

Experimentální **A**nalýza **N**apětí **2005**

RESIDUAL STRESS MEASUREMENTS BY MEANS OF SIX-ELEMENT ROSETTE PATTERN

MĚŘENÍ ZBYTKOVÝCH NAPĚTÍ POMOCÍ ŠESTIPRVKOVÉ RŮŽICE

Pavel Macura, Antonín Fiala, Rostislav Kubala, David Kubesa*

Abstract: The paper is devoted to the problems of residual stress measurement and evaluation by means of hole-drilling strain gage method and six-element rosette pattern. The original 030 RR six-element rosette pattern and composed of three 2-element 90° tee stacked rosettes were used for the measurements. The through-hole and blind-hole drilling were performed and evaluated. The measurements were realized on the rolled strip, wheel-brake disk and beam of constant bending strength. The differences between results of measurements by means of six-element and 3-element 45° rectangular stacked rosettes were established.

Keywords

residual stress, hole drilling method, six-element rosette pattern

Klíčová slova

zbytková napětí, odvrtávací metoda, šestiprvková tenzometrická růžice

1. Úvod

Odvrtávací metoda je snad nejpoužívanější metodou měření zbytkových napětí. K měření se používají zpravidla speciální pravoúhlé tříprvkové růžice. Firma Vishay uvedla v poslední době na trh šestiprvkovou růžici typu 030 RR s orientací tří mřížek tenzometrů ve směru radiálním a tří ve směru obvodovém vzhledem k vrtanému otvoru ve středu růžice. Výstupní signál této růžice je podstatně vyšší oproti stávajícím růžicím ze dvou důvodů:

- a) mřížky tenzometrů růžice jsou nalepeny v oblasti vyšších hodnot uvolněných deformací při vrtání kruhového otvoru

* Prof. Ing. Pavel Macura, DrSc, Ing. Antonín Fiala, Ing. Rostislav Kubala, CSc, Ing. David Kubesa, 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

b) tenzometry růžice jsou zapojeny do tří půlmostí, zároveň jsou půlmosty teplotně kompenzovány.

Ve snaze získat zkušenosti s použitím šestiprvkových růžic jsme provedli několik přípravných měření, jejichž výsledky jsou obsahem tohoto příspěvku.

2. Šestiprvková růžice z radiálních tenzometrů

Za účelem zjištění vlivu nerovnoměrného rozložení zbytkových napětí na povrchu součásti se v okolí vrtaného otvoru nalepilo šest tenzometrů typu 3/120 LY 11 dle obr.1. Trojice tenzometrů a, b, c a a_1 , b_1 , c_1 tvoří prakticky dvě pravoúhlé růžice I a II, umožňující měření zbytkových napětí odvrátací metodou. Měření se provedlo metodou postupného vrtání otvoru \varnothing 5,2 mm do hloubky 5,2 mm při 12 postupných krocích. Měřenou součástí byl brzdový kotouč železničního dvojkolí z tvárné litiny s žebry, u kterého byla předem zjištěna poměrně vysoká zbytková napětí a kde vzhledem k žebrování se předpokládaly i jejich velké gradienty na měřeném povrchu. Vyhodnocení zbytkových napětí se provedla pro růžice I a II s označením σ_{red} I a σ_{red} II a rovněž pro střední hodnoty změřených uvolněných deformací, vypočtených z údajů tenzometrů a- a_1 , b- b_1 a c- c_1 , označení σ_{red} III. Srovnání výsledků měření na základě vyhodnocených zbytkových redukovaných napětí dle hypotézy HMH je uvedeno v tabulce 1. Maximální rozdíl mezi výsledky z růžice I a II je 31 MPa, což je asi 12%. To ukazuje na vliv orientace mřížek tenzometrické růžice na výsledek měření zbytkových napětí při jejich nerovnoměrném rozložení na povrchu měřené součásti.

3. Šestiprvkové růžice z tenzometrických křížů

Šestiprvkovou růžici s radiálně a obvodově orientovanými mřížkami tenzometrů je možno sestavit a nalepit i z tenzometrických křížů. Pomocí takto sestavených růžic jsme provedli dvě měření zbytkových napětí – první při odvrátání otvoru najednou a druhé při postupném vrtání kruhového otvoru.

3.1. Měření na válcovaném ocelovém pásu

Měření a vyhodnocení z plné hloubky vyvrtaného otvoru se uskutečnilo na vzorku z válcovaného pásu tloušťky 5 mm. Růžice byla sestavena ze tří tenzometrických křížů typu WA-06-120 WT-120, nalepených na roztečné kružnici \varnothing 13 mm podobně jako radiální tenzometry u tříprvkové růžice typu RY 21-3/120 firmy HBM. Takto nalepená šestiprvková růžice je znázorněna na obr.2. Po vyvrtání průchozího otvoru se změřily uvolněné deformace na všech tenzometrech, zapojených do čtvrtmostů a vyhodnocení zbytkových napětí se provedlo jednak z údajů pouze radiálních tenzometrů jako u klasické tříprvkové růžice, jednak z údajů všech tenzometrů, jako by byly zapojeny do tří půlmostí podobně jako u šestiprvkové růžice typu 030 RR.

3.1.1. Vyhodnocení pouze z radiálních tenzometrů

Pro vyhodnocení hlavních zbytkových napětí se použily základní vztahy, platné pro tříprvkovou pravoúhlou růžici [1]:

$$\sigma_{1,2} = \frac{\varepsilon_{ar} + \varepsilon_{cr}}{4A} \pm \frac{\sqrt{2}}{4B} \sqrt{(\varepsilon_{ar} - \varepsilon_{br})^2 + (\varepsilon_{cr} - \varepsilon_{br})^2} \quad (1)$$

$$A = -\frac{1+\mu}{2E} \frac{1}{\bar{r}^2}; B = -\frac{1+\mu}{2E} \left(\frac{4}{1+\mu} \frac{1}{\bar{r}^2} - \frac{3}{\bar{r}^4} \right); \bar{r} = \frac{D}{D_o} \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{(\varepsilon_{ar} - \varepsilon_{br}) + (\varepsilon_{cr} - \varepsilon_{br})}{(\varepsilon_{ar} - \varepsilon_{cr})} \quad (2)$$

Změřené hodnoty uvolněných deformací, potřebné materiálové konstanty pásu a vyhodnocené velikosti zbytkových napětí jsou přehledně uvedeny v tabulce 2.

3.1.2. Vyhodnocení šestiprvkové růžice z půlmostů

Pro vyhodnocení šestiprvkové růžice se zapojenými tenzometry do tří půlmostů je nutno odvodit algoritmy pro výpočet zbytkových napětí z naměřených výstupních signálů půlmostů, odpovídajících uvolněným deformacím v důsledku vrtání kruhového otvoru ve středu růžice. V tabulce 3 jsou nejdříve vypočteny výstupní signály půlmostů ze změřených uvolněných deformací z jednotlivých tenzometrů, zapojených do čtvrtmostů. Na základě vlastních odvozených algoritmů pro vyhodnocení šestiprvkové růžice se pak vypočetly hodnoty hlavních a redukovaného zbytkového napětí, výsledky výpočtů jsou rovněž uvedeny v tabulce 3. Srovnáním vyhodnocených větších hlavních σ_1 a redukovaných σ_{red} zbytkových napětí z tabulky 2 a 3 je vidět, že při vyhodnocení jako šestiprvková růžice jsou hodnoty těchto zbytkových napětí o 35% nižší.

3.2. Měření na brzdovém kotouči

Měření zbytkových napětí při postupném vrtání kruhového otvoru při použití šestiprvkové růžice, sestavené ze tří tenzometrických křížů typu WA-06-120 WT-120 dle obr. 3, jsme provedli na brzdovém kotouči železničního dvojkolí podobně jako měření se šesti pouze radiálními tenzometry. Vyhodnotili jsme zbytková napětí nejdříve z naměřených hodnot uvolněných deformací po odvrtání celého otvoru jednak pouze z údajů radiálně orientovaných tenzometrů, jednak jako šestiprvkovou růžici. Dále pak jsme provedli vyhodnocení při postupném vrtání otvoru rovněž pouze z údajů radiálních tenzometrů, jakož i šestiprvkové růžice, sestavené z tenzometrických křížů.

3.2.1. Vyhodnocení z plné hloubky pouze z radiálních tenzometrů

Protože se u této součásti při měření vrtá kruhový otvor slepý, je nutno v rovnici (1) konstanty A a B korigovat [2] a použít konstanty \bar{A} a \bar{B} :

$$\bar{A} = -\frac{1+\mu}{2E} \bar{a}; \quad \bar{B} = -\frac{1}{2E} \bar{b} \quad (4)$$

Výsledky měření a vyhodnocení jsou přehledně uvedeny v tabulce 4.

3.2.2. Vyhodnocení z plné hloubky jako šestiprvková růžice

Vyhodnocení se provedlo podle vlastních odvozených algoritmů s uvážením korekce pro odvrtný slepý otvor. Ze změřených signálů jednotlivých tenzometrů se nejdříve odvodily výstupní signály půlmostů a pak hodnoty zbytkových napětí, výsledky jsou přehledně uvedeny v tabulce 5. Ze srovnání výsledků měření zbytkových napětí v tabulce 4 a 5 je opět vidět, že vyhodnocení šestiprvkové růžice dává opět nižší hodnoty zbytkových napětí než při vyhodnocení pouze z radiálních tenzometrů, v tomto případě zhruba o 27%.

3.2.3. Vyhodnocení při postupném vrtání pouze z radiálních tenzometrů

Použitím výstupních signálů pouze z radiálních tenzometrů se vyhodnocení provedlo jako u klasické pravoúhlé růžice [2]. Výsledky jsou zpracovány ve formě protokolu z měření, který obsahuje úvodní hlavičku se základními údaji o tenzometrické růžici a materiálu vzorku, dále pak tabulku naměřených a vypočtených hodnot a graf průběhu hlavních zbytkových napětí do poloviny odvrtné hloubky. Pro tento případ vyhodnocení je protokol z měření uveden na obr.4.

3.2.4. Vyhodnocení při postupném vrtání jako šestiprvková růžice

Pro všechny kroky při vrtání se nejdříve stanovily výstupní signály půlmostů a z nich se podle vlastních algoritmů vypočetly velikosti zbytkových napětí. Výsledky jsou uvedeny v protokolu z měření na obr. 5. Z tabulek i grafů na obr. 4 a 5 je vidět, že vyhodnocení jako šestiprvková růžice dává opět nižší hodnoty zbytkových napětí, pro redukovaná napětí v hloubce 2,5 mm o 24%.

4. Měření šestiprvkovou růžicí 030 RR

Po těchto přípravných měřeních se šestiprvkovými růžicemi, sestavenými z tenzometrických křížů, jsme přistoupili k měření s nalepenou originální růžicí 030 RR firmy Vishay. Měření se provedlo na nosníku stejné pevnosti v ohybu a některé výsledky byly publikovány v práci [3]. Na nosníku byly nalepeny i dvě pravoúhlé růžice typu RY 61-1,5/120S od firmy HBM a kontrolní jednoduché tenzometry. Jedna z těchto růžic se použila pro měření zbytkových napětí ve vyžítaném nezatíženém nosníku a druhá pro srovnání výsledků měření s šestiprvkovou růžicí při stejném zatížení nosníku. Průběh ohybových napětí v zatíženém nosníku lze snadno vypočítat a sloužil pro srovnání vyhodnocených napětí při postupném vrtání otvorů u pravoúhlé a šestiprvkové růžice. Pro vyhodnocení měření šestiprvkovou růžicí prodává firma Vishay program [4], který autoři příspěvku nevládní, vyhodnocení se však provedlo ve ŽĐASu, výsledek je uveden na obr.6. Autoři provedli vyhodnocení napětí pomocí klasické pravoúhlé růžice, a dále pak jednak z údajů pouze radiálních tenzometrů šestiprvková růžice, jednak jako ze šestiprvkové růžice podle vlastního vypracovaného programu. Výsledky řešení jsou uvedeny na obr.7, kde vyhodnocené hodnoty jsou již korigovány o původní naměřené velikosti zbytkových napětí v nezatíženém nosníku. Protože průběh ohybových napětí by měl být lineární, provedly se lineární regrese vyhodnocenými body při jednotlivých měřeních a vyhodnoceních. Z obr.7 je vidět, že vyhodnocená napětí pomocí tříprvkové jakož i pouze z radiálních tenzometrů

šestiprvkové růžice jsou podstatně vyšší než napětí vypočtená, zatímco při vyhodnocení šestiprvkové růžice jsou zjištěná napětí vypočteným napětím blízká.

Řešení deformačního a napěťového pole v okolí vrtaného kruhového otvoru na stejném nosníku se provedlo i numericky pomocí MKP. Z numerického řešení se vypočetly hodnoty uvolněných deformací ve středech mřížek jednotlivých tenzometrů šestiprvkové růžice, které lze srovnat s hodnotami změřenými. Srovnání je uvedeno na obr.8 pro zapojení tenzometrů růžice do čtvrtmostů, na obr.9 pro zapojení do půlmostů. Rozdíly mezi vypočtenými a změřenými hodnotami jsou zde ještě ovlivněny původními zbytkovými deformacemi v nosníku, které zde nebyly zahrnuty.

5. Závěr

V příspěvku jsou stručně shrnuty některé výsledky, které byly získány při měření zbytkových napětí pomocí šestiprvkových růžic jak složených z tenzometrických křížů, tak originální 030 RR. Rovněž se provedlo srovnání vyhodnocených zbytkových napětí pomocí tříprvkové, šestiprvkové a tříprvkové růžice, vytvořené pouze z radiálních tenzometrů šestiprvkové růžice.

Potvrdila se výhoda šestiprvkové růžice, spočívající v podstatně vyšších výstupních signálech, při měření na nosníku byl výstupní signál zhruba čtyřnásobný než u růžice tříprvkové. To se výrazně projeví na přesnosti měření, hlavně když měřené uvolněné deformace jsou poměrně malé.

Zjistil se ovšem nesoulad mezi výsledky měření, získanými pomocí tříprvkové růžice anebo složené pouze z radiálních tenzometrů šestiprvkové růžice a růžice šestiprvkové. V prvním případě byly vyhodnocené hodnoty zbytkových napětí vyšší než u růžice šestiprvkové. Ze srovnání s vypočteným průběhem napětí na nosníku vyplývá, že při vyhodnocení jako šestiprvkové růžice jak podle programu [4], tak podle programu vlastního jsou vyhodnocené hodnoty napětí blíže hodnotám vypočteným. Autoři chtějí měření na nosníku ještě zopakovat a hledat příčinu toho rozporu.

Literatura

- [1] König, G.: *Bohrlochmethode*, MPA Stuttgart, 1987
- [2] TECH NOTE TN-503-5: *Measurement of Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain Gage Method*. Firemní materiál fy Vishay, 1993
- [3] Macura, P., Fiala, A.: *Experimentální analýza zbytkových napětí na nosníku stejné pevnosti*. EAN 2004, Kašperské Hory, 1.-3.6.2004
- [4] Schajer, G. S.: *Hole-Drilling Residual Stress Calculation Program*, 2001.

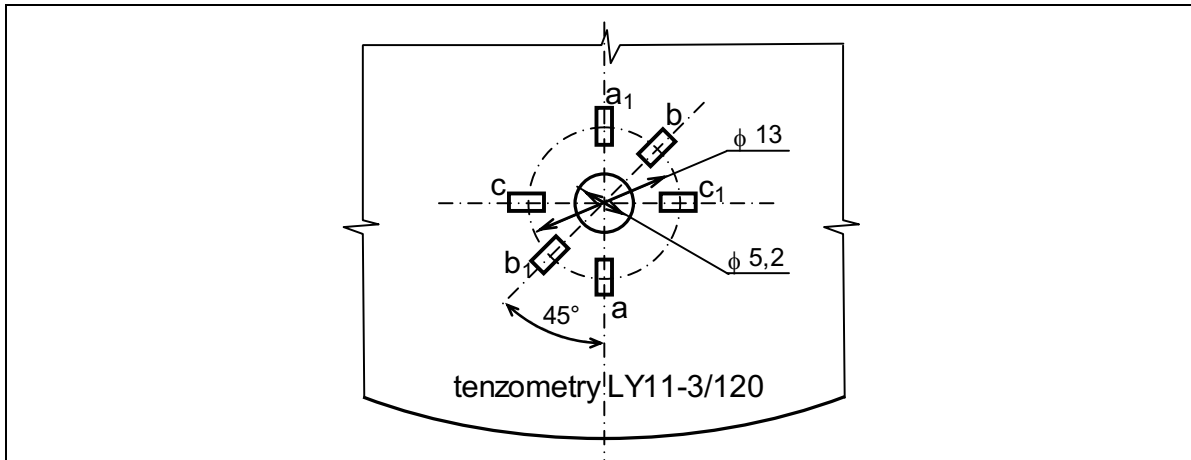
Z [mm]	0,152	0,305	0,457	0,61	0,762	1,397	2,032	2,667	3,302	3,937	4,572	5,207
σ_{red} I [MPa]	212	226	231	235	242	265	273	277	284	289	283	276
σ_{red} II [MPa]	228	239	248	266	273	287	290	287	290	292	286	279
σ_{red} III [MPa]	220	235	239	251	259	277	281	282	287	290	284	278
Tab. 1 : Zbytková redukovaná napětí, vyhodnocená ze šesti radiálních tenzometrů												

ϵ_{ar}	ϵ_{at}	ϵ_{br}	ϵ_{bt}	ϵ_{cr}	ϵ_{ct}	E	μ	\bar{r}	α	σ_1	σ_2	σ_{red}
μS	μS	μS	μS	μS	μS	MPa	-	-	°	MPa	MPa	MPa
-95	6	-81	32	-14	32	$2,14 \cdot 10^5$	0,28	2,5	17	76	38	66
Tab. 2 : Změřené a vyhodnocené parametry na vzorku válcovaného pásu												

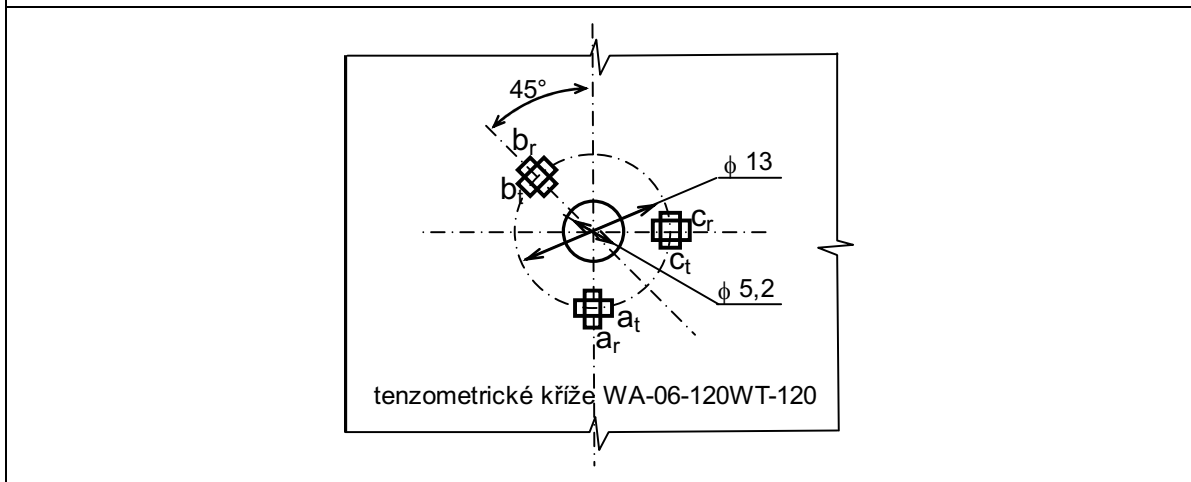
$\epsilon_{at} - \epsilon_{ar}$	$\epsilon_{bt} - \epsilon_{br}$	$\epsilon_{ct} - \epsilon_{cr}$	E	μ	\bar{r}	α	σ_1	σ_2	σ_{red}
μS	μS	μS	MPa	-	-	°	MPa	MPa	MPa
101	113	46	$2,14 \cdot 10^5$	0,28	2,5	17	56	22	49
Tab. 3 : Vyhodnocení šestiprvkové růžice na vzorku válcovaného pásu									

ϵ_{ar}	ϵ_{at}	ϵ_{br}	ϵ_{bt}	ϵ_{cr}	ϵ_{ct}	E	μ	\bar{r}	α	σ_1	σ_2	σ_{red}
μS	μS	μS	μS	μS	μS	MPa	-	-	°	MPa	MPa	MPa
-135	175	-338	201	-514	248	$1,52 \cdot 10^5$	0,26	2,5	2	265	141	230
Tab. 4 : Vyhodnocení z radiálních tenzometrů na litinovém brzdovém kotouči												

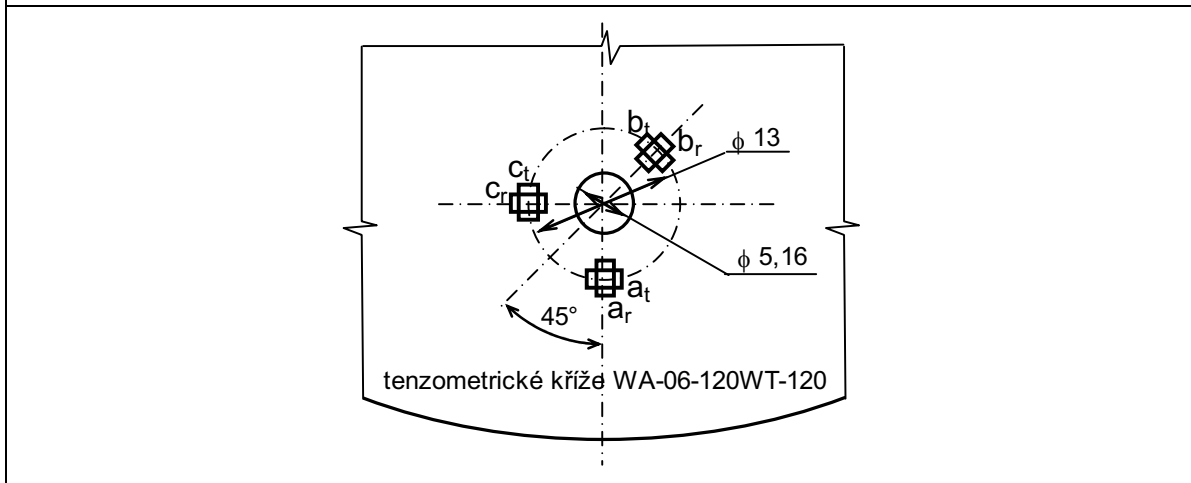
$\epsilon_{at} - \epsilon_{ar}$	$\epsilon_{bt} - \epsilon_{br}$	$\epsilon_{ct} - \epsilon_{cr}$	E	μ	\bar{r}	α	σ_1	σ_2	σ_{red}
μS	μS	μS	MPa	-	-	°	MPa	MPa	MPa
310	539	762	$1,52 \cdot 10^5$	0,28	2,5	2	205	131	180
Tab. 5 : Vyhodnocení šestiprvkové růžice na litinovém brzdovém kotouči									



Obr. 1 : Šestiprvková růžice pouze z radiálních tenzometrů



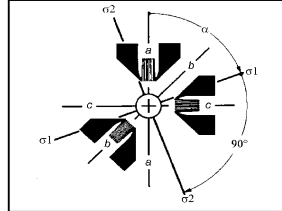
Obr. 2 : Šestiprvková růžice z tenzometrických křížů na válcovaném pásu



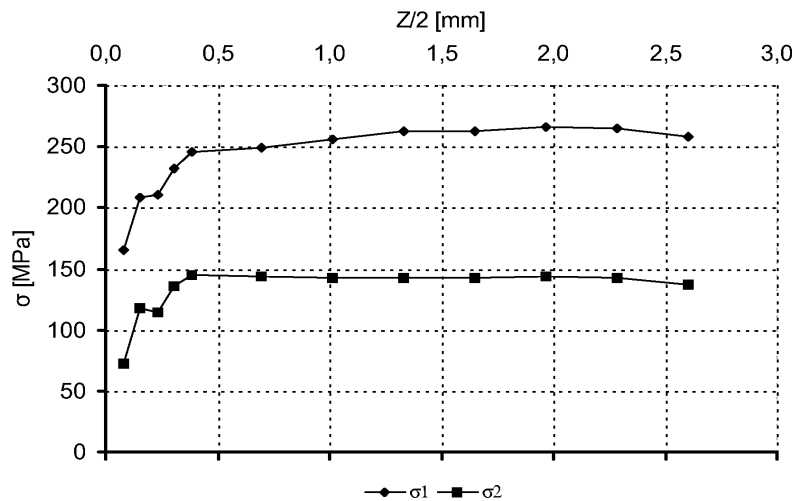
Obr. 3 : Šestiprvková růžice z tenzometrických křížů na brzdovém kotouči

Vyhodnocení měření zbytkových napětí

Měřicí místo : 4 - šestiprvkové růžice z křížů
 Průměr otvoru : 5,1 mm
 Typ růžice : RY21-3/120
 Materiál : GGG40
 E : 1,52E+05
 μ : 0,26



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
0,152	0,012	-3	-6	-12	165,8	73,0	99,2	75,4	163,4	143,9
0,305	0,023	-15	-25	-35	207,9	117,5	90,0	117,5	207,9	180,6
0,457	0,035	-24	-43	-58	210,3	114,5	86,6	114,9	210,0	182,4
0,61	0,047	-41	-67	-90	232,5	135,4	88,2	135,5	232,4	202,2
0,762	0,059	-57	-95	-123	245,2	144,4	85,7	145,0	244,6	213,5
1,397	0,107	-104	-185	-243	249,4	143,7	85,3	144,4	248,7	216,9
2,032	0,156	-133	-259	-347	255,8	142,4	85,0	143,3	255,0	222,0
2,667	0,205	-145	-302	-424	262,5	142,9	86,4	143,3	262,1	227,7
3,302	0,254	-146	-319	-463	262,9	142,4	87,4	142,6	262,6	227,9
3,937	0,303	-145	-333	-492	266,5	144,0	87,6	144,2	266,3	231,0
4,572	0,352	-141	-340	-509	265,3	142,4	87,7	142,6	265,1	229,9
5,207	0,401	-135	-338	-514	257,9	137,3	88,0	137,5	257,7	223,5

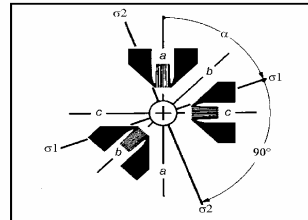


VŠB - TU OSTRAVA - FAKULTA STROJNÍ - katedra pružnosti a pevnosti

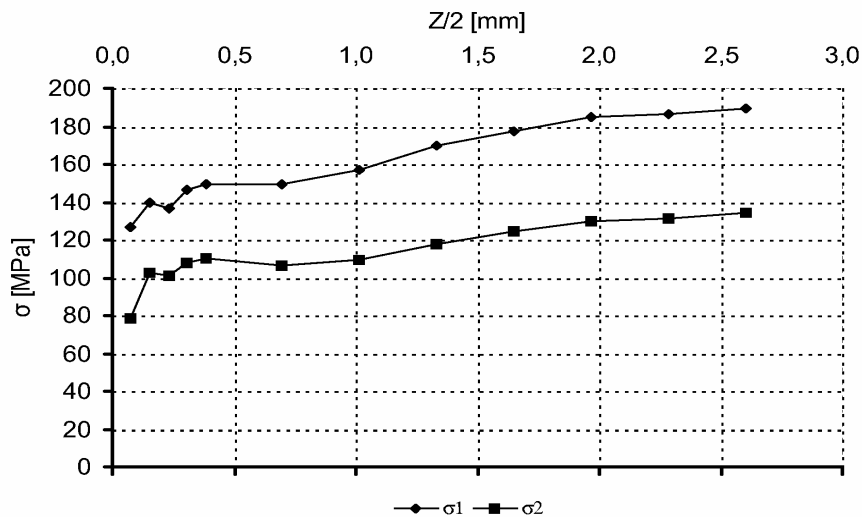
Obr. 4 : Vyhodnocení pouze z radiálních tenzometrů křížů šestiprvkové růžice

Vyhodnocení měření zbytkových napětí

Měřicí místo : R2 - zaváděcí výpočet
 Průměr otvoru : 5,2 mm
 Typ růžice : skládaná z křížů
 Materiál : GGG40
 $E : 1,52E+05$
 $\mu : 0,26$

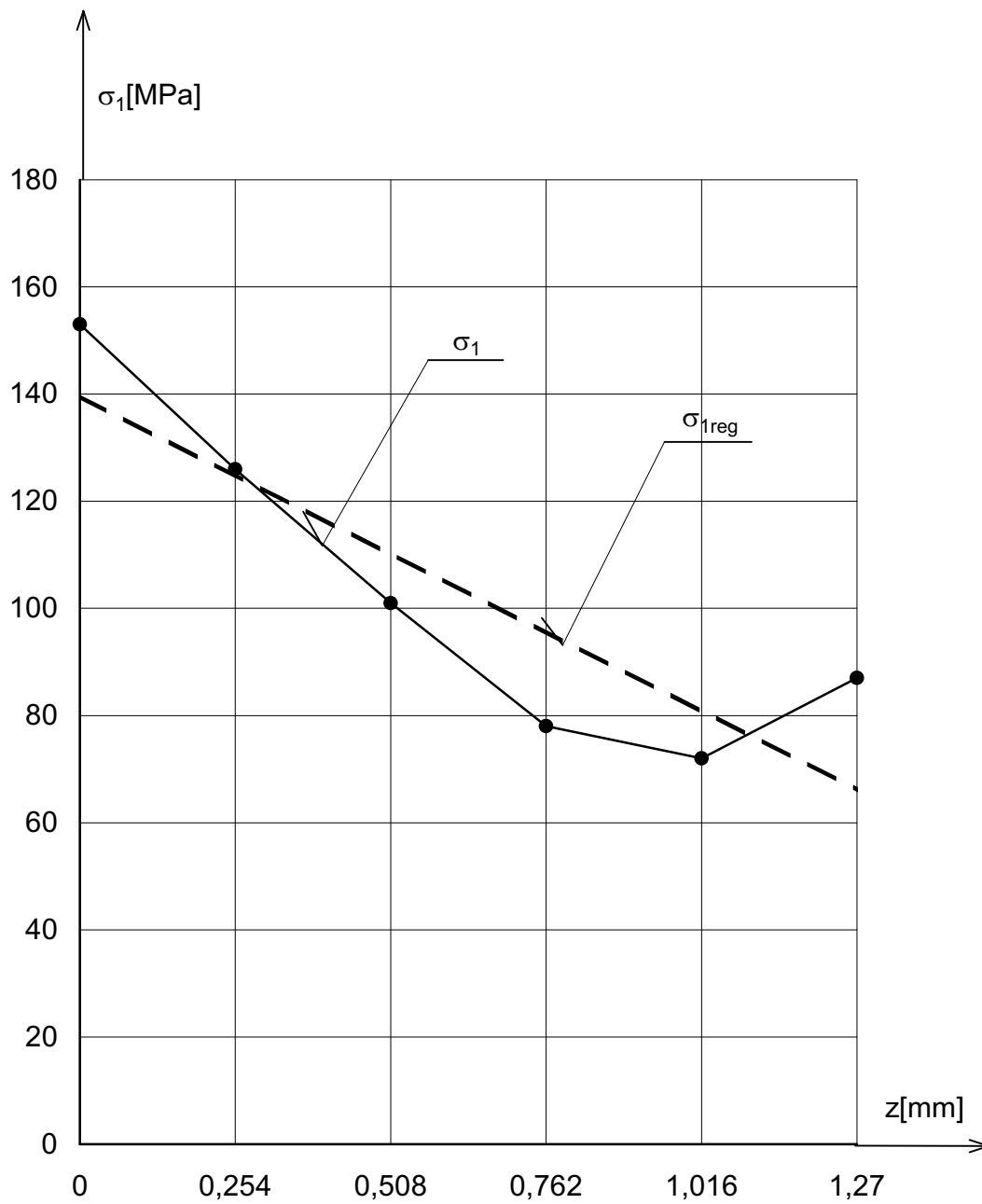


Z	Z/D	ϵ_a	ϵ_b	ϵ_c	σ_1	σ_2	α	σ_r	σ_t	σ_{red}
mm		μS	μS	μS	MPa	MPa	$^\circ$	MPa	MPa	MPa
0,152	0,012	7	10	18	126,6	78,8	12,2	81,0	124,4	110,7
0,305	0,023	26	37	48	139,9	102,8	0,0	102,8	139,9	125,5
0,457	0,035	44	62	79	136,9	100,8	-0,8	100,8	136,9	122,9
0,61	0,047	69	95	122	146,4	107,9	0,5	107,9	146,4	131,4
0,762	0,059	94	133	164	149,5	110,3	-3,3	110,4	149,3	134,2
1,397	0,107	174	261	327	149,6	106,3	-3,9	106,5	149,4	133,4
2,032	0,156	231	370	472	157,3	109,1	-4,4	109,4	157,0	139,6
2,667	0,205	269	444	589	169,7	117,6	-2,7	117,7	169,5	150,5
3,302	0,254	287	481	655	177,5	124,3	-1,6	124,3	177,4	157,7
3,937	0,303	301	512	708	184,7	130,2	-1,1	130,2	184,7	164,3
4,572	0,352	308	532	744	186,4	131,2	-0,8	131,2	186,4	165,8
5,207	0,401	310	539	762	189,6	134,5	-0,4	134,5	189,6	168,9

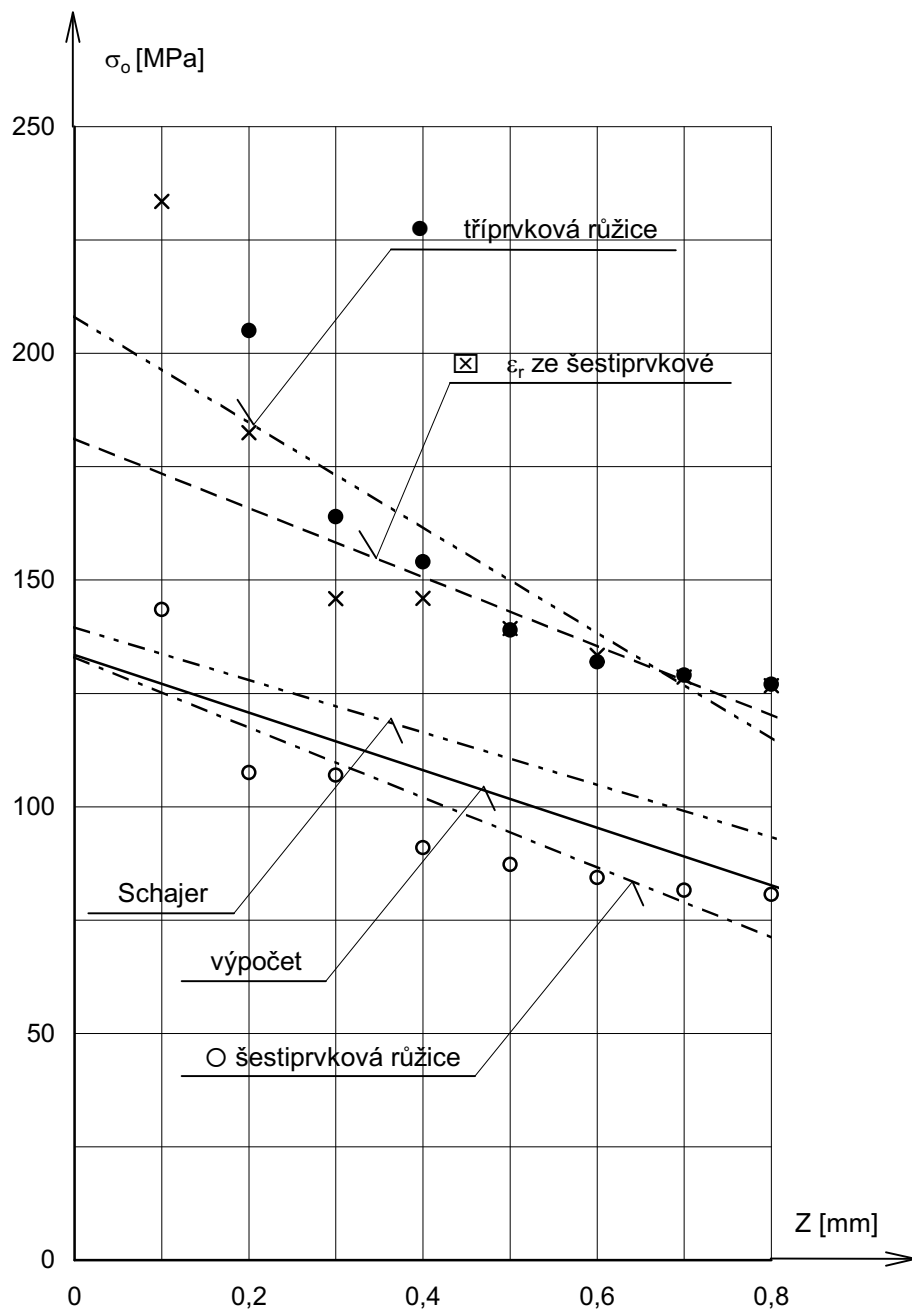


VŠB - TU OSTRAVA - FAKULTA STROJNÍ - katedra pružnosti a pevnosti

Obr. 5 : Vyhodnocení jako šestiprvková růžice z tenzometrických křížů



Obr. 6 : Průběhy hlavních změřených napětí σ_1 a proložená regresní přímka σ_{1reg}



Obr. 7 : Průběhy vypočtených a změřených ohybových napětí

