoho bodu
- + určení směru hlavních napětí
- + umožňuje vyhodnotit napětí i pomocí pevnostních hypotéz

Nevýhody:

- přesnost měření závisí na kvalitě povrchu (náštíku) a osvětlení
- musí se provést několik zatěžovacích kroků
- měření pouze kvazistatických úloh
- pro vyhodnocení některých dat je potřeba provést korekce, příp. vyhlazení dat (především u napětí)



Obr. 1.3 Snímací hlava přístroje Q100 [4]

1.3.1 Měření pomocí přístroje Q100

Po optickém zdrsnění povrchu (náštíku) a následném umístění snímače je povrch součásti osvětlen laserovými paprsky ze čtyř různých míst, odražené, rozptýlené světlo se zaznamenává v centrálním CCD čipu. Tímto způsobem je snímáný povrch zaznamenán s přesností až na $1 \cdot 10^{-6} m$ a navíc tímto způsobem je docíleno trojrozměrného snímání geometrie povrchu. Po zatížení objektu, na kterém je snímač umístěn, stačí pro vyhodnocení napětí znát modul pružnosti v tahu a Poissonovu konstantu (předpoklad izotropního elastického materiálu. [1])

1.3.2 Technické parametry přístroje Q100

Popis důležitých technických parametrů je uveden v Tab. 1.1.

Tab. 1.1 Technické parametry přístroje Q100 [2]

Měřicí rozlišení	
Posunutí	0,3...0,1 μ m
Poměrné deformace	5 \cdot 10 ⁻⁶ ...20 \cdot 10 ⁻⁶
Měřicí plocha	35 x 25 mm
Rozsah měření	1/10 deformace
Prostorové rozlišení	0,5mm
Rozměry snímací hlavy	54 x 54 x 59 mm
Váha měřicí kamery	370 g
Délka měřicího kabelu	4,5 m
Datové rozhraní	TIFF, ASCII, Windows metafile
Operační systém	Windows XP

2 Návrh srovnávacího měření

Srovnávací měření proběhlo na trhacím stroji s označením TESTOMETRIC 500-50CT. Na tomto přístroji byly provedeny dva měřené pokusy s využitím přípravku pro realizaci zkoušky čtyřbodového ohybu. Měření proběhla s jinými zatěžujícími kroky, vzdálenostmi podpěr a zatěžujících válečků a s odlišným umístěním snímače, ovšem na témž vzorku.

2.1 Vhodnost čtyřbodového ohybu

Experiment čtyřbodového ohybu byl zvolen z důvodu následné kontroly naměřených hodnot přístroje Q100, které byly ověřeny analytickými a numerickými výpočty na obou zadaných úlohách. U čtyřbodového ohybu je analytická část výpočtu snadno realizovatelná a pro srovnání výsledků snadno aplikovatelná.

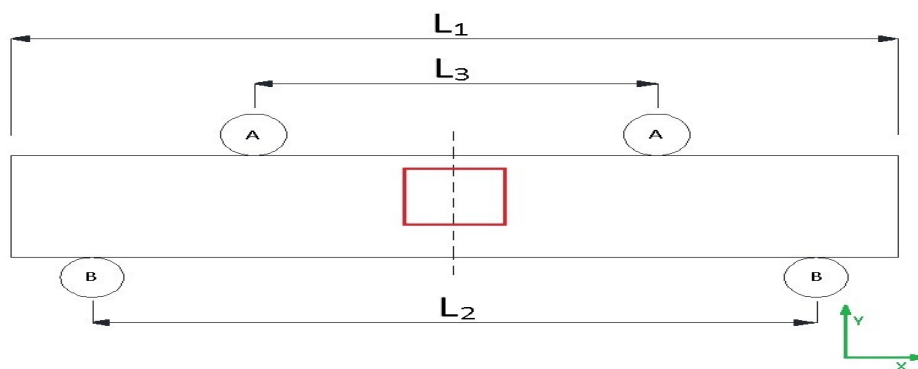
2.2 Čtyřbodový ohyb

Principiálně jde o dvě podpěry, na kterých je umístěn vzorek, a dva prvky, kterými je vzorek ohýbán. V případě našeho experimentu se jednalo z geometrického hlediska podpor i tlačných prvků o válečky, které v určitých místech buďto vzorek podírají, nebo do něj tlačí, průměr všech válečků je stejný a jeho hodnota je $D = 25,1$ mm. Materiál těchto válečků je ocel s materiálovými vlastnostmi: modul pružnosti v tahu $E_1 = 210$ GPa a Poissonovou konstantou $\mu = 0,3$. Vzorek (nosník) je obdélníkového průřezu, se stranami $b = 10$ mm (šířka) a $h = 40$ mm (výška). Při experimentu byl tento nosník postaven na výšku,

byl tedy ohýbán okolo své delší strany. Materiál vzorku je hliníková slitina známá jako dural s materiálovými vlastnostmi: modul pružnosti v tahu $E_2 = 72,5$ GPa a Poissonovou konstantou $\mu = 0,34$.

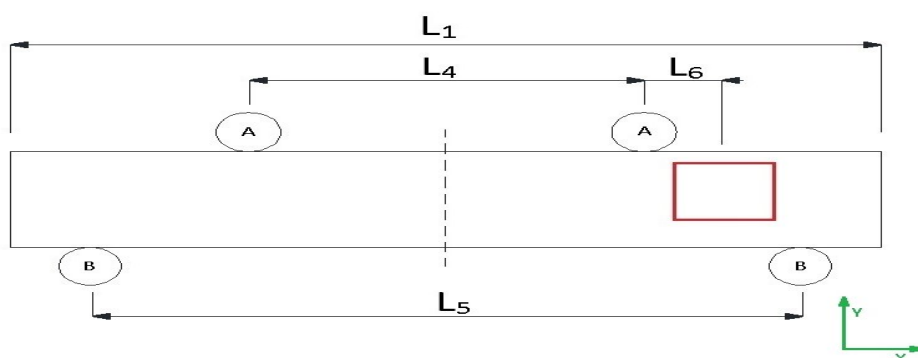
2.3 Popis realizace úloh

Při prvním měření (úloha č. 1) byl snímač Q100 připevněn přesně v polovině délky nosníku viz Obr. 2.1, kdy červený rámeček je plocha snímaného nosníku, válečky „A“ jsou tlačnými a válečky „B“ jsou podpěrné. Kóty L_1 až L_3 označují rozteče válečku a celkovou délku nosníku.



Obr. 2.1 Umístění snímače - úloha č. 1

Při druhém měření (úloha č. 2) byl snímač Q100 umístěn z jedné strany mezi tlačnými a podpěrnými válečky viz Obr. 2.2, změnila se také kóty L_2 a L_3 na L_4 a L_5 a přibyla kóta L_6 udávající polohu snímače.



Obr. 2.2 Umístění snímače - úloha č. 2

3 TESTOMETRIC 500-50CT

Model M500-50CT je stolní dvousloupový univerzální zkušební trhací stroj kompletně řízený přes PC, který je strojově i softwarově konfigurovatelný. Je to plně digitální zkušební

system s vysokou přesností ovládaní a díky automatizovanému řízení se jednoduše ovládá. Součástí stroje jsou samo nastavitelné siloměrné snímače s vysokým rozlišením, které jsou chráněny do osminásobku přetěžující síly. Tuhost rámu přístroje je 200 kN/mm. K tichému a přesto rychlému chodu využívá přístroj předzatížená samočistící kulová ložiska. Podstatné parametry zkušebního stroje jsou uvedeny v tab.3.1.

Tab. 3.1 Technické parametry trhacího stroje TESTOMETRIC [2]

Max. zatížení	50kN
Přesnost	+/- 0.5% až na 1/1000th jejich jmenovité hodnoty
Pracovní prostor-výška v	1180 mm
Dráha příčnicku / rozlišení	980x0.001mm
Pracovní prostor	420 Ø mm
Celková výška	1585 mm
Celková šířka bez displeje	762 mm
Celková hloubka	505 mm
Rozsah rychlosti	0.001 až 1000 mm/min
Přesnost rychlosti	+/- 0.1% za stálých podmínek.
Průměr čepu v mm	30 Ø
Hmotnost	245 kg
Příkon	1 kW
Provozní napětí	115 nebo 230V 1ph 50/60Hz.



Obr. 3.1 Trhací přístroj TESTOMETRIC M500-50CT

4 Realizace měření

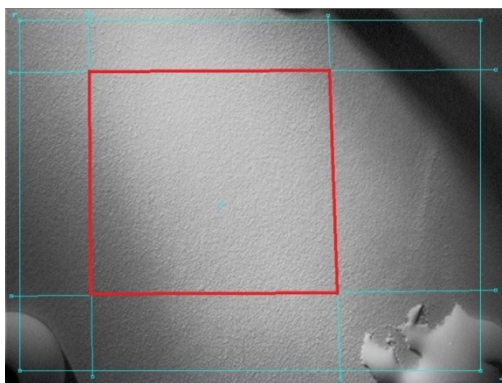
Důležitým a zároveň prvním krokem bylo plánování experimentu, tzn. určení umístění snímače Q100 na nosníku, aby se dosáhlo většího počtu různých výsledků, z tohoto důvodu se prováděly dva experimenty při různém umístění snímače.

Druhým krokem bylo umístění vzorku do přípravku na čtyřbodový ohyb, který byl umístěn v přístroji TESTOMETRIC.

Ve třetím kroku bylo potřeba opticky zdrsnit povrch snímaného nosníku, jelikož byl vzorek pro čtyř bodový ohyb leštěn. Za tímto účelem se používá speciální sprej, který po nanesení na snímanou oblast povrchu, povrch opticky zdrsňuje, zaručuje tedy správné odražení světla od měřeného vzorku.

Čtvrtým krokem bylo umístění snímače na nosník. Jelikož nosník je z duralu, není magnetický a z tohoto důvodu se nemohly použít magnetické úponky, kterými je snímací hlava Q100 vybavena, ale snímač musel být k nosníku přilepen speciálním rychle tvrdnoucím lepidlem, které je k tomuto účelu určeno.

Krokem číslo pět je pořízení referenčního snímku, podle kterého bude povrch nosníku analyzován. Pro pořízení kvalitního referenčního snímku je potřebné správné osvětlení snímané oblasti. Je zapotřebí správná intenzita a úhel dodávaného osvětlení. Je potřebné co nejmenší stínění od podpěr snímače a dalších nerovností na povrchu. V případech zastínění nebo větších nerovností na povrchu je možno vyhodnocovat jen část snímané plochy, na Obr. 4.1 je tato oblast vyznačena červeným čtyřúhelníkem (tzv. border). K referenčnímu snímku patří ještě zachycení referenčního kroku, zachycení fázových interferenčních pruhů. Tuto operaci provedeme tak, že si zvolíme vhodné zatížení podle hustoty interferenčních pruhů a pořídíme referenční snímek.



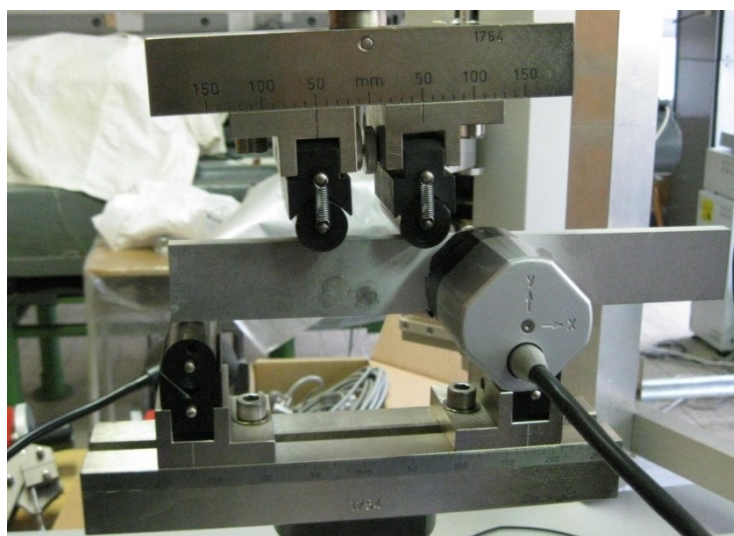
Obr. 4.1 Referenční snímek

Krok číslo šest se zaměřuje na hodnoty a konstanty, které software potřebuje na správné vyhodnocení měření, jako například Poissonovu konstantu, modul pružnosti v tahu nebo vzdálenost snímače od měřeného povrchu.

Krok číslo šest je samotné měření. Důležitým mezikrokem je vynulovat sílu referenčního kroku a začít měření od nulové zatěžující síly. Je potřebné si předem určit výslednou zatěžující sílu, rozdělit ji na několik zátěžných kroků a v každé kroku měření vytvořit snímek. Při okamžitém zatížení na maximální hodnotu přístroj nemá dostatek snímků pro porovnání a výsledky pro další vyhodnocování a výsledky mohou být nepoužitelné.

Krok číslo sedm zahrnuje vyhodnocení a porovnání výsledků. Vyhodnocení probíhá tak že, naměřené výsledky snímané pomocí přístroje Q100 se musí korigovat a upravit tak, aby byly jasně čitelné a použitelné pro porovnání. Výsledky se budou v našem případě porovnávat s analytickými a MKP výpočty.

V dalších krocích by mohly následovat kroky dva až sedm s výjimkou změny umístění snímací hlavy Q100, rozestupu podpěrných a tlačných válců a velikostí zatěžující síly. Na Obr. 4.2 je vidět realizace úlohy č. 2.



Obr. 4.2 Realizace úlohy č. 2

5 Analytický výpočet pro úlohy č. 1 a č. 2

V analytické části se vypočítají hodnoty a průběhy normálového a smykového napětí.

5.1 Úloha č. 1

Měřicí přístroj Q100 je umístěn uprostřed, tedy v polovině délky měřeného nosníku, jak je vidět na Obr. 2.1. Působící síla F byla postupně zvětšována až do hodnoty, kdy síla odpovídala hodnotě $F = 6,5$ kN. Pro tuto hodnotu zatěžující síly byla provedena analytická část výpočtu.

Vzorek, na kterém se dané měření provádělo, byl vyroben z duralu s následujícími materiálovými vlastnostmi:

$E = 72,5$ GPa - modul pružnosti v tahu

$\mu = 0,34$ – Poissonova konstanta

a obdélníkovým průřezem s geometrickými rozměry:

$b = 10$ mm – šířka nosníku

$h = 40$ mm – výška nosníku

$L_1 = 300$ mm – celková délka nosníku

$L_2 = 250$ mm – délka mezi podpěrami

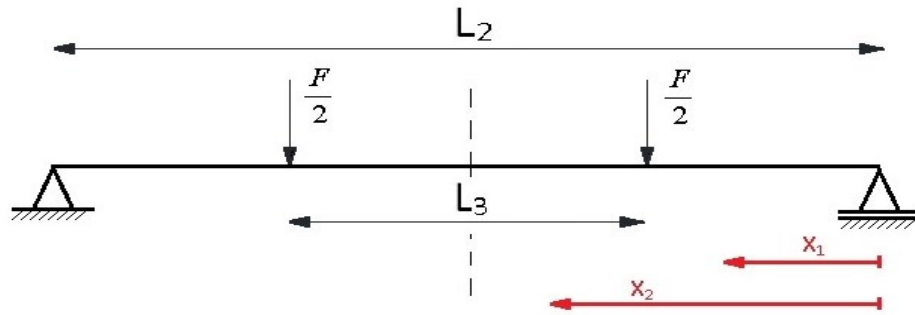
$L_3 = 150$ mm – vzdálenost mezi působišti síly F

V této části řešení není potřebné počítat s celkovou délkou nosníku L_1 , za celkovou délku pro řešení vnitřních statických účinků považujeme vzdálenost L_2 .

Přesné umístění kót bylo uvedeno již na Obr. 2.1.

5.1.1 Průběhy vnitřních silových účinků

Pro zjištění vnitřních silových účinků byla použita metoda myšleného řezu, a jelikož je daná úloha souměrná, stačí dva řezy z jedné strany ve vzdálenosti x_1 a x_2 , jak je znázorněno na Obr. 5.1, kdy řez x_2 probíhá do poloviny nosníku. Druhá strana průběhu bude zrcadlově stejná.



Obr. 5.1 Úloha č. 1 - Znáornění řezů

Řez x_1

$$x_1 \in (0; \frac{l_2}{2} - \frac{l_1}{2})$$

$$M(x_1 \in 0) = \frac{F}{2} \cdot 0 = 0 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (1)$$

$$M(x_1 \in \frac{l_2}{2} - \frac{l_3}{2}) = \frac{F}{2} \cdot (\frac{l_2}{2} - \frac{l_3}{2}) = \frac{F}{2} \cdot (\frac{0,25}{2} - \frac{0,15}{2}) = 162,5 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (2)$$

$$T(x_1 \in 0) = -\frac{F}{2} = -3,25 \text{ kN} \quad (3)$$

$$T(x_1 \in \frac{l_2}{2} - \frac{l_3}{2}) = -\frac{F}{2} = -3,25 \text{ kN} \quad (4)$$

Řez x_2

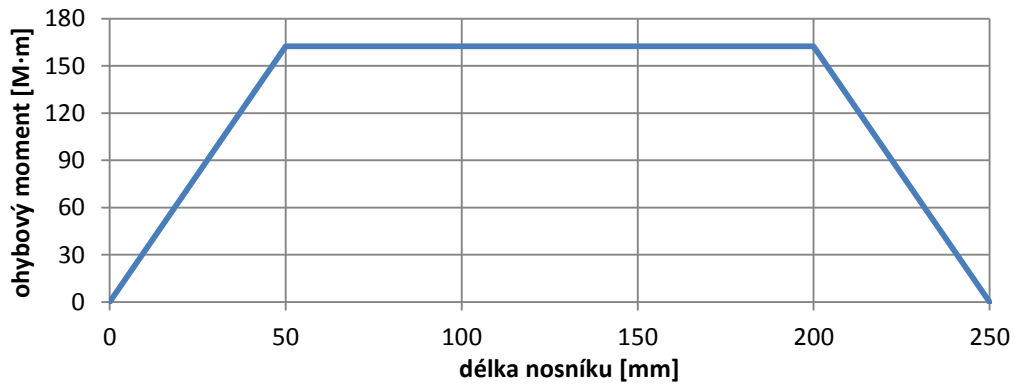
$$x_2 \in (\frac{l_2}{2} - \frac{l_1}{2}; \frac{l_2}{2})$$

$$M(x_2 \in \frac{l_2}{2} - \frac{l_3}{2}) = \frac{F}{2} \cdot (\frac{l_2}{2} - \frac{l_3}{2}) = \frac{F}{2} \cdot (\frac{0,25}{2} - \frac{0,15}{2}) = 162,5 \text{ N} \quad (5)$$

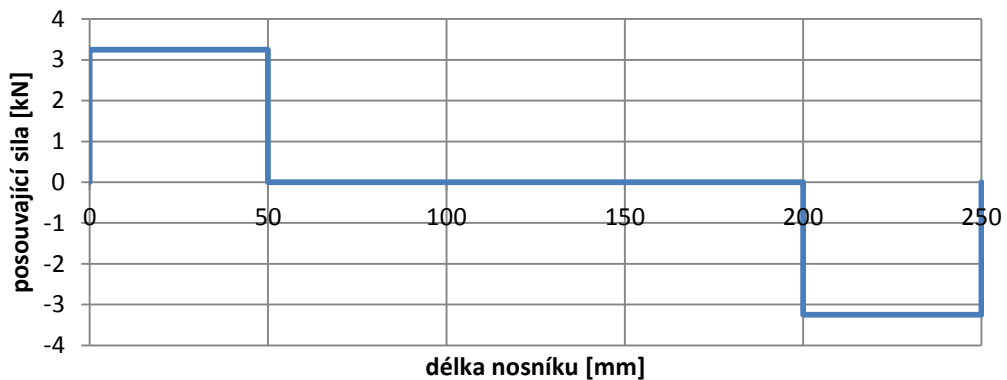
$$M(x_2 \in \frac{l_2}{2}) = \frac{F}{2} \cdot \frac{l_2}{2} - \frac{F}{2} \cdot \frac{l_3}{2} = \frac{F}{2} \cdot \frac{0,25}{2} - \frac{F}{2} \cdot \frac{0,15}{2} = 162,5 \text{ N} \quad (6)$$

$$T(x_1 \in \frac{l_2}{2} - \frac{l_3}{2}) = 0 \text{ kN} \quad (7)$$

$$T(x_1 \in \frac{l_2}{2}) = -\frac{F}{2} + \frac{F}{2} = 0 \text{ kN} \quad (8)$$



Obr. 5.2 Graf průběhu ohybového momentu



Obr. 5.3 Graf průběhu příčných sil

5.1.2 Výpočet napětí

Pro další výpočty je třeba znát kvadratický moment průřezu, který závisí na geometrickém průřezu nosníku. Tuto hodnotu bude potřeba i pro výpočty i v dalších krocích.

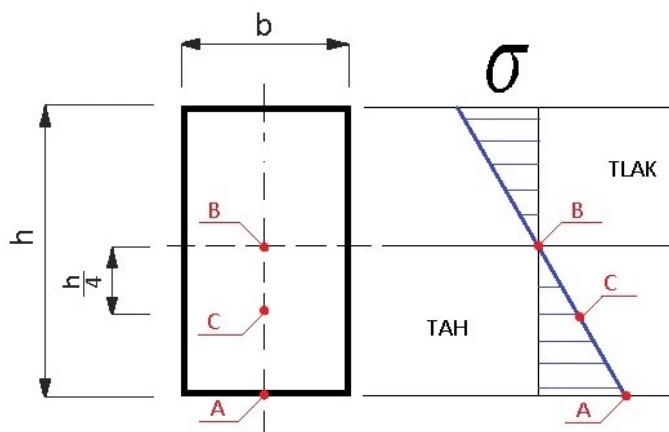
Kvadratický moment průřezu

Pro obdélníkovou geometrii použijeme vztah:

$$J_z = \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3 = \frac{0,01 \cdot 0,04^3}{12} = 5,3 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4 \quad (9)$$

V úloze číslo č. 1, kdy je snímač umístěn uprostřed nosníku, se bude vyhodnocovat pouze normálová složka napětí, jelikož příčné síly uprostřed nosníku jsou rovny nule, tím je rovna nule i smyková složka napětí, viz Obr. 5.3. Jelikož ideální průběh normálového napětí má přímkový charakter a velikosti hodnot v dolní i horní polovině od neutrální osy jsou

stejně, mění se zde pouze znaménka, budou pro srovnání vypočítat tři hodnoty napětí. Místa, ve kterých se budou hodnoty počítat, jsou na Obr. 5.4 označeny písmeny A, B a C.



Obr. 5.4 Lokalizace míst a ideální průběh normálového napětí (úloha č. 2)

1) normálové napětí pro krajní vlákno - místo A:

$$\sigma_A = \frac{M_o}{J_z} \cdot y = \frac{162,5}{5,3 \cdot 10^{-8}} \cdot \frac{0,04}{2} = 61,32 \text{ MPa} \quad (10)$$

2) normálové napětí pro neutrální vlákno - místo B:

$$\sigma_B = \frac{M_o}{J_z} \cdot y = 0 \quad (11)$$

3) normálové napětí pro místo C:

$$\sigma_C = \frac{M_o}{J_z} \cdot y = \frac{162,5}{5,3 \cdot 10^{-8}} \cdot \frac{0,04}{4} = 30,66 \text{ MPa} \quad (12)$$

5.2 Úloha č. 2

Při druhém měření byl přístroj Q100 umístěn mimo střed délky měřeného nosníku. Zatěžující síla F byla postupně zvětšována až do hodnoty $F = 7,2 \text{ kN}$. Pro tuto hodnotu zatěžující síly proběhla analytická část výpočtu.

Pro měření se využil stejný vzorek jako u úlohy číslo 1, tedy materiálové vlastnosti a geometrie průřezu jsou stejné, mění se zde vzdálenosti L_2 a L_3 na L_4 a L_5 , přibývá zde vzdálenost L_6 , která udává polohu měřícího přístroje.

A ani v této části řešení není potřebné počítat s celkovou délkou nosníku L_1 , za celkovou délkou pro řešení vnitřních statických účinků považujeme vzdálenost L_5 .

$L_4 = 50 \text{ mm}$ – vzdálenost mezi působišti síly F

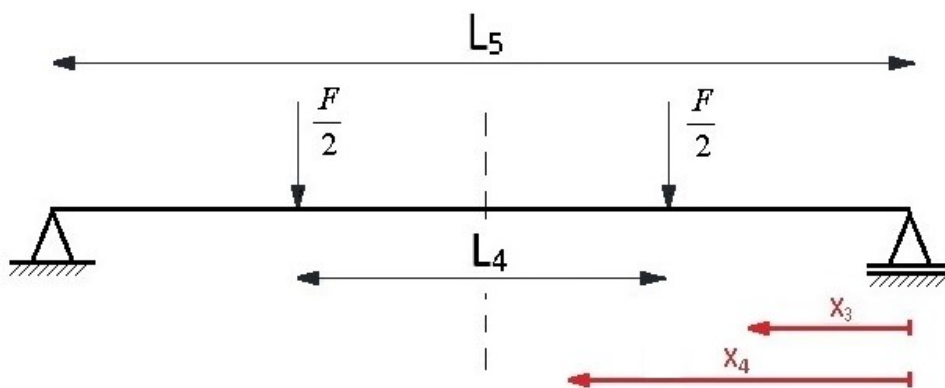
$L_5 = 170 \text{ mm}$ – délka mezi podpěrami

$L_6 = 55 \text{ mm}$ – umístění snímače na nosníku

Přesné umístění kót viz Obr. 2.2.

5.2.1 Průběhy vnitřních silových účinků:

Stejně jako u úlohy č. 1 pro zjištění vnitřních silových účinků byla použita metoda myšleného řezu, a jelikož je daná úloha souměrná, stačí dva řezy z jedné strany ve vzdálenosti x_3 a x_4 , jak je znázorněno na Obr. 5.5, kdy řez x_4 probíhá do poloviny nosníku. Druhá strana průběhu bude zrcadlově stejná.



Obr. 5.5 Úloha č. 2 -znázornění řezů

Řez x_3

$$x_3 \in (0; \frac{l_5}{2} - \frac{l_4}{2})$$

$$M(x_3 \in 0) = \frac{F}{2} \cdot 0 = 0 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (13)$$

$$M(x_3 \in \frac{l_5}{2} - \frac{l_4}{2}) = \frac{F}{2} \cdot (\frac{l_5}{2} - \frac{l_4}{2}) = \frac{F}{2} \cdot (\frac{0,17}{2} - \frac{0,05}{2}) = 216 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (14)$$

$$T(x_3 \in 0) = -\frac{F}{2} = -3,6 \text{ kN} \quad (15)$$

$$T(x_3 \in \frac{l_5}{2} - \frac{l_4}{2}) = -\frac{F}{2} = -3,6 \text{ kN} \quad (16)$$

Řez x_4

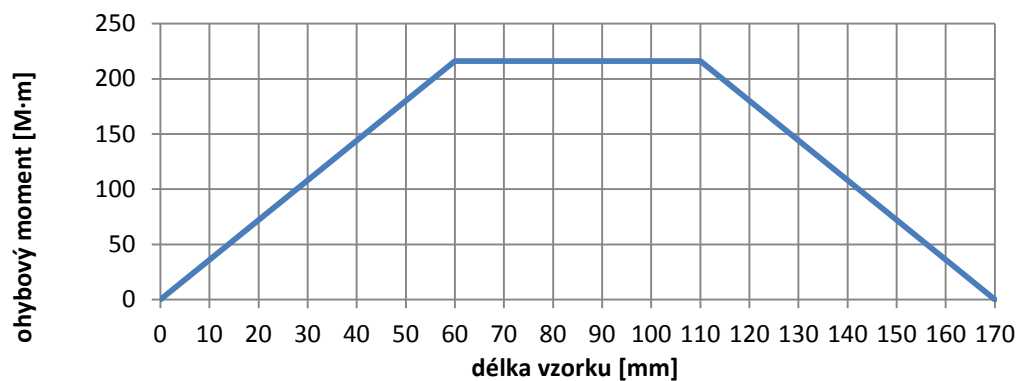
$$x_4 \in \left(\frac{l_5}{2} - \frac{l_4}{2}, \frac{l_5}{2}\right)$$

$$M(x_4 \in \frac{l_5}{2} - \frac{l_4}{2}) = \frac{F}{2} \cdot \left(\frac{l_5}{2} - \frac{l_4}{2}\right) = \frac{F}{2} \cdot \left(\frac{0,17}{2} - \frac{0,05}{2}\right) = 216N \cdot m \quad (17)$$

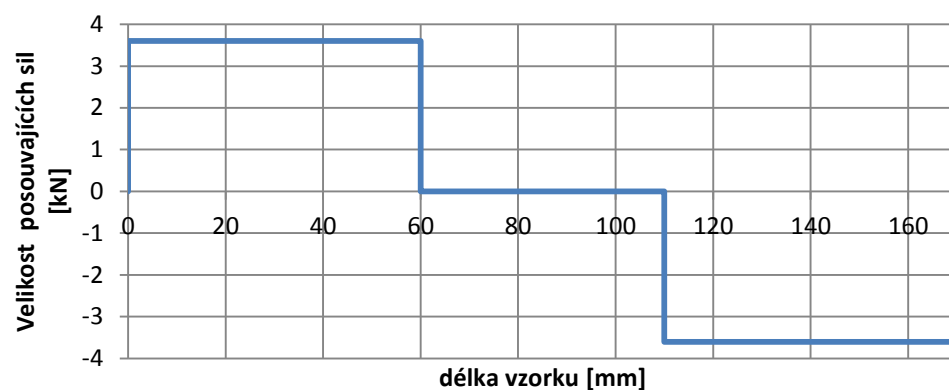
$$M(x_4 \in \frac{l_5}{2}) = \frac{F}{2} \cdot \frac{l_5}{2} - \frac{F}{2} \cdot \frac{l_4}{2} = \frac{F}{2} \cdot \frac{0,17}{2} - \frac{F}{2} \cdot \frac{0,05}{2} = 216N \quad (18)$$

$$T(x_4 \in \frac{l_5}{2}) = 0kN \quad (19)$$

$$T(x_4 \in \frac{l_5}{2} - \frac{l_4}{2}) = 0kN \quad (20)$$



Obr. 5.6 Graf průběhu ohybového momentu



Obr. 5.7 Graf průběhu příčných sil

5.2.2 Výpočet napětí

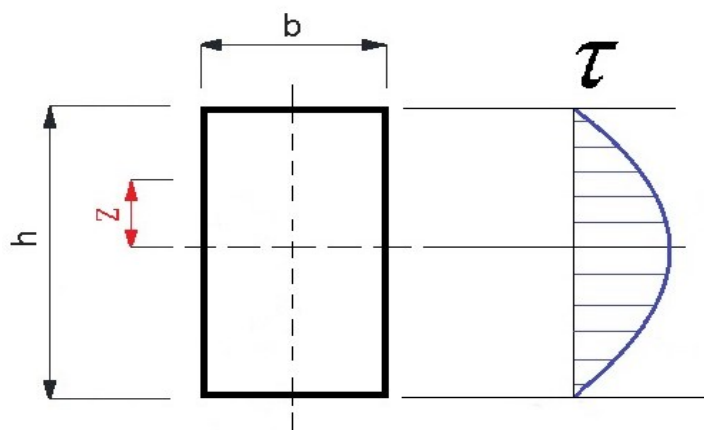
V této části je primárním úkolem spočítat a zjistit průběh smykového napětí, který je pro dané vyhodnocení zajímavější než normálové napětí. Pro tyto výpočty je zapotřebí znát hodnoty posouvajících sil v oblasti pod snímačem. Zjištění posouvající síly je v této oblasti jednoduché, protože se jedná o konstantu, tedy $T = 3,6$ kN.

Míst pro kontrolu napětí bude více než u úlohy č. 1, a to z důvodu kontroly smykového napětí, které by mělo být parabolické a tři kontrolovaná místa by nezaručila přesný průběh tohoto napětí. Pro výpočty se využije Žuravského větu

$$\tau_z = \frac{3}{2} \cdot \frac{T(x)}{b \cdot h} \cdot \left[1 - \left(\frac{2 \cdot z}{h} \right)^2 \right] \quad (21)$$

Kde: z – je vyhodnocovací vzdálenost od neutrální osy [3]

Vyhodnocovací vzdálenost i přibližný průběh smykového napětí je zobrazen na Obr. 5.8



Obr. 5.8 Geometrie průřezu a ideální průběh smykové napětí

- 1) Hodnota smykového napětí pro řez, kdy $z = 0$ mm:

$$\tau_0 = \frac{3}{2} \cdot \frac{T(x)}{b \cdot h} \cdot \left[1 - \left(\frac{2 \cdot z}{h} \right)^2 \right] = \frac{3}{2} \cdot \frac{3600}{10 \cdot 40} \cdot \left[1 - \left(\frac{2 \cdot 0}{40} \right)^2 \right] = 13,5 \text{ MPa} \quad (22)$$

- 2) Hodnota smykového napětí pro řez, kdy $z = 5$ mm:

$$\tau_5 = \frac{3}{2} \cdot \frac{T(x)}{b \cdot h} \cdot \left[1 - \left(\frac{2 \cdot z}{h} \right)^2 \right] = \frac{3}{2} \cdot \frac{3600}{10 \cdot 40} \cdot \left[1 - \left(\frac{2 \cdot 5}{40} \right)^2 \right] = 12,7 \text{ MPa} \quad (23)$$

- 3) Hodnota smykového napětí pro řez, kdy $z = 10$ mm:

$$\tau_{10} = \frac{3}{2} \cdot \frac{T(x)}{b \cdot h} \cdot \left[1 - \left(\frac{2 \cdot z}{h} \right)^2 \right] = \frac{3}{2} \cdot \frac{3600}{10 \cdot 40} \cdot \left[1 - \left(\frac{2 \cdot 10}{40} \right)^2 \right] = 10,125 \text{ MPa} \quad (24)$$

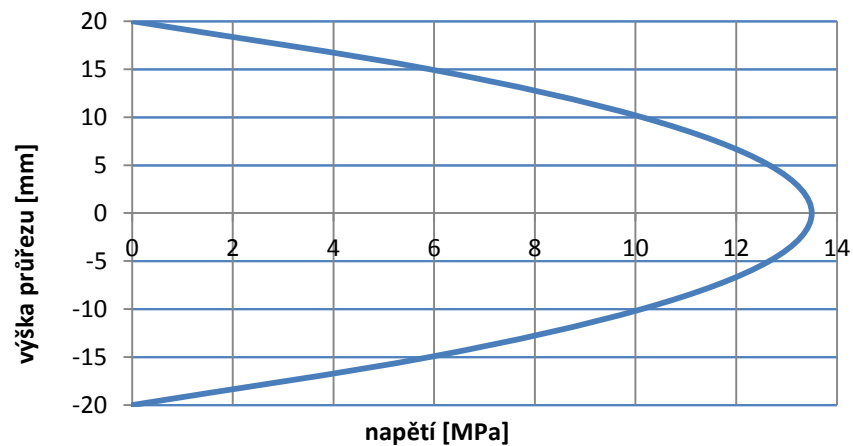
- 4) Hodnota smykového napětí pro řez, kdy $z = 15$ mm

$$\tau_{15} = \frac{3}{2} \cdot \frac{T(x)}{b \cdot h} \cdot \left[1 - \left(\frac{2 \cdot z}{h} \right)^2 \right] = \frac{3}{2} \cdot \frac{3600}{10 \cdot 40} \cdot \left[1 - \left(\frac{2 \cdot 15}{40} \right)^2 \right] = 5,906 \text{ MPa} \quad (25)$$

5) Hodnota smykového napětí pro řez, kdy $z = 20$ mm

$$\tau_{20} = \frac{3}{2} \cdot \frac{T(x)}{b \cdot h} \cdot \left[1 - \left(\frac{2 \cdot z}{h} \right)^2 \right] = \frac{3}{2} \cdot \frac{3600}{10 \cdot 40} \cdot \left[1 - \left(\frac{2 \cdot 20}{40} \right)^2 \right] = 0 \text{ MPa} \quad (26)$$

Z předpokladu ideálního parabolického průběhu smykového napětí po výšce průřezu se hodnoty 2 až 5 ozrcadlí kolem neutrální osy, tím vznikne průběh napětí pro spodní polovinu průřezu. Výsledný průběh je zobrazen na Obr. 5.9, kde maximální hodnota napětí je na neutrální ose a má hodnotu $\tau_{\max} = 13,5 \text{ MPa}$



Obr. 5.9 Průběh smykového napětí po výšce průřezu

6 Vyhodnocení realizovaných experimentů

Tato část vyhodnocení výsledků bude zaměřena na výsledky naměřené přístrojem Q100. Naměřené hodnoty přístrojem Q100 se zpracovávají v softwaru Istram, kde se ze snímané oblasti provede potřebné grafické zobrazení právě té veličiny, která se vyhodnocuje. Následným provedením vyhodnocovacího řezu, se zjistí distribuce dané veličiny podél zvolené linie.

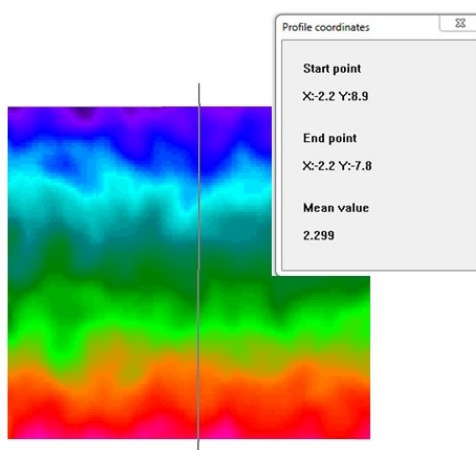
6.1 Úloha č. 1

Vyhodnocení úlohy č. 1, je zaměřeno na kontrolu a vyhodnocení následujících aspektů:

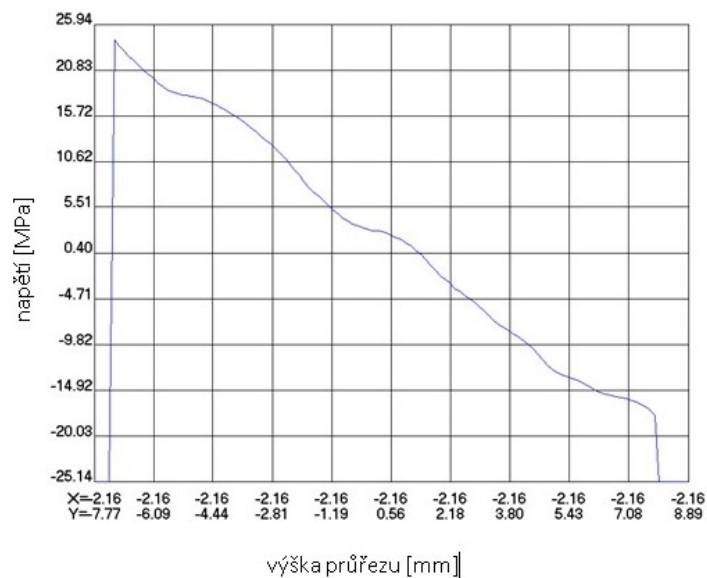
- lineárnost průběhu normálového napětí po výšce průřezu
- přímost průřezu
- průběh průhybové čáry
- směry hlavních napětí

6.1.1 Vyhodnocení napětí

Z naměřeného grafického zobrazení pro normálové napětí se provede vyhodnocovací řez, který je zobrazen na Obr. 6.1 i s hodnotami jeho polohy v souřadném systému snímače. Z tohoto řezu vyjde graf průběhu velikosti normálového napětí po výšce průřezu zobrazeném na Obr. 6.2.



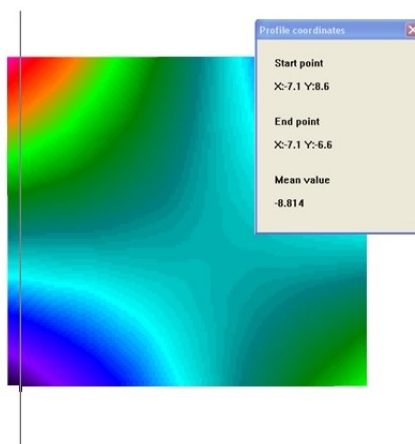
Obr. 6.1 Grafické zobrazení normálového napětí a zobrazení vyhodnocovacího řezu



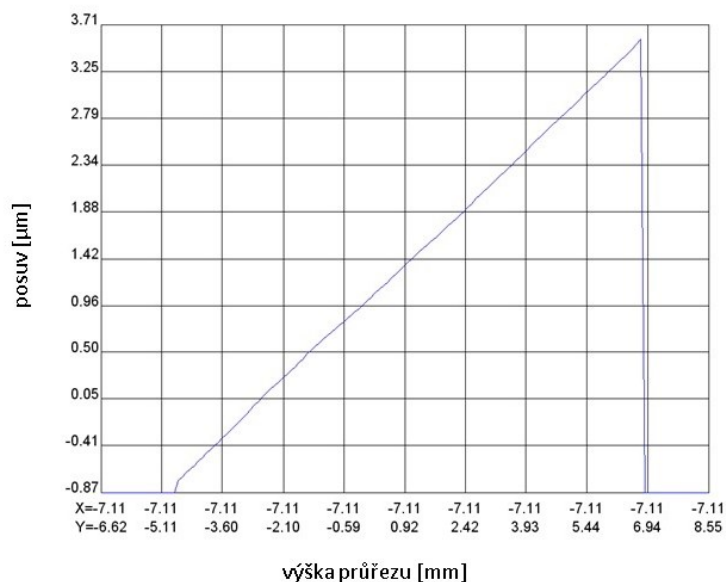
Obr. 6.2 Graf průběhu normálového napětí

6.1.2 Přímost průřezu

Z naměřeného grafického zobrazení pro posuvy ve směru x se provede vyhodnocovací řez, který je zobrazen na Obr. 6.3 i s hodnotami jeho polohy v souřadném systému snímače. Z tohoto řezu vyjde graf průběhu posuvů ve směru x závislého na výšce nosníku zobrazeném na Obr. 6.4.



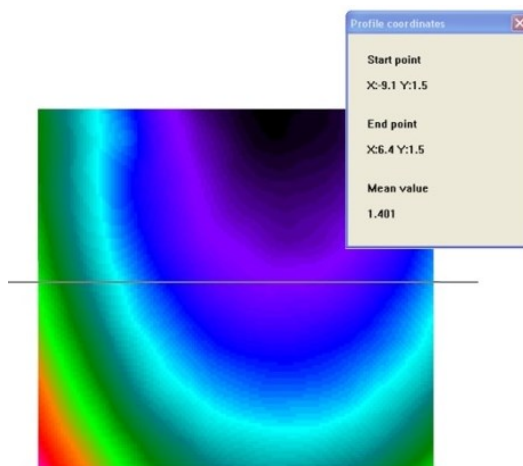
Obr. 6.3 Grafické zobrazení posuvů ve směru x a zobrazení vyhodnocovacího řezu



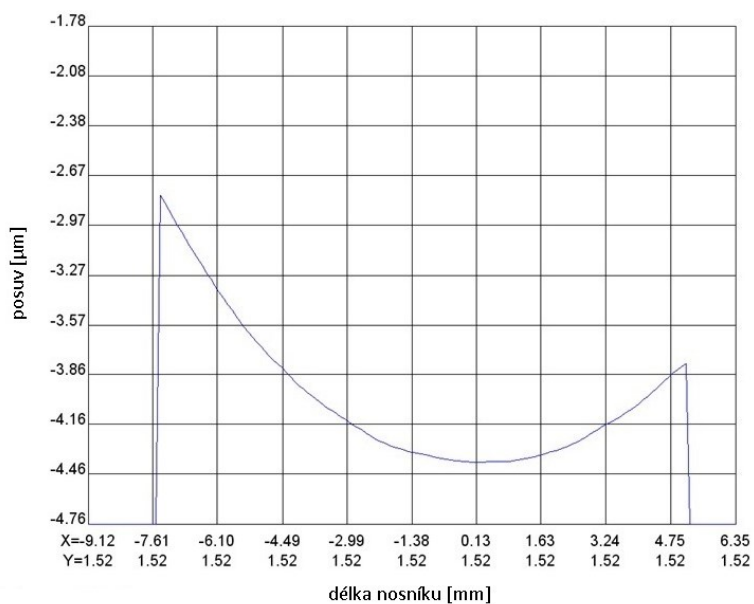
Obr. 6.4 Graf průběhu posuvů ve směru osy x

6.1.3 Průhybová čára

Z naměřeného grafického zobrazení pro posuvy ve směru y se provede vyhodnocovací řez, který je zobrazen na Obr. 6.5 i s hodnotami jeho polohy v souřadném systému snímače. Z tohoto řezu vyjde graf průběhu posuvů ve směru y závislého na délce nosníku zobrazeném na Obr. 6.6.



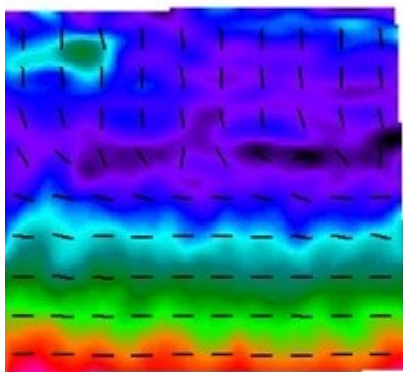
Obr. 6.5 Grafické zobrazení posuvů ve směru osy y a zobrazení vyhodnocovacího řezu



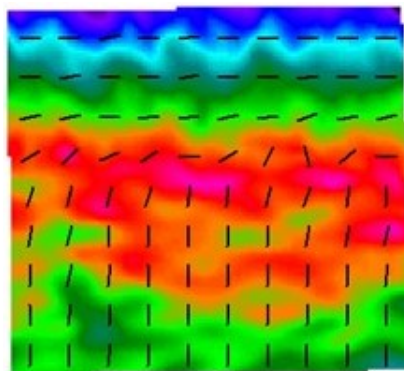
Obr. 6.6 Graf posuvů ve směru osy y (graf průhybové čáry)

6.1.4 Směry hlavních napětí

Na Obr. 6.7 a Obr. 6.8 jsou přerušovanou čarou vyznačeny směry prvního a druhého hlavního napětí pro úlohu č. 1.



Obr. 6.7 Směr prvního hlavního napětí



Obr. 6.8 Směr druhého hlavního napětí

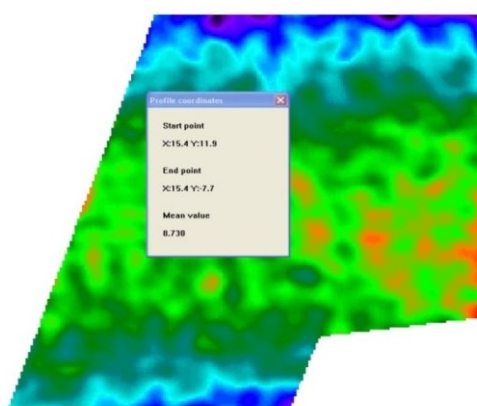
6.2 Úloha č. 2

Vyhodnocení úlohy č. 2 je zaměřeno na kontrolu a vyhodnocení následujících aspektů:

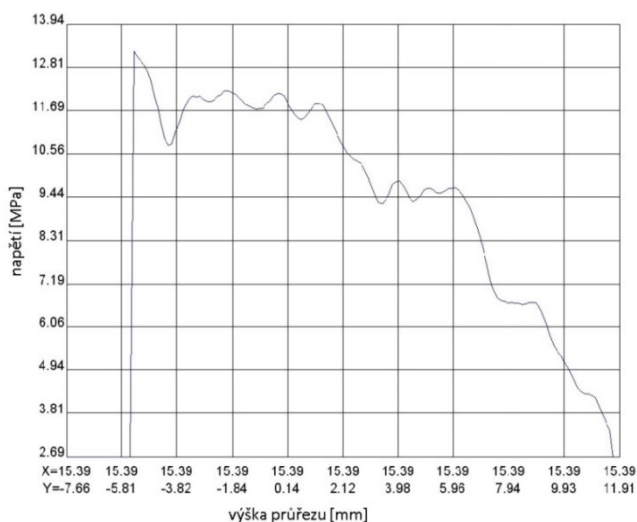
- hodnoty smykového napětí
- průběh posuvů ve směru X
- směry hlavních napětí

6.2.1 Smykové napětí

Z naměřeného grafického zobrazení pro smykové napětí se provede vyhodnocovací řez, který je zobrazen na Obr. 6.9 i s hodnotami jeho polohy v souřadném systému snímače. Z tohoto řezu vyjde graf průběhu velikosti smykového napětí závislého na výšce průřezu zobrazeném na Obr. 6.10.



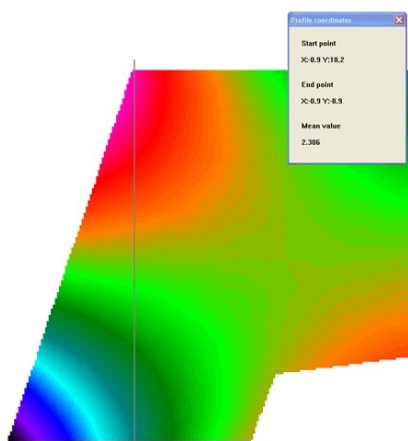
Obr. 6.9 Grafické zobrazení smykového napětí a zobrazení vyhodnocovacího řezu



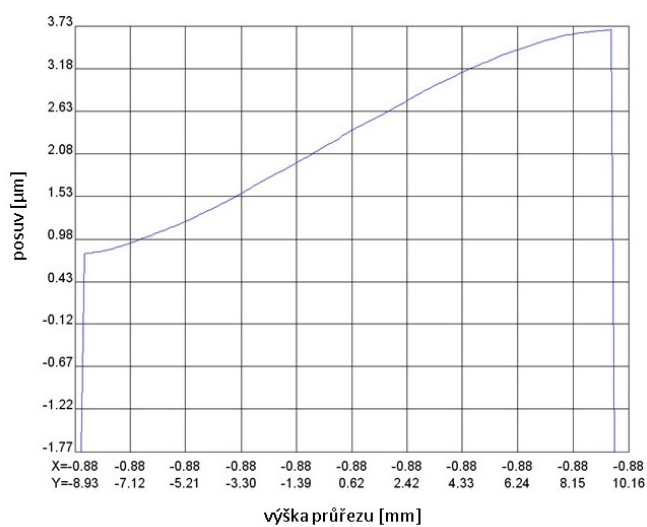
Obr. 6.10 Graf průběhu smykového napětí

6.2.2 Průběh posuvů

Z naměřeného grafického zobrazení pro posuvy ve směru x se provede vyhodnocovací řez, který je zobrazen na Obr. 6.11 i s hodnotami jeho polohy v souřadném systému snímače. Z tohoto řezu vyjde graf průběhu posuvů ve směru x závislého na výšce nosníku zobrazeném na Obr. 6.12.



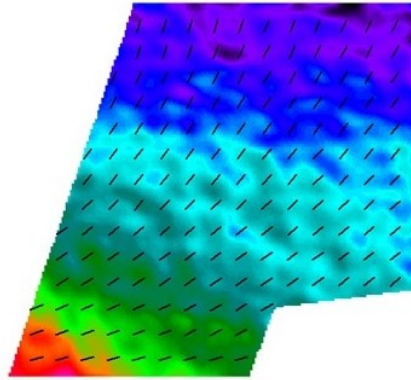
Obr. 6.11 Grafické zobrazení posuvů ve směru x a zobrazení vyhodnocovacího řezu



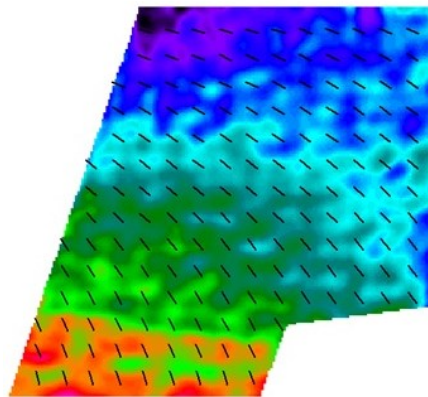
Obr. 6.12 Graf průběhu posuvů ve směru x

6.2.3 Směry hlavních napětí

Na Obr. 6.13 a Obr. 6.14 jsou přerušovanou čarou vyznačeny směry prvního a druhého hlavního napětí pro úlohu č. 2.



Obr. 6.13 Směr prvního hlavního napětí pro úlohu č. 2



Obr. 6.14 Směr druhého hlavního napětí pro úlohu č. 2

7 Numerické řešení

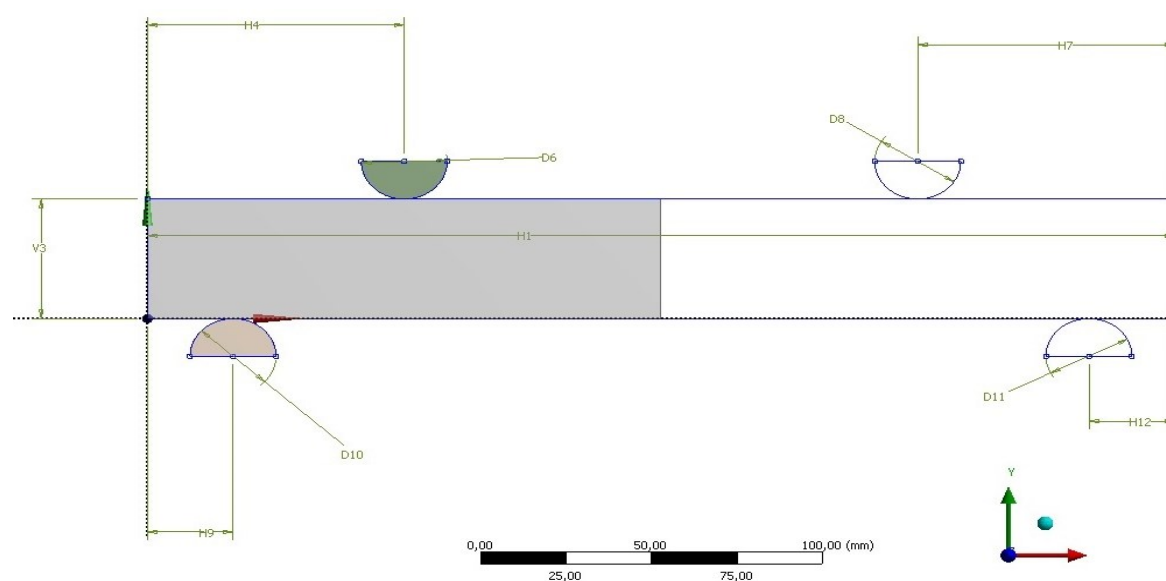
Pro numerické řešení byla zvolena metoda konečných prvků (MKP), a to s využitím softwaru Ansys Workbench. V numerické části výpočtu úloh č. 1 a č. 2 se bude vyhodnocovat smykové a normálové napětí plus směry hlavních napětí v oblastech snímače Q100.

7.1 Úloha č. 1

V úloze č. 1 se bude vyhodnocovat průběh i maximální hodnota normálového napětí a směry hlavních napětí, v místě kde byl umístěn snímač Q100.

7.1.1 Geometrie

Geometrie je zadána kótami, které jsou již uvedeny v kapitole číslo 2, tedy hodnotami L_1 , L_2 , L_3 , D a h . Na Obr. 7.1 je přesná geometrie pro výpočet MKP. Pro upřesnění geometrie jsou v Tab. 7.1 označené kóty a jejich velikosti z Obr. 7.1.



Obr. 7.1 MKP geometrie úlohy č. 1

Tab. 7.1 Hodnoty pro geometrii úlohy č. 1

označení kóty	velikost [mm]
V3	40
H1	300
H9,H12	25
H4,H7	75
D6,D8,D10,D11	25,1

Kde :

V3 – výška nosníku

H1 - délka nosníku

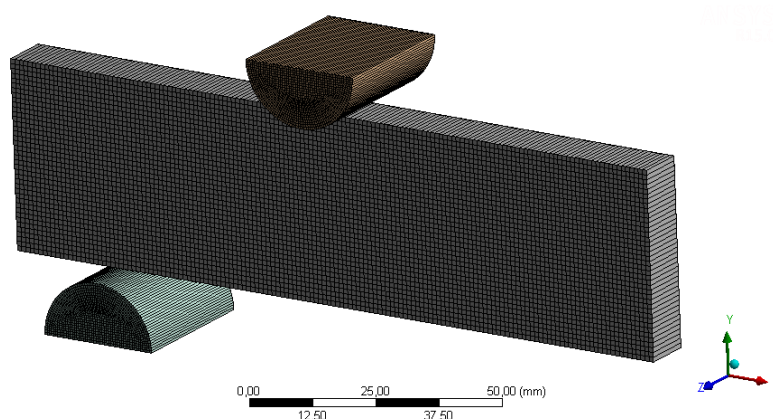
H9 a H12 - udávají polohu podpěrných válečků vůči koncům nosníku

H4 a H7- udávají polohu tlačných válečků vůči koncům nosníku

D6, D8, D10 a D11 – udávají průměr válečků

7.1.2 Konečnoprvkový model

Pro zjednodušení a urychlení výpočtů se využije symetrie dané úlohy a bude se počítat pouze s jednou polovinou dané geometrie, na Obr. 7.1 je znázorněna šedou barvou. Po zadání tloušťky nosníku „b“ a válečků „v“ a jeho následném vysítování je model zobrazen na Obr. 7.2.



Obr. 7.2 Model pro MKP výpočet

7.1.3 Konečno prvková síť

Pro vytvoření sítě u dané úlohy bylo zvoleny dvě velikosti elementů:

velikost elementů nosníku: 1 mm

velikost elementů válečků: 0,5 mm

Všechny tři prvky jsou vysítovány stejnou metodou:

metoda sítě: quadrilateral dominant (tedy čtyřúhelníková dominance)

počet uzlů v modelu: 25667

počet elementů v modelu: 8344

7.1.4 Okrajové podmínky a kontakty

V případě první úlohy byly využity čtyři okrajové podmínky :

- A) vazba symetrie – zákaz posuvu ve směru osy x
- B) působící síla na horní stranu válce o velikosti $F/2 = 3250$ N v protisměru osy y
- C) vazba horní hrany vrchního válce – zákaz posuvu ve směru osy x
- D) vazba spodní hrany spodního válce – zákaz posuvu ve směru osy x a y

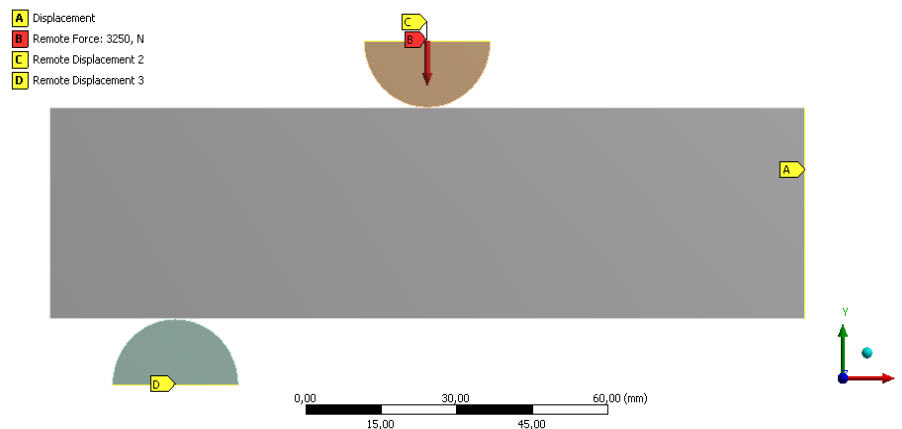
Okrajové podmínky jsou znázorněny na Obr. 7.3

V úloze jsou využity dva stejné typy kontaktů, a to mezi spodním válečkem a nosníkem a mezi horním válečkem a nosníkem. Jejich základní parametry jsou:

Typy kontaktů: v obou případech se jedná o třecí kontakty

Hodnota smykového tření (ocel x dural): 0,35

Hloubka penetrace: 0,001 mm

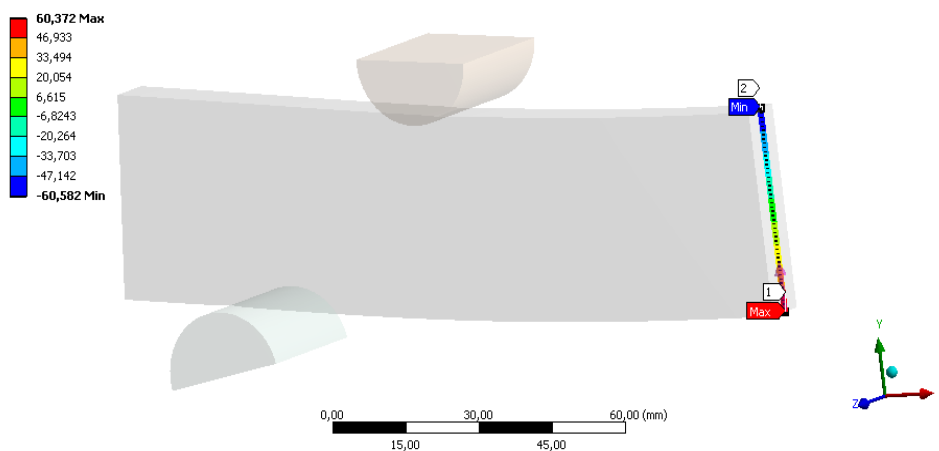


Obr 7.3 Okrajové podmínky - úloha č. 1

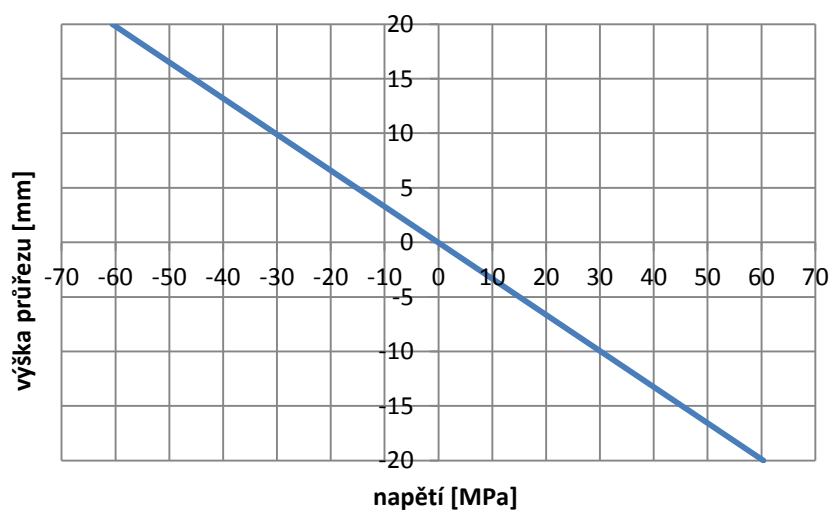
7.1.5 Výsledky

Jak je zmíněno již výše, v úloze č. 1, je zkoumán průběh a maximální hodnota normálového napětí v oblasti vyhodnocení snímače Q100. V tomto případě se tyto hodnoty budou zkoumat po výšce průřezu po zatížení silou $F/2$, tedy ve zdeformovaném tělese. Zkoumaný průběh po výšce průřezu a deformace modelu je vidět na Obr. 7.4, kdy je pro lepší viditelnost deformace zvětšena dvaceti pětinásobně. Největší hodnota normálového napětí po výšce průřezu v této oblasti nabývá záporné hodnoty $\sigma_{\min} = -60,582$ MPa po

zaokrouhlení na jedno desetinné místo $\sigma_{\min} = -60,6\text{MPa}$. Největší hodnota tedy vychází v tlaku. Na Obr. 7.4 je tato hodnota zobrazena jako Min., přesný průběh normálového napětí po výšce průřezu je zobrazen na Obr. 7.5.

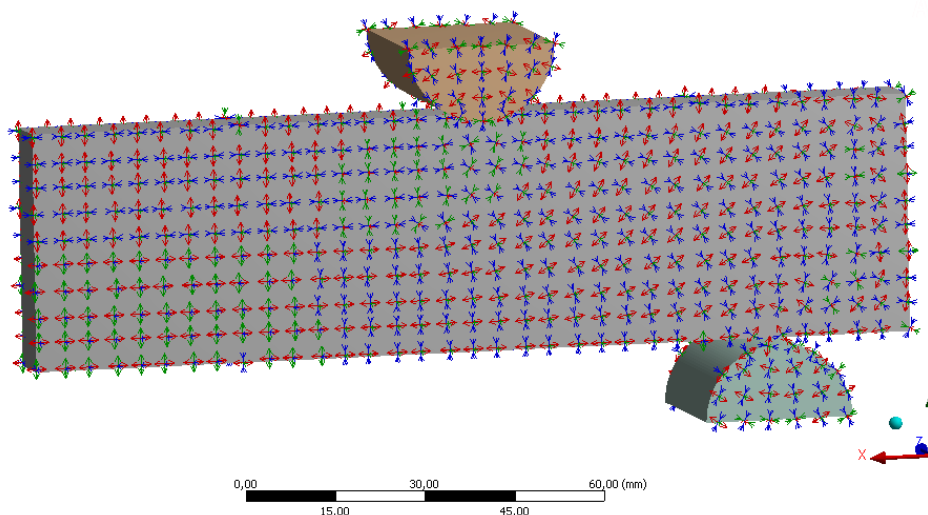


Obr. 7.4 Zatížený model a znázornění průběhu normálového napětí



Obr. 7.5 Graf normálového napětí po výšce průřezu

Dalším zkoumaným aspektem jsou směry hlavních napětí, jejich průběh je vidět na Obr. 7.6. Kdy jednotlivé barevné šipky určují směry hlavních napětí.



Obr. 7.6 MKP zobrazení směrů hlavních napětí

7.2 Úloha č. 2

V úloze č. 2 se bude vyhodnocovat průběh i maximální hodnota smykového napětí a směry hlavních napětí v místě, kde byl umístěn snímač Q100.

7.2.1 Konečno prvkový model

Geometrie v úloze č. 2 je naprosto stejná jako u úlohy č. 1 s výjimkou vzdáleností tlačných a podpěrných válečků. Označení kót zůstává stejné jako v geometrii č. 1. V Tab. 7.2 jsou označeny kóty a jejich velikosti, které jsou znázorněny na Obr. 7.1.

Tab. 7.2 Hodnoty pro geometrii úlohy č. 1

označení kóty	velikost [mm]
V3	40
H1	300
H9,H12	65
H4,H7	125
D6,D8,D10,D11	25,1

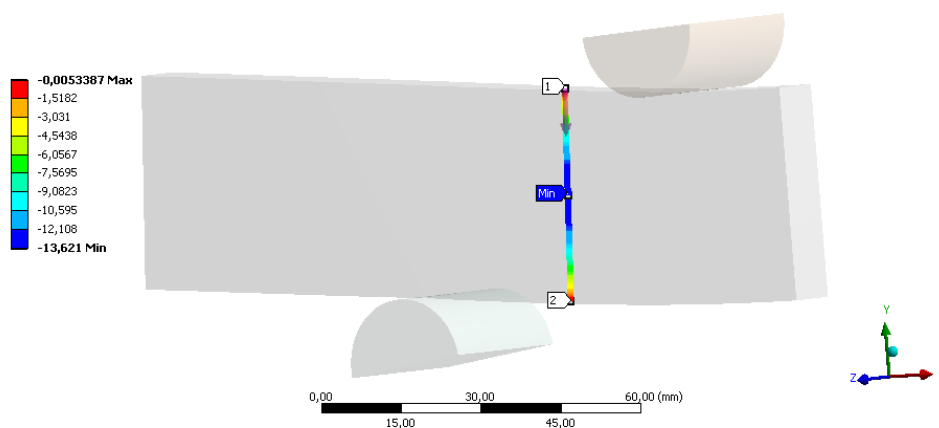
Model se také nezměnil, využívá stejnou symetrii i velikost a metodu vytvoření konečno prvkové sítě. Počet elementů a uzlů zůstává stejný.

Jediná změna v okrajových podmínkách je podmínka B), zde se změní velikost síly $F/2$ z hodnoty $F/2 = 3250 \text{ N}$ na hodnotu $F/2 = 3600 \text{ N}$.

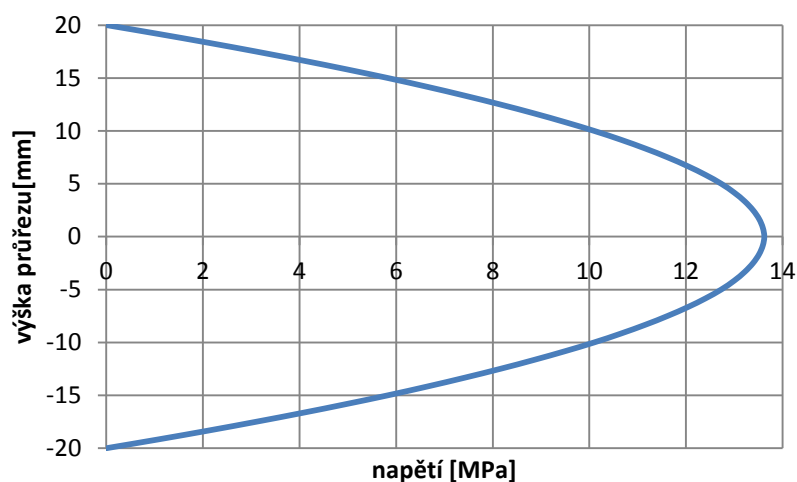
Kontakty vůči úloze č.1 zůstaly bez měny.

7.2.2 Výsledky

Vyhodnocení výsledků smykového napětí se provádí v oblasti, která je zobrazena na Obr. 2.2 kótou L₆, pouze s výjimkou zrcadlového převrácení této kóty okolo osy symetrie, tedy hodnocení probíhá na pravé části nosníku. Na Obr. 7.7 je zobrazen nosník v zatíženém stavu, je zatížen silou $F/2 = 3600$ N a deformace je pro lepší názornost zvětšena dvacet pětkrát. Je zde také vidět napětí po výšce průřezu, které bude lépe zobrazeno na Obr. 7.8, kdy hodnoty napětí budeme brát v absolutních hodnotách pro lepší srovnání v kapitole 7. Maximální smykové napětí v této oblasti je záporné a jeho hodnota je $\tau_{\max} = -13,621$ Mpa. Zápornou hodnotu má na svědomí záporná hodnota příčné síly. Pro následné srovnání se bude brát její absolutní hodnota zaokrouhlená na jedno desetinné místo tedy $\tau_{\max} = 13,6$ Mpa.

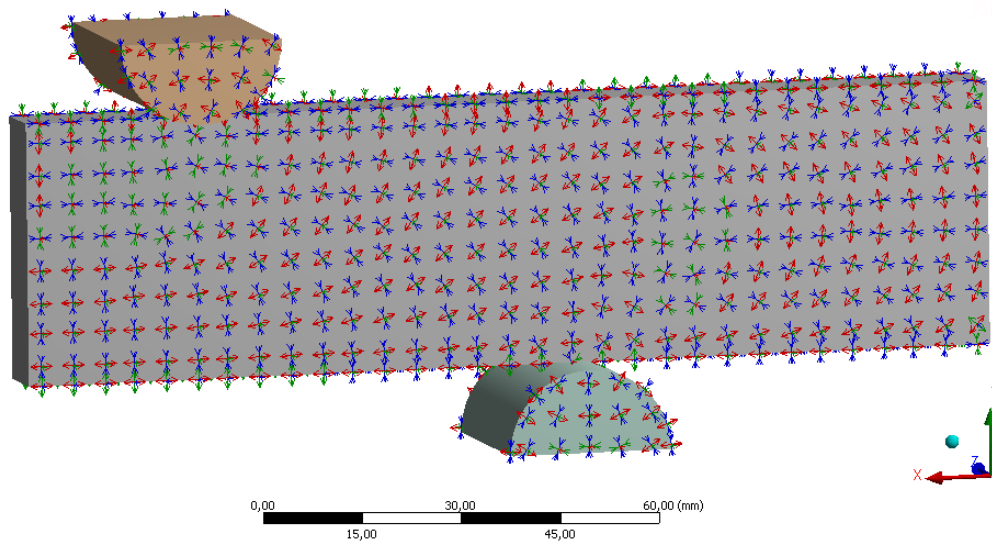


Obr. 7.7 Zatížený model a znázorněný průběh smykového napětí



Obr. 7.8 Graf průběhu smykového napětí po výšce průřezu

Stejně jako v úloze č. 1 i v úloze č. 2 proběhne určení směrů hlavních napětí jejich průběh je vidět na Obr. 7.9. Kdy jednotlivé barevné šipky určují směry hlavních napětí.



Obr. 7.9 MKP zobrazení směrů hlavních napětí

8 Vyhodnocení výsledků

V této kapitole se porovnávají jednotlivé výsledky z analytické, experimentální a numerické části.

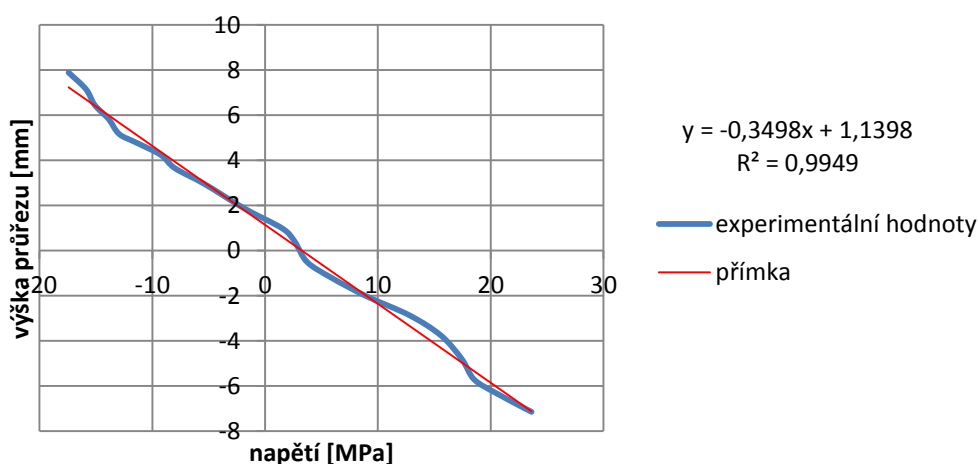
8.1 Úloha č. 1

Jak již bylo zmíněno v části experimentálního vyhodnocení, v úloze č. 1 se budou vyhodnocovat tyto aspekty:

- lineárnost průběhu normálového napětí po výšce průřezu a jeho srovnání - analytické, experimentální a numerické donohy.
- potvrzení přímosti průřezu
- zjištění průběhu průhybové čáry

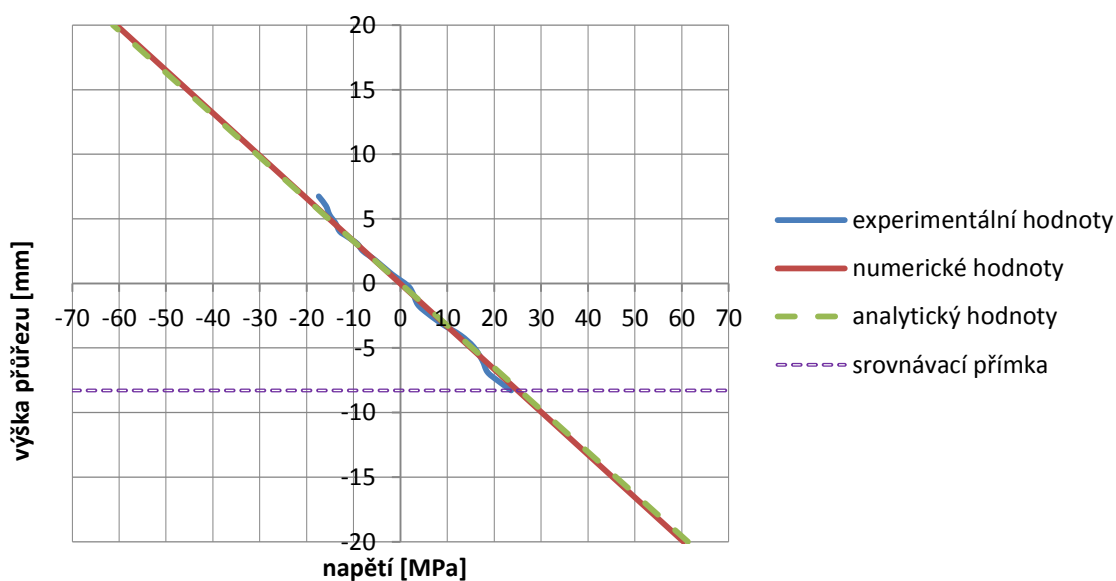
8.1.1 Vyhodnocení normálového napětí

Jak je zmíněno již výše, ideální průběh normálového napětí po výšce průřezu by měla být přímka. Vyhodnocení průběhu normálového napětí proběhne tak, že průběh grafu na Obr. 6.2 se digitalizuje pomocí programu „Data master 2003“, protože jej nelze v software „Istram“ přímo exportovat. Následně tato data byla zpracována v programu „MS Excel“, kdy byl průběh normálového napětí proložen přímkou. Mezi takto vytvořenou přímkou a grafem vznikla určitá míra nepřesnosti. V případě tohoto experimentu se vyhodnocuje spolehlivost R^2 , tedy hodnota míry, do jaké odpovídá průběh naměřených hodnot proložené přímkou. V případě tohoto měření vyšla hodnota spolehlivosti $R^2 = 0,9949$, což znamená, že proložená přímka odpovídá na 99,49 % naměřenému grafu normálového napětí. Toto vyhodnocení je vidět na Obr. 8.1.



Obr. 8.1 Vyhodnocení průběhu normálového napětí

Druhým vyhodnocením normálového napětí je srovnání jednotlivých průběhů a hodnot z analytického, experimentálního a numerického řešení. Na Obr. 8.2 je vidět průběh všech třech řešení, nutnou korekci bylo třeba provést u experimentální části průběhu, kdy nulová hodnota napětí neleží přesně na neutrální ose, což by v ideálním případě měla. Po vhodné úpravě průběhu prochází nulová hodnota středem výšky průřezu, ale i tak nekopíruje přesně hodnoty analytického ani numerického řešení, ale velmi se k těmto hodnotám přibližuje. Ovšem nejdůležitějším faktorem při vyhodnocování výsledků napětí není průběh, ale samotná maximální hodnota tohoto napětí, za tímto účelem je na Obr. 8.2 fialová přerušovaná čára, která znázorňuje výšku řezu „k“, kde se nachází maximální naměřená (experimentální) hodnota normálového napětí. V této samé výšce průřezu se odečtou hodnoty analytické a numerické metody a porovnájí se mezi sebou. Hodnoty budou porovnány v Tab. 8.1 kdy za referenční hodnotu normálového napětí se bude považovat hodnota získaná analytickou metodou. Z Tab. 8.1 je vidět že rozdíl mezi maximální naměřenou a analytickou hodnotou ve stejné výšce průřezu je 7,03 %, tato hodnota by mohla ještě poklesnout, pokud se využije linearizace průběhu experimentálních hodnot. Pro tuto úpravu použijeme rovnici proložené přímkou na Obr. 8.1 která má tvar $y = -0,3498x + 1,1398$. Při posunutí této přímky tak, aby procházela nulová hodnota napětí středem výšky průřezu, tedy neutrální osou viz úpravy výše. Pak bude tato rovnice ve tvaru $y = -0,3498x$. Další úpravou bude osamostatnění neznámé „x“, která v tomto případě udává velikost napětí, a hodnota „y“ označuje výšku průřezu. Pak bude platit $x = -2,8588y$. Do takto upravené rovnice dosadíme za neznámou „y“ vyhodnocovací výšku, výsledkem bude nová hodnota napětí, kterou opět porovnáme s analytickým řešením viz Tab. 8.2.



Obr. 8.2 Průběhy normálových napětí + srovnávací přímka

Tab. 8.1 Výsledky porovnání hodnot

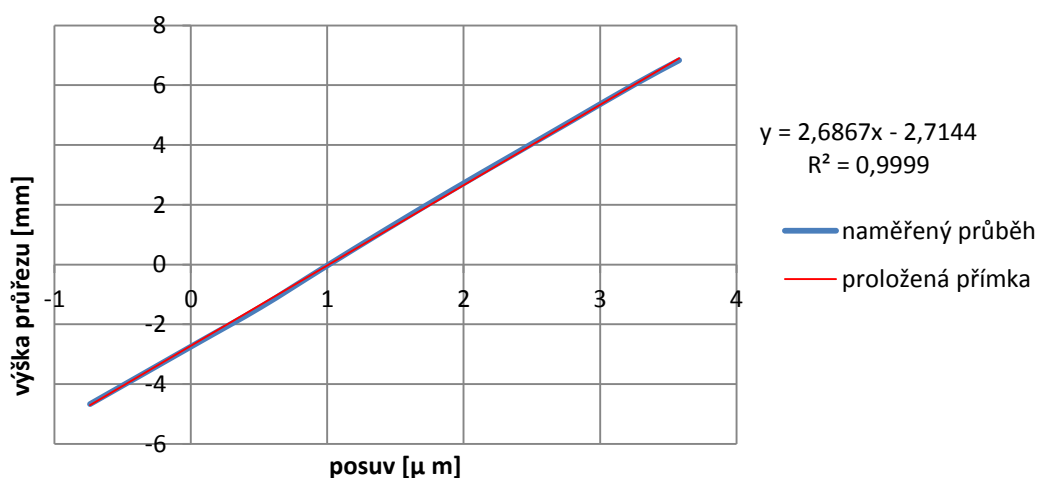
	k = 8,29 mm pod neutrální osou		
	max. hodnota napětí [MPa]	absolutní rozdíl hodnot [MPa]	odchylka [%]
experimentální hodnota	23,63	1,79	7,03
numerická hodnota	24,97	0,44	1,73
analytická hodnota	25,41	0	0

Tab. 8.2 Výsledky porovnání hodnot po linearizaci experimentálních hodnot

	max. hodnota napětí [MPa]	absolutní rozdíl hodnot [MPa]	odchylka [%]
	experimentální hodnota	23,70	1,72
numerická hodnota	24,97	0,44	1,73
analytická hodnota	25,41	0	0

8.1.2 Kontrola přímosti průřezu

Toto vyhodnocení proběhne z hodnot posuvů ve směru osy x nosníku, kdy posuvy v tomto směru v ideálním případě mají mít přímkový charakter. Vyhodnocení proběhne podobně jako vyhodnocení normálového napětí. Nejdříve je zapotřebí digitalizovat data z Obr. 6.4. K tomuto účelu byl opět využit program „Data master 2003“ a následně se hodnoty zpracují v programu „MS Excel“. Zde se graf posuvů stejně jako u vyhodnocení napětí proloží přímkou a zkoumá se spolehlivost mezi přímkou a naměřeným grafem. V případě tohoto měření je hodnota spolehlivosti $R^2 = 0,9999$, což znamená, že se proložená přímka a naměřený graf na 99,99 % shodují. Na Obr. 8.3 je zobrazeno grafické vyhodnocení.



Obr. 8.3 Vyhodnocení průběhu posuvu u_x po výšce průřezu

8.1.3 Kontrola průhybové čáry

Toto vyhodnocení probíhá z hodnot posuvů ve směru osy y . V ideálním případě by hodnoty posuvů ve směru osy y měly mít tvar kružnice (v případě prostého ohybu). Vyhodnocení proběhne podobně jako u vyhodnocení posuvů ve směru osy x , hodnoty z Obr. 6.6 se pomocí programu „Data master 2003“ digitalizují a převedou na následné vyhodnocení do programu „MS Excel“.

Zde se pomocí analytického výpočtu vypočítá ideální kružnice průhybu pro danou oblast. Nejprve se vypočítá poloměr této kružnice – ρ , dále pak střed této kružnice, který je dán body x_0 a y_0 , a následně body této kružnice v oblasti naměřených hodnot posuvů.

Pro analytický výpočet poloměru zakřivení nosníku (kružnice) využijeme vztah [3]:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M_{oz}}{E \cdot J_z} \quad (27)$$

Po úpravě a dosazení

$$\rho = \frac{E \cdot J_z}{M_{oz}} = \frac{72,5 \cdot 10^9 \cdot 5,3 \cdot 10^{-8}}{162,5} = 23,64615385m = 23646153,85\mu m \quad (28)$$

Jelikož je zapotřebí srovnat tento výsledek s experimentálně zjištěným průběhem, bude nutné pro vykreslení kružnice nalézt polohu středu (zarovnání s experimentálně zjištěnou křivkou). Pro určení souřadnic středu kružnice se využije symetričnost průběhu naměřených posuvů a vypočítaná hodnota poloměru:

$$X_0 = 200\mu m$$

$$Y_0 = 23646149,45\mu m$$

Posledním krokem bude výpočet hodnot v naměřené oblasti. Zde se využije rovnice kružnice, pro kterou platí, že střed kružnice neleží ve středu souřadného systému:

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = r^2 \quad (29)$$

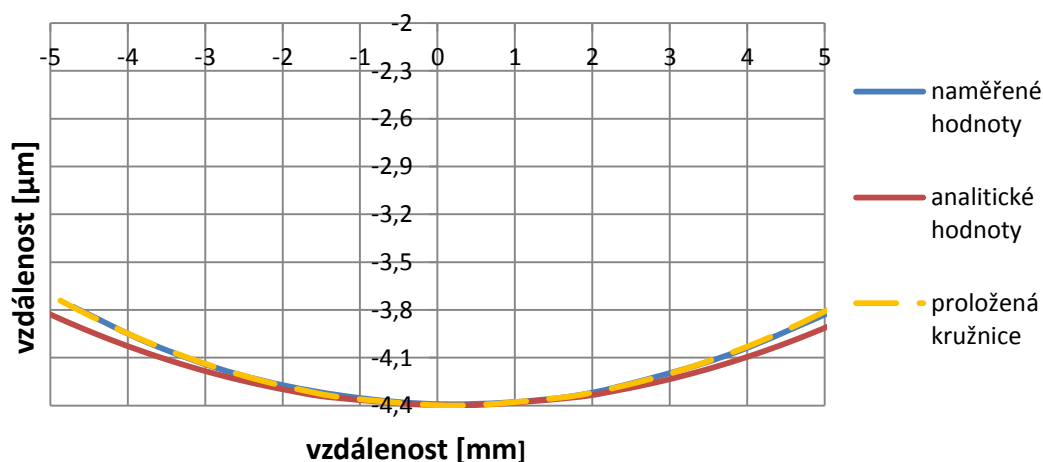
po úpravě

$$x = \sqrt{\rho^2 - (y - y_0)^2} + x_0 \quad (30)$$

kde se za hodnotu y bude dosazovat výška průřezu.

Z takto vytvořených kombinací hodnot x a y získáme průběh ideální kružnice z oblasti vyhodnocení posuvů snímače, viz Obr. 8.4. Z obrázku je jasně vidět, že analytickým

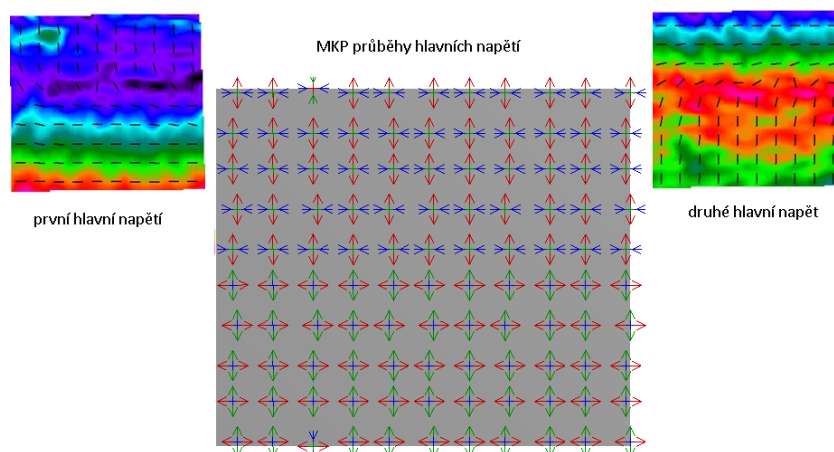
výpočtem se docílí kružnice, která se v jednom bodě dotýká naměřených hodnot, ale její poloměr je větší. Při proložení naměřených hodnot kružnicí o stejné rovnici, ale menším poloměru, je vidět, že tyto průběhy téměř splývají, avšak hodnota poloměru zakřivení je menší.



Obr. 8.4 Průběh průhybové čáry

8.1.4 Srovnání hlavních napětí

Srovnání hlavních napětí proběhne vizuálně, kdy na Obr. 8.5 jsou experimentální průběhy hlavních napětí a průběhy hlavních napětí získané MKP řešením, kde první hlavní napětí odpovídá průběhu červené stopy hlavního napětí MKP řešení a druhé hlavní napětí odpovídá modré stopě hlavního napětí MKP řešení.



Obr. 8.5 Vyhodnocení průběhu hlavních napětí v úloze č.1

8.2 Úloha č. 2

Jak již bylo zmíněno v části experimentálního vyhodnocení, v úloze č. 2 se budou porovnávat tyto aspekty:

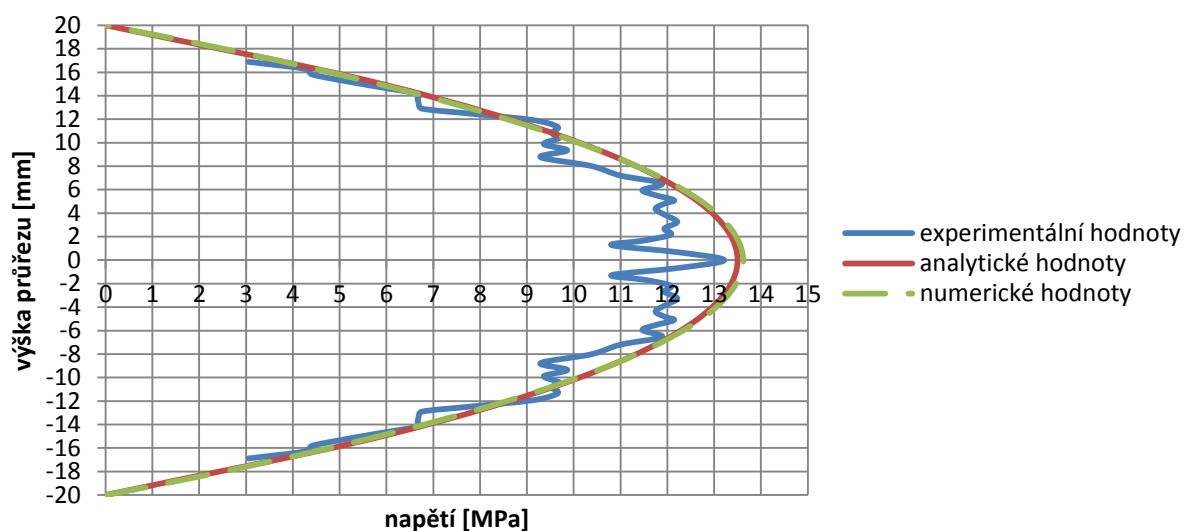
- průběh smykového napětí a jeho srovnání s analytickou, experimentální a numerickou metodou
- průběh posuvů ve směru osy x

8.2.1 Vyhodnocení smykového napětí

V této části proběhne vyhodnocení smykového napětí, a to nejen jeho průběh, ale i maximální hodnota.

Ideálním průběhem smykového napětí je parabola s maximální hodnotou na neutrální ose a nulovými hodnotami na krajních vláknech, na Obr. 6.10 je průběh, který zcela neodpovídá ideálnímu průběhu smykového napětí. Pro správné vyhodnocení se musí daný graf napětí upravit tak, aby maximální hodnota byla na neutrální ose a minimální hodnota se blížila krajnímu vláknu. Tato úprava se provede tak, že celý graf se posune o hodnotu 5,3 mm v kladné ose y . Takto upravený průběh se ozrcadlí okolo osy y , aby bylo možné vidět jeho přibližný parabolický průběh. Pro lepší orientaci se graf natočí do vodorovné polohy, která odpovídá uložení nosníku. Do takto upraveného grafu se vloží ještě průběhy analytického a numerického řešení.

Na první pohled je vidět, že experimentální průběh přesně nekopíruje průběhy analytické ani numerické metody, ale jejím tvarem se jí velice přibližuje. Tyto průběhy jsou vidět na Obr. 8.6.



Obr. 8.6 Průběhy smykových napětí po výšce průřezu

Dalším vyhodnocením je odchylka maximální naměřené hodnoty. Maximální hodnoty se budou odečítat z neutrální osy z Obr. 8.6 pro experimentální, numerickou a analytickou

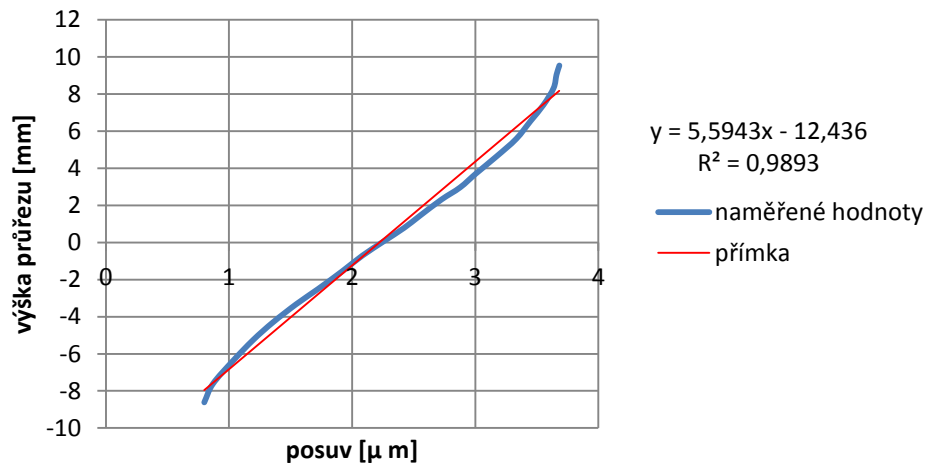
hodnotu, které se mezi sebou porovnají, jako referenční hodnotu maximálního smykového napětí budeme brát hodnotu analytickou. Výsledky vyhodnocení jsou v Tab.8.3.

Tab. 8.3 Tabulka vyhodnocení maximálních hodnot smykového napětí

	max. hodnota napětí [MPa]	absolutní rozdíl hodnot [MPa]	odchylka [%]
experimentální hodnota	13,21	0,29	2,12
numerická hodnota	13,62	0,12	0,90
analytická hodnota	13,5	0	0

8.2.2 Vyhodnocení posuvů ve směru osy x

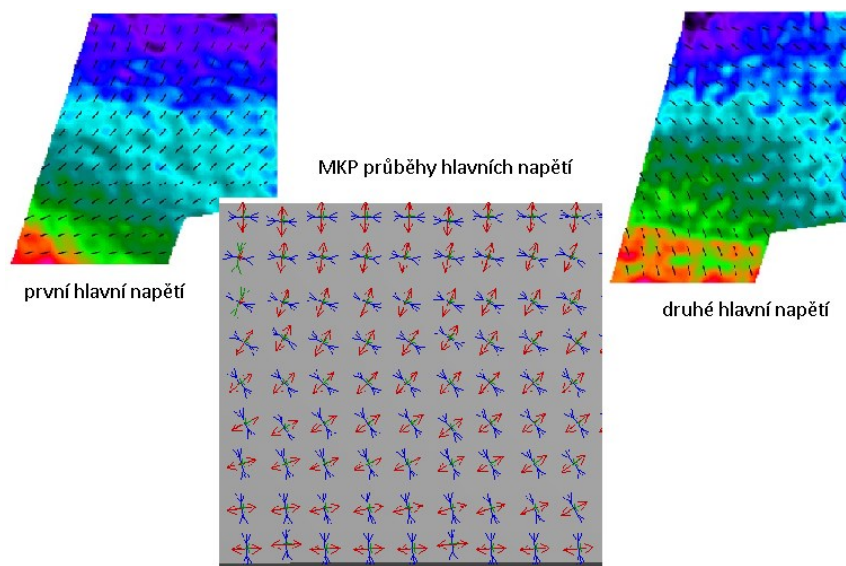
Posledním vyhodnocením je kontrola posuvů ve směru osy x . V úloze č. 1 se toto vyhodnocení provádělo také, s rozdílem umístění snímače Q100 a vzdáleností mezi tlačnými a podpěrnými válečky. V úloze č. 1 je snímač Q100 umístěn mezi tlačnými válečky, vzdálenost mezi těmito válečky vůči výšce nosníků je dostatečně veliká a navíc v této oblasti nepůsobí žádné příčné síly. Toto jsou hlavní důvody, proč při úloze č. 1 vyšel posuv lineární. Ovšem v úloze č. 2 tomu tak není. Snímač je zde umístěn mezi tlačným a podpěrným válečkem a vzdálenost mezi těmito válečky je malá vůči výšce nosníku. Navíc zde působí posouvající síla. Z těchto důvodů lze očekávat nelineární průběh posuvů. Vyhodnocení proběhne stejně jako u vyhodnocení posuvů v úloze č. 1, graf z Obr. 6.12 se digitalizuje pomocí softwaru „Data master 2003“, a následně se tato data zpracují v programu „MS Excel“, kdy se průběh posuvů proloží opět přímkou. U tohoto vyhodnocení není potřebné znát hodnotu spolehlivosti R^2 , i když její hodnota řekne, do jaké míry se od sebe liší proložená přímka a průběh posuvu, ale k vyhodnocení bude stačit vizuální kontrola, která ukáže, jestli se přímka s průběhem posuvu kryjí. Z Obr. 8.7 je jasně vidět, že proložená přímka nekopíruje průběh posuvů. Toto potvrzuje také hodnota spolehlivosti, kdy $R^2 = 0,9883$ která ukazuje, že se hodnoty posuvů a proložené přímky zcela neztotožňují.



Obr. 8.7 Posuv ve směru osy x

8.2.3 Srovnání hlavních napětí

Srovnání hlavních napětí proběhne stejně jako v úloze č. 1, kdy na Obr. 8.8 jsou experimentální průběhy hlavních napětí a průběhy hlavních napětí získané MKP řešením. První hlavní napětí odpovídá průběhu červené stopy hlavního napětí MKP řešení a druhé hlavní napětí odpovídá modré stopě hlavního napětí MKP řešení.



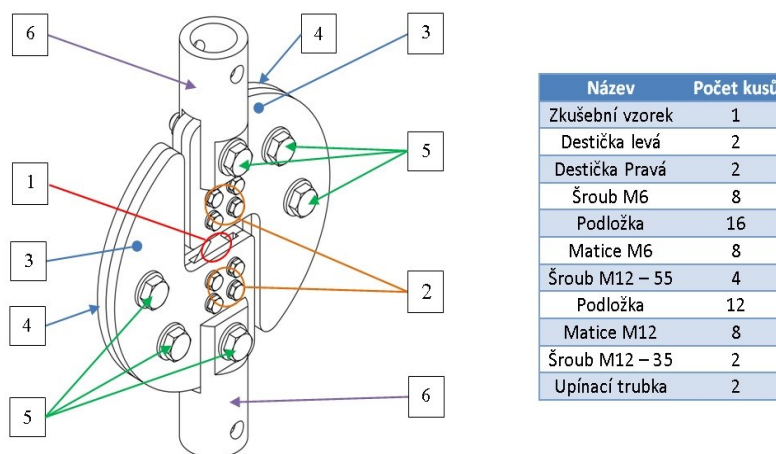
Obr. 8.8 Vyhodnocení směrů hlavních napětí v úloze č. 2

9 Aplikace přístroje Q100 v praxi

V této kapitole jsou znázorněny dva experimenty, které byly vybrány pro ukázkou možnosti aplikace přístroje Q100 nejen na pro čtyřbodový ohyb, ale i pro jiné úlohy a typy namáhání.

9.1 Ukázka číslo 1

V této ukázce proběhne měření opět na přístroji Testometric M500-50CT, ovšem za použití přípravku PARCAN vyobrazeném na Obr. 9.1, kde je i popis jeho částí.

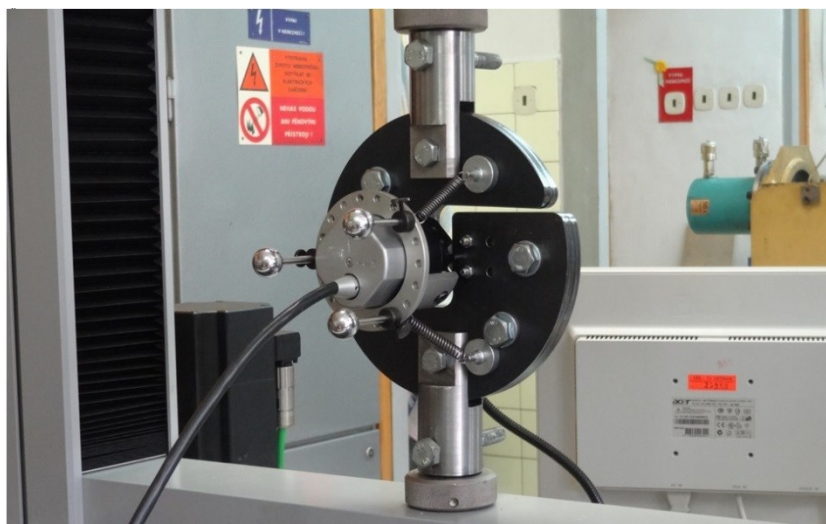


Obr. 9.1 Schéma přípravku PARCAN a popis jeho

Na tomto přípravku proběhlo několik experimentů, z nichž je pro vyhodnocení nejzajímavější zkouška namáhání smykem.

9.1.1 Zkouška namáhání smykem

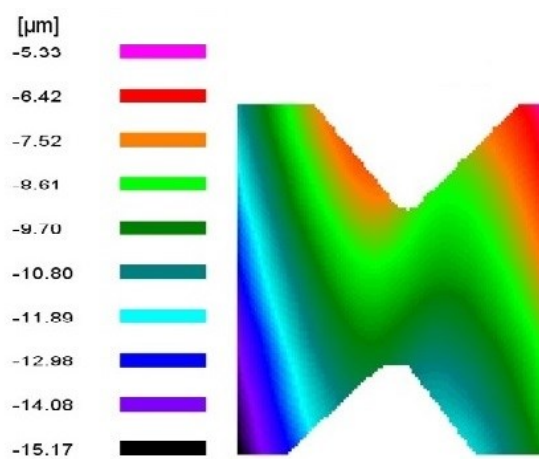
Při tomto experimentu je přípravek vložen do přístroje Testometric M500-50CT v poloze vyobrazené na Obr. 9.2, kde je vzorek v tomto přípravku namáhaný čistým smykem.



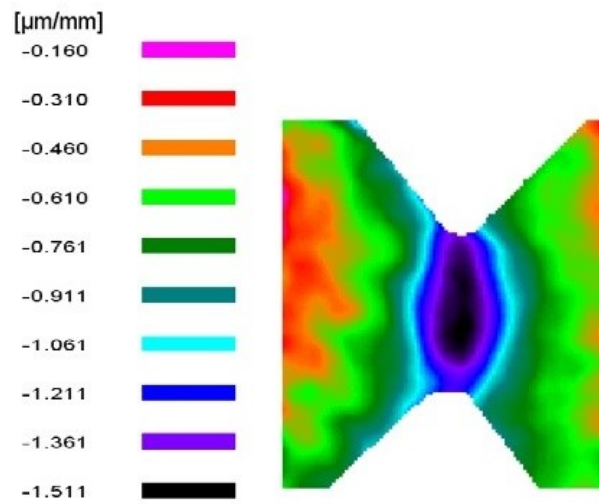
Obr. 9.2 Přípravek připravený pro namáhání smykem [5]

9.1.2 Výsledky

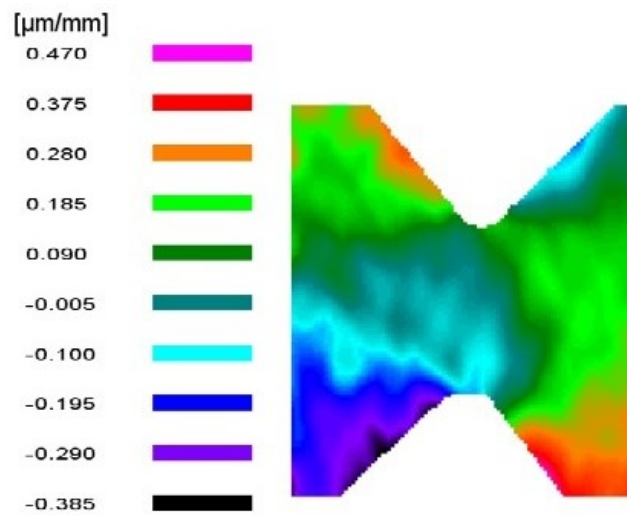
Naměřené výsledky jednotlivých posuvů a deformací jsou vidět na Obr 9.3 až Obr.9.8



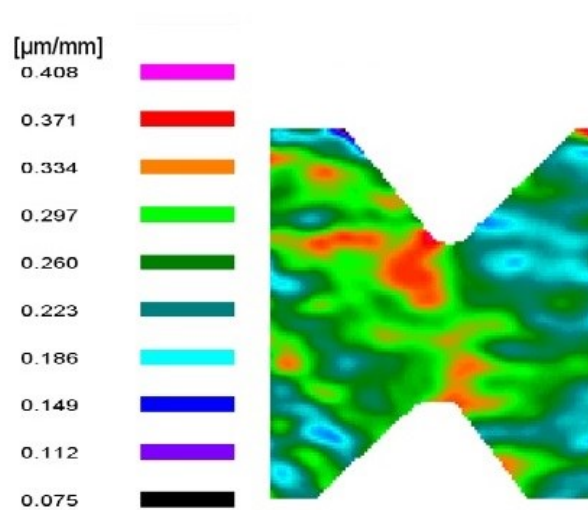
Obr. 9.3 Grafické zobrazení posuvů u_y



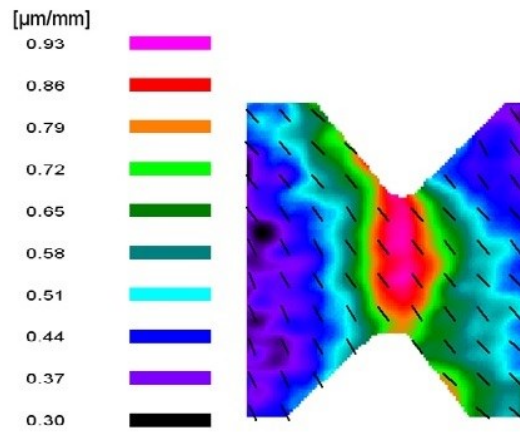
Obr. 9.4 Grafické zobrazení smykové deformace γ_{xy}



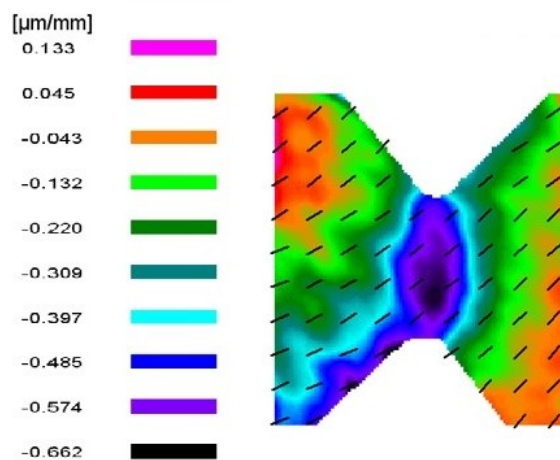
Obr. 9.5 Grafické zobrazení normálové deformace ϵ_x (ve směru x)



Obr. 9.6 Grafické zobrazení normálové deformace ϵ_y (ve směru y)



Obr. 9.7 Grafické zobrazení první hlavní deformace



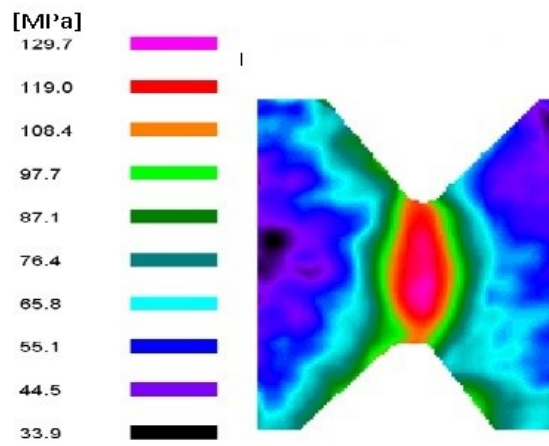
Obr. 9.8 Grafické zobrazení druhé hlavní deformace

Po vložení materiálových vlastností snímaného vzorku, který je opět vyroben z duralu:

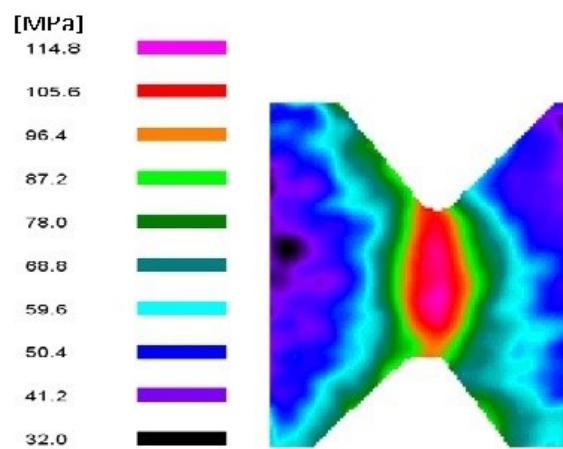
$$E_2 = 72,5 \text{ GPa}$$

$$\mu_2 = 0,34$$

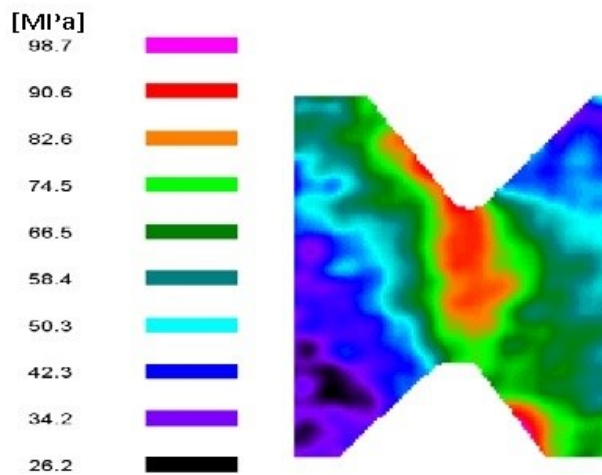
je přístroj Q100 schopen vyhodnotit jednotlivá napětí ale také vyhodnotit napětí podle jednotlivých hypotéz pevnosti. Jednotlivé hypotézy jsou zobrazeny na Obr.9.9, Obr.9.10 a Obr.9.11.



Obr. 9.9 Grafické zobrazení napětí podle Trescovy hypotézy



Obr. 9.10 Grafické zobrazení napětí podle HMH hypotézy



Obr. 9.11 Grafické zobrazení napětí podle Rankinovy hypotézy

9.2 Ukázka č.2

Ve druhé části je provedeno měření, které proběhlo přímo v praxi (z důvodu utajení není firma uvedena), kde byl měřeným objektem pant pračky. Materiál pantu má tyto materiálové vlastnosti:

$E_3 = 96 \text{ GPa}$ - modul pružnosti v tahu pantu

$\mu_3 = 0,3$ Poissonova konstanta

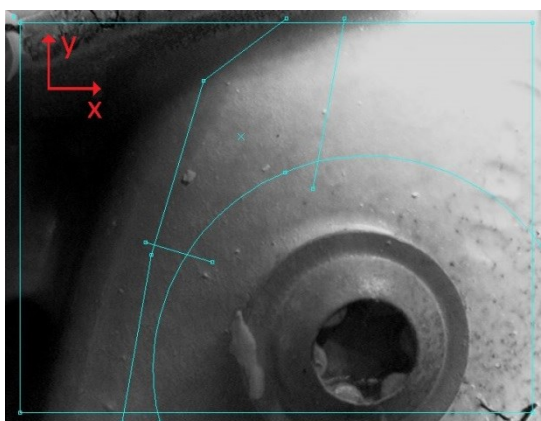
Namáhání pantu bylo statické, přes šroub silou F_2 o velikosti $F_2 = 380 \text{ N}$.

9.2.1 Naměřené výsledky

Umístění snímače pro tuto úlohu je zobrazeno na Obr. 9.12 kde přístroj Q100 snímá povrch pantu v blízkosti upevňovacího šroubu. Snímaný povrch je zachycen na Obr 9.13. kde je zobrazen i souřadnicový systém snímače.



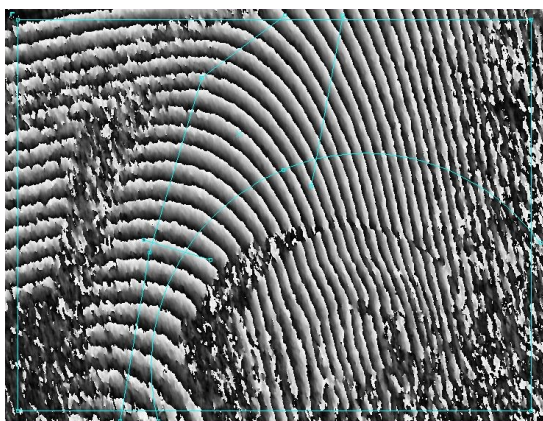
Obr. 9.12 Umístění snímače na pantu



Obr. 9.13 Nasnímaný povrch pantu

Na Obr. 9.14 jsou vidět interferenční pruhy vzniklé od zatížení. Pro vyhodnocení bylo vybráno místo v oblasti poškození pantu. Na Obr 9.15 je zobrazeno poškození vzniklé za

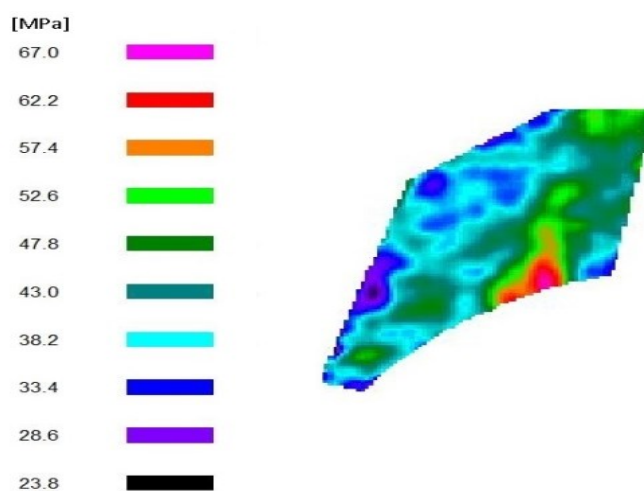
provozu, oblast poškození je vyhodnocena napěťově pomocí pevnostní hypotézy HMH která je vidět na Obr. 9.16.



Obr. 9.14 Interferenční pruhy namáhaného pantu



Obr. 9.15 Poškozený pant



Obr. 9.16 Grafické zobrazení výsledků napětí pomocí HMH hypotézy

10 Závěr

Úkolem této bakalářské práce bylo aplikovat měřicí přístroj Q100 na vybrané technické úloze a ověřit si jeho přesnost a využitelnost v praxi. Jako technická úloha pro testování přístroje Q100 byl zvolen čtyřbodový ohyb, který se prováděl na testovacím přístroji *TESTOMETRIC M500-50CT*. Tato úloha byla zvolena z důvodu následné kontroly naměřených hodnot přístrojem Q100, a to analytickými a numerickými výpočty, které pro danou úlohu byly relativně snadno řešitelné a lehce aplikovatelné pro srovnání. Při této kontrole se nekontrovaly pouze maximální nebo minimální hodnoty jednotlivých složek, ale i samotné průběhy. Provedly se dva experimenty, při nichž byl snímač přístroje Q100 umístěn vždy na jiném místě stejného testovaného tělesa, změnila se také vzdálenost tlačných a podpěrných válečků a velikost zatěžující síly.

Ve všech měřených úlohách se dosáhlo očekávaných hodnot nebo se k těmto hodnotám velmi přiblížilo. Jednotlivé měřené průběhy se od analytických průběhů (ideálních průběhů) lišily jen v malé míře. Ve většině případů naměřené hodnoty odpovídaly tvarům ideálních průběhů, pouze byly posunuty v souřadnicovém systému o určitou hodnotu. Největší zásahy do naměřených hodnot bylo třeba udělat v případech porovnávání číselných hodnot jednotlivých napětí. Kde se tyto naměřené průběhy v souřadnicovém systému upravily tak, aby co možná v největší míře odpovídaly průběhům analytickým, kdy v případě normálového napětí je nulová hodnota na neutrální ose nebo v případě smykového napětí je nulová hodnota na krajních vláknech a maximální hodnota na neutrální ose. Po těchto úpravách se dosáhlo velice dobré shody naměřených hodnot s analytickými hodnotami. V úloze č. 1 pro normálové napětí byl naměřený rozdíl 6,76 %, viz Tab. 8.2, a v úloze č. 2 pro smykové napětí byl rozdíl ještě menší 2,12 %, viz Tab. 8.3 kde se tímto způsobem ověřila i platnost výpočtu pomocí Žuravského věty.

Kontrola proběhla i v oblasti hlavních napětí, kde se kontrolovaly jejich směry. Tato kontrola proběhla vizuálně a to pomocí MKP, kdy na Obr. 8.5 a Obr. 8.8 je vidět vizuální shoda mezi naměřenými hlavními směry a hlavními směry MKP řešení.

V kapitole 9 se ukázalo, že přístroj Q100 neslouží jen pro laboratorní účely ([7], [8]), ale slouží také jako užitečný verifikační nástroj v praxi. Přístroj Q100 neslouží jen pro číselné vyhodnocení napětí, ale umožňuje zjistit také směry hlavních napětí, posuvů a přetvoření. Při správném využití může sloužit i jako kontrola experimentálních úloh, zda je dosaženo požadovaného napětíového stavu. Například v případě namáhání tělesa na smyk má působit

jen smyková složka a parazitní zatížení od ohybu či tahu by měly být zanedbatelné. Tyto informace jsou v oblasti zkoušení materiálů velice důležité.

Všechny naměřené hodnoty (grafické zobrazení, průběhy) byly z přístroje použity přímo, tedy bez žádných korekcí nebo filtrů. V případě filtrů a korekcí by se mohlo dosáhnout ještě větší shody.

11 Seznam použité literatury

- [1] TREBUŇA, František a František ŠIMČÁK. *Příručka experimentální mechaniky*. Košice: TopoPress, vydavatelství a tiskárna, 2007. Vedecké a odborné literatury. ISBN 978-80-8073-816-7.
- [2] Dokumentace k přístroji Testometric M500-50CT, LABOR machine, s.r.o. 2008. [<http://www.labor-labor.cz/>]
- [3] LENERT, Jiří. *Pružnost a pevnost I*. Ostrava: skripta VŠB-TU Ostrava, 1998. ISBN 80-248-0113-2
- [4] Dokumentace k přístroji Dantecdynamics Q100, Dantec Dynamics a Nova Instruments company, 2012. [<http://www.dantecdynamics.com/>]
- [5] SEDLÁK, Josef, Jana PRZECZKOVÁ, Richard KLUČKA a Luboš PEČENKA. *NAMÁHÁNÍ VZORKU TAHEM, SMYKEM A JEJICH KOMBINACÍ: Popis demonstračního zařízení*. Ostrava 2013.
- [6] ZLÁMAL, Jiří. *Aplikace metody ESPI u vybraných inženýrských úloh*. Ostrava, 2013. ZLA069_FS_N2301_3901T003_2013. Diplomová práce. VŠB-TU Ostrava.
- [7] Pečenka L., Kalina M., Halama R., Fojtík F. *Verification of ESPI Stress Analysis by Means of FEM*, Transactions of the VŠB - Technical University of Ostrava, Mechanical Series, 2013, p.65-68.
- [8] Halama, R., Kalina, M., Pečenka, L.. *Use of Digital Holography for Measuring Strains and Stresses*. International Masaryk Conference for Ph.D. Students and Young Researchers, 2012, vol. III, p. 2885-2891. ISBN 978-80-905243-3-0

Na závěr bych chtěl poděkovat vedoucímu, své bakalářské práce doc. Ing. Radimu Halamovi PhD. za věnovaný čas a užitečné rady a své rodině za podporu a důvěru.