

E **xperimentální** **A** **nalýza** **N** **apětí** **2004**

EXPERIMENTAL RESIDUAL STRESS ANALYSIS ON BEAM OF CONSTANT STRENGTH EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZA ZBYTKOVÝCH NAPĚTÍ NA NOSNÍKU STEJNÉ PEVNOSTI

Pavel Macura¹, Antonín Fiala²

Abstract: The paper is devoted to the problems of residual stress measurement and evaluation by means of hole-drilling strain gage method. A lot of measurements were performed on the beam of constant bending strength in order to methodology verification of evaluation method. The residual stresses at the unloaded and the bending stresses at the loaded beam were measured. The necessary material constants were evaluated too – the modulus of elasticity in tension and the Poisson's ratio. We had to determine the deformation sensitivity (k – factor) of the special six – element strain gage rosette. The results of measurements and bending stress calculation were compared, the agreement was relatively fine.

Keywords *residual stress, strain gauge rosette, hole drilling method.*

Klíčová slova *zbytková napětí, tenzometrická růžice, odvrtávací metoda.*

1. Úvod

Príspevek je venovaný problematice měření a vyhodnocení zbytkových napětí odvrtávací metodou. Hlavním cílem provedených experimentů je ověření metodiky vyhodnocení zbytkových napětí při postupném vrtání otvoru na nosníku stejné pevnosti v ohybu. Dále se sledoval vliv utažení šroubů v místě vetknutí na napjatost v nosníku, určily se potřebné materiálové konstanty nosníku a zjistil se deformační součinitel (k – faktor) šestiprvkové růžice.

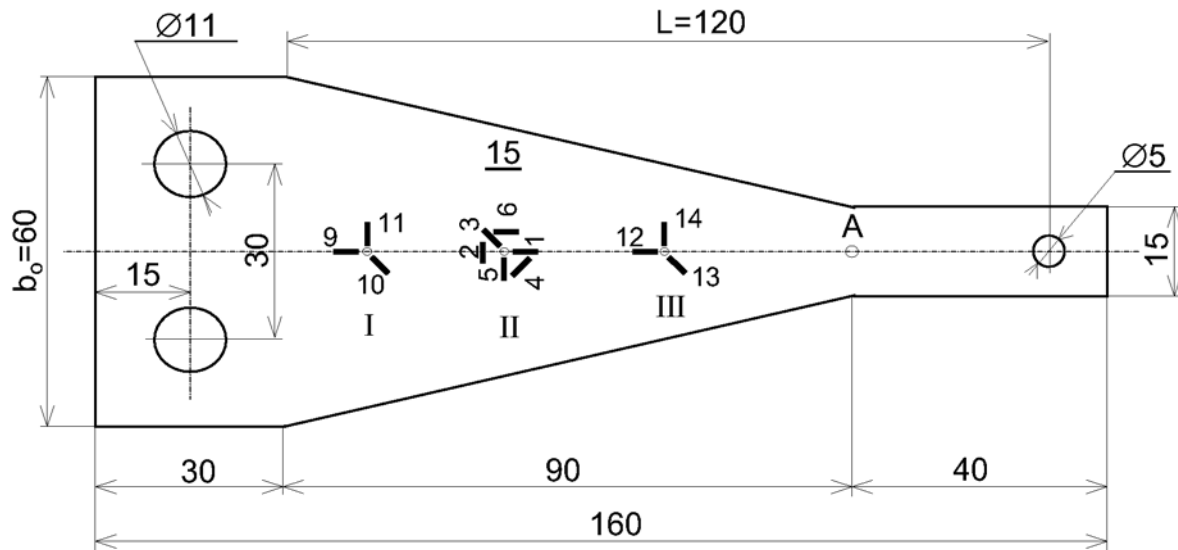
2. Způsob a rozsah provedených experimentů

Měření se provedla na nosníku stejné pevnosti v ohybu, jehož rozměry jsou uvedeny na obr.1. Na nosník se nalepily tři tenzometrické růžice – růžice I a II typu RY61-1,5/120S od firmy HBM a šestiprvková růžice III typu N2K-06-030RR-350/DP od firmy Vishay. Kromě těchto růžic se nalepily i tři jednoduché tenzometry – na stejném povrchu jako růžice tenzometr, označený 15, a

¹ Prof. Ing. Pavel Macura, DrSc, Katedra pružnosti a pevnosti, Fakulta strojní, VŠB-TU Ostrava, 17. listopadu 15, 708 33 Ostrava – Poruba, tel. 596 993 598, fax. 596 916 490, e-mail: pavel.macura@vsb.cz

² Ing. Antonín Fiala, Katedra pružnosti a pevnosti, Fakulta strojní, VŠB-TU Ostrava, 17. listopadu 15, 708 33 Ostrava – Poruba, tel. 596 993 455, fax. 596 916 490, e-mail: antonin.fiala@vsb.cz

na druhém, spodním povrchu nosníku dva tenzometry 7 a 8. Tenzometr 7 byl nalepen ve směru podélné osy nosníku, tenzometr 8 ve směru příčném.



Obr. 1 Nosník stejné pevnosti v ohybu s nalepenými tenzometry

Nosník byl uchycen v zatěžovacím rámu jako vetknutý utažením dvěma šrouby a zatěžován buď závažím anebo šroubem na opačném konci. Během utahování šroubů ve vetknutí se měřily výstupní signály všech tenzometrů. Po vynulování se provedlo postupné zatěžování a odlehčování nosníku se současným měřením deformací na všech tenzometrech. Přitom se měřila i velikost průhybu v bodě A nosníku.

Pro zjištění průběhu zbytkových napětí pod povrchem nosníku se provedlo postupné odvrtání kruhového otvoru $\varnothing 1,6$ do hloubky 1,6 mm u růžice I nezatíženého nosníku. Pro měření napětí zatíženého nosníku se tento zatížil pomocí šroubu, nikoliv závažím, protože při zatížení závažím a postupném odvrtávání by docházelo k rozkmitání zatíženého nosníku. Zatížení šroubem, odpovídající zatížení požadovaným závažím, se provedlo na základě odpovídajícího výstupního signálu tenzometrů. Po vynulování tenzometrů se provedlo postupné odvrtání u růžice II při zatíženém nosníku. Při stejném zatížení se pak provedlo postupné odvrtání šestiprvkové růžice III kruhovým otvorem $\varnothing 2,5$ mm přes celou tloušťku nosníku. Protože výrobce této růžice neudává její deformační citlivost, musel se tento k-faktor rovněž předem určit.

Tenzometrická měření se provedla pomocí měřicí soustavy, sestávající z přípravku RS – 200 pro vrtání kruhových otvorů, dvou přepínačů měřicích míst SB – 1 a tří statických tenzometrických aparatur P – 3500, vše od firmy Vishay.

3. Výsledky měření

3.1. Vliv utažení šroubů ve vetknutí na napjatost v nosníku

Během utahování šroubů ve vetknutí se měřily výstupní signály všech tenzometrů, výsledky měření jsou uvedeny v tab.1. Největší deformace zaznamenaly tenzometry, nalepené příčně. V místě růžice I, nalepené nejbližší vetknutí, vyvolalo silné utažení šroubů hlavní napětí velikosti

$\sigma_2 = -18,3 \text{ MPa}$ a $\sigma_1 = 4,8 \text{ MPa}$. Pro následující měření byly výstupní signály všech tenzometrů vynulovány.

3.2. Deformace a průhyby při postupném zatěžování a odlehčování nosníku

Nosník se postupně zatěžoval a odlehčoval pomocí závaží, přitom se měřily výstupní signály všech tenzometrů. Současně se měřil i průhyb nosníku v bodě A pomocí číslicového úchylkoměru. Protože výrobce šestiprvkové růžice neudal její deformační citlivost, provedla se tato měření s nastavením $k = 2$ pro tuto růžici. Výsledky měření jsou uvedeny v tab.2.

3.3. Určení deformační citlivosti šestiprvkové růžice

Výsledky měření v tab.2 umožňují určit deformační citlivost nalepené šestiprvkové růžice III. Protože deformační citlivost ostatních růžic a tenzometrů je známá, jsou pomocí nich změřeny skutečné deformace v měřených místech 7 až 15. Tyto deformace v odpovídajících směrech by měly být u nosníku stejné pevnosti v ohybu i v měřených místech 1 až 6 stejné, pokud by na tenzometrické aparatuře byla nastavena správná deformační citlivost šestiprvkové růžice a ne $k = 2$. Srovnáním naměřených hodnot deformací v místech 1 až 6 a 7 až 15 se vypočetla střední hodnota deformační citlivost šestiprvkové růžice $k = 1,864$.

3.4. Určení potřebných mechanických veličin materiálu nosníku

Pro výpočet zbytkových napětí odvrtávací metodou je nutno znát dvě důležité materiálové konstanty, a to modul pružnosti v tahu E a Poissonovo číslo μ . Pro určení modulu pružnosti v tahu E je nutno vypočítat ohybové napětí na povrchu nosníku. Pro maximální ohybové napětí platí:

$$\sigma_o = \frac{M(x)}{W(x)} = \frac{F \cdot x \cdot 6 \cdot l}{b_o h^2 \cdot x} = \frac{6 l}{b_o h^2} F \quad (1)$$

Při zatížení nosníku závažím $Z = 20 \text{ kg}$ je ohybové napětí na povrchu nosníku stejné pevnosti rovno:

$$\sigma_o = \frac{6 \cdot 120}{60 \cdot 4,2^2} 20 \cdot 9,81 = 133,47 \text{ MPa}$$

Pro měřené místo 12, nejvíce vzdálené od vetknutí a tím nejméně tímto vetknutím ovlivněné, pak za předpokladu jednoosého stavu napjatosti pro výpočet modulu pružnosti v tahu E platí:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{133,47}{6,73 \cdot 10^{-4}} = 1,983 \cdot 10^5 \text{ MPa} \quad (2)$$

Pro určení Poissonova čísla μ se použily změřené deformace tenzometrů 12 a 14, nejvíce vzdálených od místa vetknutí:

$$\mu = \frac{\varepsilon_{\text{př}}}{\varepsilon_{\text{pod}}} = \frac{\varepsilon(14)}{\varepsilon(12)} = \frac{216}{673} = 0,321 \quad (3)$$

Tyto dvě materiálové konstanty se dále použily pro veškeré výpočty zbytkových napětí u všech tří tenzometrických růžic.

3.5. Zbytkové napětí v nezatíženém nosníku

Za účelem zjištění zbytkových napětí v nosníku se provedlo postupné vrtání kruhového otvoru ve středu pravoúhlé tenzometrické růžice I. K vyhodnocení měření se použila metodika, publikovaná v práci [1]. Pro řešení se vypracoval vlastní program pro počítač a výsledky měření jsou zpracovány ve formě protokolu z měření, viz obr.2. Protokol obsahuje hlavičku, tabulku a graf. V hlavičce jsou uvedeny základní parametry měření a materiálu měřeného vzorku. V tabulce jsou mj. uvedeny změřené hodnoty uvolněných deformací ε_a , ε_b a ε_c a vypočtené hodnoty hlavních zbytkových napětí σ_1 a σ_2 , průběhy těchto hlavních zbytkových napětí jsou vykresleny v grafu tohoto protokolu. Kromě hlavních napětí jsou v protokolu uvedena i zbytková napětí ve směrech podélné a příčné osy nosníku jakož i redukované zbytkové napětí dle hypotézy HMM. Z průběhů těchto napětí je vidět, že zbytková napětí v měřeném nosníku jsou velmi malá kromě oblasti tenké povrchové vrstvy.

3.6. Ohybové napětí v zatíženém nosníku

K ověření správnosti použité metodiky vyhodnocení se provedlo měření průběhu ohybových napětí ve směru tloušťky zatíženého nosníku stejné pevnosti v ohybu. Měření se provedlo při postupném vrtání kruhového otvoru ve středu pravoúhlé tenzometrické růžice III. Výsledky měření jsou uvedeny rovněž formou protokolu z měření, viz obr.3. Je vidět, že směr hlavního napětí σ_1 je prakticky totožný se směrem podélné osy nosníku, druhé hlavní napětí σ_2 je velmi malé, mělo by být nulové u nosníku bez zbytkových napětí. Součet zbytkových napětí z tabulky obr.2 a vyhodnocených napětí z tabulky obr.3 ve směru podélné osy nosníku udává změřené ohybové napětí v odpovídající hloubce pod povrchem nosníků, viz tabulka 3. Průběh takto vyhodnocených σ_o a teoreticky vypočtených ohybových napětí σ_{to} je uveden na obr.4.

3.7. Měření pomocí šestiprvkové růžice

Na tomto nosníku stejné pevnosti v ohybu se rovněž provedlo zkušební měření pomocí šestiprvkové růžice II. Všechny tenzometry růžice byly propojeny do čtvrtmostů a měřily jejich deformace zvlášť, což bylo odlišné od běžného zapojení těchto růžic do tří půlmostů. Vrtání a měření se provedlo při zatížení nosníku šroubem, které odpovídalo zatížení závažím $Z = 20$ kg. Průměr vrtaného otvoru byl 2,5 mm. Výsledky změřených uvolněných deformací tenzometry 1 až 6 šestiprvkové růžice jsou uvedeny v tabulce 4, jsou zde uvedeny i deformace tenzometru 7, kterým bylo kontrolováno správné zatížení nosníku během vrtání a měření. V tabulce jsou rovněž uvedeny vypočtené hodnoty uvolněných deformací, které bychom získali zapojením odpovídajících tenzometrů do půlmostů. Tyto hodnoty slouží jako vstupní parametry pro výpočet zbytkových napětí pomocí programu H-DRILL [2]. V tabulce 4 jsou pak taky uvedeny hodnoty vyhodnocených hlavních napětí σ_1 dle tohoto programu. Na obr. 5 je pak průběh hlavního napětí σ_1 podél hloubky vrtaného otvoru vykreslen, současně je tam zakreslen i průběh vypočteného ohybového napětí σ_{to} .

Výhodou použití šestiprvkové růžice oproti běžné tříprvkové růžici je skutečnost, že výstupní signály jsou podstatně vyšší. Srovnáme-li tyto výstupní signály pro odvrtnou hloubku např. 1,016 mm z tabulky na obr.3 a z tabulky 4, vidíme, že výstupní signál u šestiprvkové růžice je

zhruba čtyřnásobný, což se výrazně projeví na přesnosti měření, hlavně když měřené uvolněné deformace jsou poměrně malé.

Závěr

V příspěvku jsou stručně uvedeny výsledky měření zbytkových napětí a ohybových napětí na nosníku stejné pevnosti v ohybu. Měření se provedla jak pomocí tříprvkových, tak i šestiprvkové růžice metodou postupného odvrtávání. Výsledky měření se srovnaly s teoreticky vypočtenými průběhy ohybových napětí a byla zjištěna poměrně dobrá shoda změřených a vypočtených napětí.

Literatura

- [1] TECH NOTE TN-503-5: Measurement of Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain Gage Method. Firemní materiály fy Vishay, 1993 [1] Author: *Work title* – place of publication, year of publication, sites number (for book only)
- [2] Schajer G.S.: Hole-Drilling Residual Stress Calculation Program, 2001.

Příspěvek byl zpracován na základě řešení grantového projektu GAČR č.101/01/0089.

UTAŽENÍ ŠROUBŮ	MĚŘENÉ MÍSTO														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
mírné	0	0	-4	-5	-4	-3	-2	3	-1	-1	-1	1	1	-1	2
střední	3	-24	-6	-13	-17	8	-12	43	20	-4	-52	3	0	-6	7
silné	8	-31	-12	-12	-25	12	-14	66	32	-11	-79	5	-1	-8	3

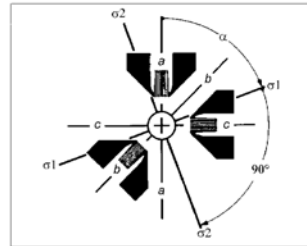
TAB. 1: Vliv utažení šroubů ve vetknutí na výstupní signál tenzometrů [μS]

Z [kg]	Y [mm]	MĚŘENÉ MÍSTO														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
5	0,41	155	-39	56	60	-45	149	-140	42	162	58	-36	167	53	-52	170
10	0,82	310	-81	109	118	-85	301	-337	85	323	114	-76	333	106	-106	343
15	1,23	458	-123	162	168	-127	453	-507	130	486	171	-117	500	159	-160	518
20	1,66	625	-161	222	233	-173	619	-684	177	653	228	-158	673	214	-216	696
15	1,26	475	-122	168	173	-131	461	-517	133	494	175	-119	510	164	-163	523
10	0,86	318	-84	115	121	-92	312	-349	88	332	120	-78	345	114	-109	348
5	0,44	162	-42	60	56	-46	151	-177	43	168	63	-37	176	59	-53	169
0	0,025	0	-2	0	-1	-1	-1	-2	0	0	2	2	0	0	2	-11

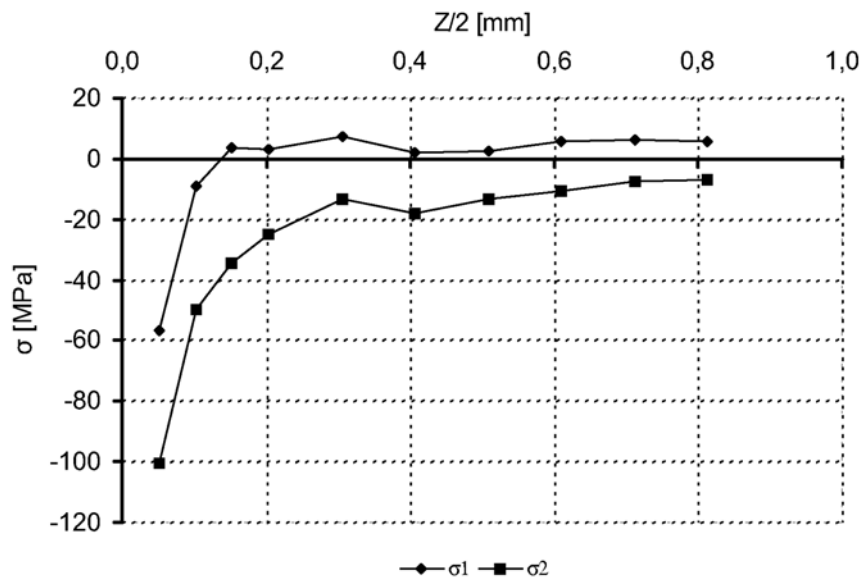
TAB. 2: Výstupní signál tenzometrů při postupném zatěžování a odlehčování nosníku [μS]

Vyhodnocení měření zbytkových napětí

Měřicí místo : 1 - nosníček
 Průměr otvoru : 1,6 mm
 Typ růžice : RY61 1,5/120S
 Materiál :
 E : 1,98E+05
 μ : 0,321



Z	Z/D	ϵ_a	ϵ_b	ϵ_c	σ_1	σ_2	α	σ_r	σ_t	σ_{red}
mm	-	μS	μS	μS	MPa	MPa	°	MPa	MPa	MPa
0,102	0,020	6	6	3	-56,4	-100,2	112,5	-93,8	-62,9	87,0
0,203	0,040	7	7	1	-8,8	-49,5	112,5	-43,5	-14,8	45,7
0,305	0,060	8	8	-1	3,6	-34,3	112,5	-28,7	-2,0	36,2
0,406	0,080	9	7	-2	2,9	-24,7	106,2	-22,5	0,8	26,3
0,61	0,120	7	7	-4	7,4	-13,5	112,5	-10,4	4,4	18,3
0,813	0,159	13	11	-3	2,2	-18,0	108,4	-16,0	0,2	19,2
1,016	0,199	12	9	-4	2,4	-13,5	106,0	-12,3	1,2	14,9
1,219	0,239	11	8	-7	5,5	-10,8	106,9	-9,4	4,2	14,3
1,422	0,279	9	5	-8	6,1	-7,4	104,0	-6,6	5,3	11,7
1,626	0,319	8	6	-7	5,6	-6,9	108,1	-5,7	4,4	10,9

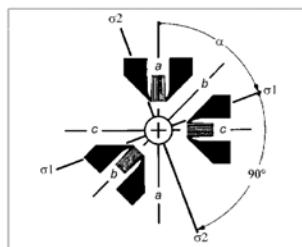


VŠB - TU OSTRAVA - FAKULTA STROJNÍ - katedra pružnosti a pevnosti

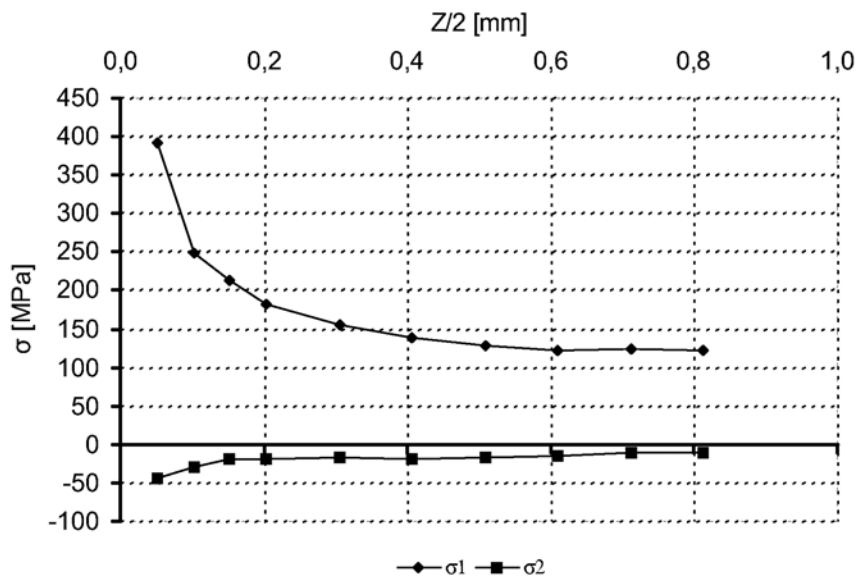
Obr. 2 Zbytková napětí v nezatíženém nosníku

Vyhodnocení měření zbytkových napětí

Měřicí místo : 2 - nosníček
 Průměr otvoru : 1,6 mm
 Typ růžice : RY61 1,5/120S
 Materiál :
 E : 1,98E+05
 μ : 0,321



Z	Z/D	ϵ_a	ϵ_b	ϵ_c	σ_1	σ_2	α	σ_r	σ_t	σ_{red}
mm	-	μS	μS	μS	MPa	MPa	°	MPa	MPa	MPa
0,102	0,020	-31	-8	11	391,7	-43,6	-2,7	-42,6	390,7	415,3
0,203	0,040	-44	-13	14	248,7	-30,1	-2,0	-29,8	248,4	265,0
0,305	0,060	-61	-20	17	212,6	-19,6	-1,5	-19,5	212,4	223,0
0,406	0,080	-74	-24	21	183,0	-18,3	-1,5	-18,2	182,9	192,8
0,61	0,120	-98	-32	30	154,5	-17,5	-0,9	-17,4	154,5	163,9
0,813	0,159	-115	-39	40	137,8	-19,1	0,6	-19,0	137,8	148,3
1,016	0,199	-125	-42	45	127,4	-16,2	0,7	-16,2	127,3	136,2
1,219	0,239	-133	-46	50	123,1	-14,9	1,4	-14,8	123,0	131,2
1,422	0,279	-140	-49	52	123,3	-11,7	1,5	-11,6	123,2	129,5
1,626	0,319	-143	-50	54	121,9	-10,9	1,6	-10,8	121,8	127,8

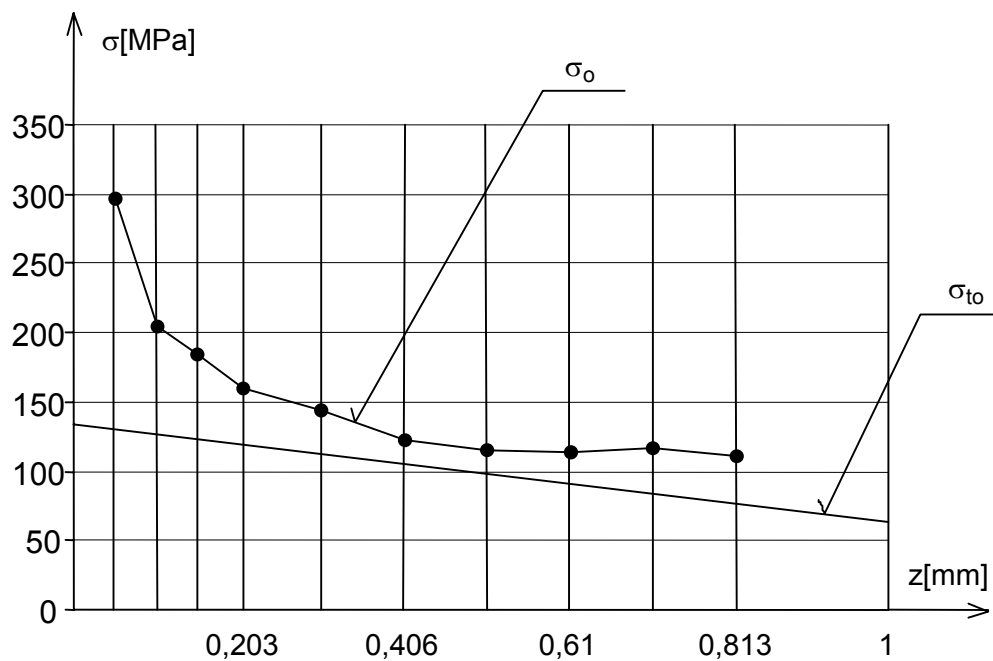


VŠB - TU OSTRAVA - FAKULTA STROJNÍ - katedra pružnosti a pevnosti

Obr. 3 Napětí v zatíženém nosníku

	z [mm]	σ_{zb} [MPa]	σ_v [MPa]	σ_o [MPa]
1	0,051	-93,8	390,7	296,9
2	0,102	-43,5	248,4	204,9
3	0,152	-28,7	212,4	183,7
4	0,209	-22,5	182,9	160,4
5	0,305	-10,4	154,5	144,1
6	0,406	-16,0	137,8	121,8
7	0,508	-12,3	127,3	115,0
8	0,610	-9,4	123,0	113,6
9	0,711	-6,6	123,2	116,6
10	0,813	-5,7	121,8	110,4

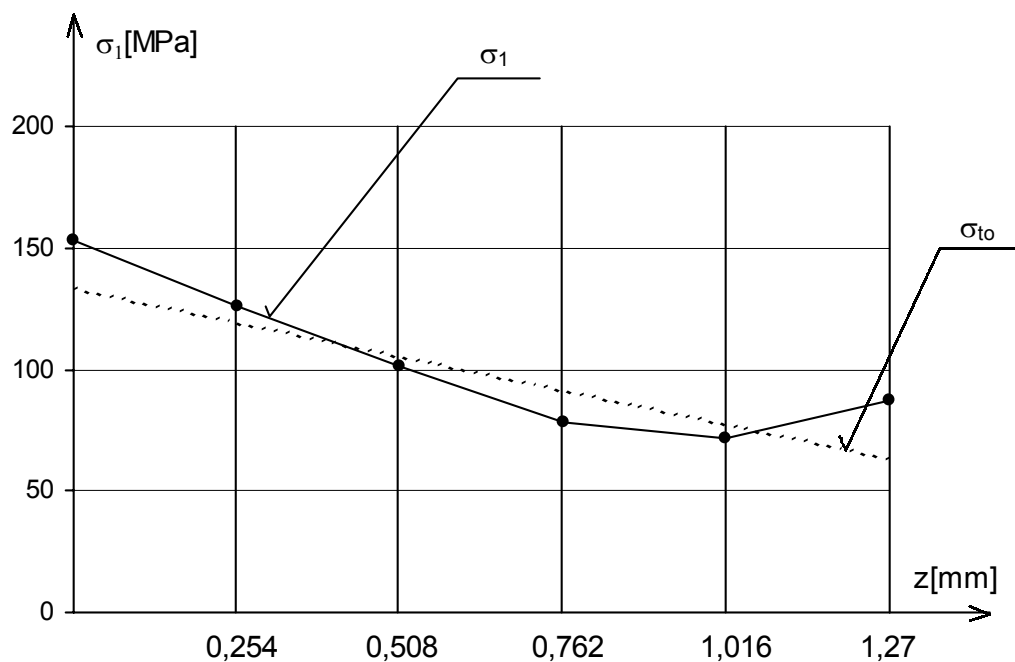
TAB. 3 Zbytková, výsledná a ohybová napětí pod povrchem nosníku



Obr. 4 Průběhy změřených σ_o a vypočtených σ_{to} ohybových napětí pod povrchem nosníku

Z [mm]		Měřené místo							$(\varepsilon_r - \varepsilon_t)$			σ_1 [MPa]
		1	2	3	4	5	6	7	$(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)$	$(\varepsilon_3 - \varepsilon_4)$	$(\varepsilon_5 - \varepsilon_6)$	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	153
1	0,254	-174	29	-79	20	68	28	-689	-203	-99	40	126
2	0,508	-287	62	-118	40	96	47	-689	-349	-158	49	101
3	0,762	-366	90	-145	56	115	62	-689	-456	-201	53	78
4	1,016	-409	109	-162	68	122	72	-689	-518	-230	50	72
5	1,27	-427	121	-169	75	125	77	-689	-548	-244	48	87
6	1,524	-440	128	-177	82	125	82	-687	-568	-259	43	-
7	1,778	-450	133	-184	88	127	86	-682	-583	-272	41	-
8	2,032	-450	148	-183	100	131	89	-682	-598	-283	42	-
9	2,286	-435	148	-184	99	149	92	-681	-583	-283	57	-
10	2,54	-426	155	-184	97	163	92	-680	-581	-281	71	-

TAB. 4 Výstupní signály tenzometrů šestiprvkové růžice 030 RR [μS]



Obr. 5 Průběhy hlavních změřených σ_1 a vypočtených ohybových σ_{to} napětí