

## ANALÝZA TUHOSTI LOŽE HORIZONTKY W 160

Ing. Josef Šíma, CSc., Ing. Jaroslav Václavík, ŠKODA, k.p. Plzeň

Obsahem referátu je měření a výpočet modelu lože horizontky W 160 včetně jeho pružného uložení na základových šroubech. Měření bylo provedeno holografickou interferometrií a výpočet metodou konečného prvku. V závěru referátu je uvedeno porovnání naměřených a vypočtených hodnot.

## 1. Úvod

Měření a výpočet lože horizontky W160 byly dělány za účelem ověření celkové tuhosti lože a získání podkladů pro stanovení vhodných okrajových podmínek pro pružné uložení lože na základových šroubech.

Model lože (obr. 1) byl vyroben z organického skla, měřítko délek  $\mathcal{J} = 0,1$ ; měřítko modulů pružnosti  $\mathcal{E} = 0,023$ , měřítko zatížení  $\mathcal{K} = 2,3 \cdot 10^{-4}$ . Deformace byly měřeny a počítány

- a) při pružném uložení na základových šroubech podélně ve dvou a ve čtyřech řadách
- b) při tuhém uložení modelu lože na jeho koncích.

Základové šrouby byly modelovány upnutím modelu na pružné ocelové nosníky, na obou koncích vetknuté (obr. 1.).

## 2. Experimentální určování deformací

Měření bylo prováděno na holografické kameře HIK 1000 fy. Rottenkolber, osazené Argonovým laserem 165/265 fy. Spectra Physics při  $\lambda = 514,5$  mm a  $P = 0,3$  W.

Lože bylo zatěžováno základním zatížením 50 N hranolem, modelujícím suport v pěti polohách lože a přídatným zatížením ad a) 45,35 N, ad b) 2-10 N pomocí závaží.

K vyhodnocení holografických interferogramů (viz obr. 2) byla použita metoda nultého řádu /1/, vedoucí při vhodné zvoleném uspořádání k jednoduchému vztahu mezi normálnou složkou deformace  $\Delta \frac{1}{2}$  vodící plochy lože a řádem proužku  $N$

$$\Delta r_z = N \frac{\lambda}{2} \quad (1)$$

Poloha proužku nultého řádu byla určena dvěma způsoby

- a) pomocnými pružnými pásky, vetknutými do pevného základu [2]
- b) expozicí hologramu během spojitě změny zátěže [3], toho bylo dosaženo vytékáním kapaliny ze zatěžovací nádoby.

Dosahovaná přesnost měření byla řádově v desetinách  $\lambda$ .

Pro kontrolu bylo provedeno měření obecného vektoru deformace boční stěny lože metodou nultého řádu dle [4] z jednoho hologramu pozorováním přímo a přes vodorovně umístěné zrcadlo. Vyhodnocení těchto interferogramů bylo provedeno z reálného obrazu, rekonstruovaného pro zvýšení přesnosti z  $m$  bodů hologramu ( $m > 3$ ). Tím získáme soustavu  $m$  rovnic

$$\vec{K}_i \cdot \Delta \vec{r} = N_i \lambda + \epsilon_i \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

kde  $\vec{K}_i = \vec{K}_0 - \vec{K}_{pi}$  (3)

$\vec{K}_0 \dots$  jednotkový vektor vedený z bodu osvětlení do měřeného bodu na předmětu

$\vec{K}_{pi} \dots$  jednotkový vektor vedený z bodu měření do bodu pozorování

$\epsilon_i \dots$  chyba měření

Nejpravděpodobnější odhad  $\Delta \vec{r}$  pak získáme metodou nejmenších čtverců, obdržíme tak soustavu normálních rovnic, kterou řešíme:

$$\begin{bmatrix} \sum_1^m K_{x,i}^2 & \sum_1^m K_{x,i} K_{y,i} & \sum_1^m K_{x,i} K_{z,i} \\ \sum_1^m K_{x,i} K_{y,i} & \sum_1^m K_{y,i}^2 & \sum_1^m K_{y,i} K_{z,i} \\ \sum_1^m K_{x,i} K_{z,i} & \sum_1^m K_{y,i} K_{z,i} & \sum_1^m K_{z,i}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta r_x \\ \Delta r_y \\ \Delta r_z \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} \sum_1^m N_i K_{x,i} \\ \sum_1^m N_i K_{y,i} \\ \sum_1^m N_i K_{z,i} \end{bmatrix}$$

Vlastní výpočet složek vektoru posunutí byl proveden na počítači SHARP-PC-1211. Dosahovaná chyba měření byla řádově v  $\lambda$ . Výsledky měření pro lože pružně uložené jsou uvedeny na obr. 2.

### 3. Výpočet deformací lože W160 metodou konečného prvku

#### 3.1 Podstata metody

Metoda konečného prvku (MKP) je vysoce efektivní numerickou metodou řešení fyzikálních problémů. Základní myšlenka metody tkví v nahrazení kontinua souborem geometricky jednoduchých podoblastí (konečných prvků), poskytujících dostatečně přesnou fyzikální aproximaci řešeného tělesa.

Nejužívanější variantou MKP je deformační varianta. Vychází z Lagrangeova variačního principu minimacelkové potenciální energie. Vektor posunutí u aproximujeme po prvních polynomy jistých stupňů, primárními neznámými jsou zobecněné uzlové posuvy  $\Delta$ .

Celková potenciální energie tělesa  $\Omega$  je

$$\pi_s = \frac{1}{2} \vec{\Delta}^T [K] \vec{\Delta} - \vec{\Delta}^T \vec{F} \quad (5)$$

kde  $[K]$  ... celková matice tuhosti tělesa

$\vec{\Delta}$  ... výsledný vektor parametrů určujících pole posunutí

$\vec{F}$  ... výsledný vektor transformovaného vnějšího zatížení

Stacionární princip vyžaduje, aby

$$\delta \pi = \frac{\partial \pi}{\partial \vec{\Delta}} = 0 \quad (6)$$

Vzhledem k (5) je

$$\frac{\partial \pi}{\partial \vec{\Delta}} = [K] \vec{\Delta} - \vec{F} = 0 \quad (7)$$

a daný problém vede na řešení soustavy lineárních algebraických rovnic

$$[K] \vec{\Delta} = \vec{F} \quad (8)$$

Matice tuhosti  $[K]$  je pozitivně definitivní symetrická pásová matice. Soustava má pouze jedno řešení, které minimalizuje funkci (5). Rovnice soustavy (8) jsou v principu minima potenciální energie rovnicemi rovnováhy. Po vyřešení vektoru  $\vec{\Delta}$  ze soustavy

(8) je možné pro každý uzel prvku stanovit deformace nebo napětí. Podrobnější popis MKP s konkrétními aplikacemi je uveden v [5] a [6].

### 3.2 Výpočtový model a vlastní řešení lože W160

K výpočtu deformací lože W160 byl použit obecný čtyřúhelníkový stěnodeskový prvek s 24 stupni volnosti. Matice tuhosti tohoto prvku byla sestavena superposicí z rovinného prvku vystihujícího membránové chování a deskového prvku respektujícího chyb.

S ohledem na požadované cíle výpočtu byl sestaven výpočtový model pouze pro čtvrtinu lože. Obsahuje 295 uzlů a 329 čtyřúhelníkových a trojúhelníkových konečných prvků. Výpočtový model včetně očíslovaných uzlů je uveden na obr. 5. Byl nakreslen na souřadnicovém zapisovači. Vyhovuje možnostem podepření ři vetknutí v libovolném místě a různým způsobům pružného uložení. Model může být zatížen buď osamělou silou, spojitým břemenem nebo momentem. Zatížení může působit v libovolném uzlu nebo na povrchu libovolného prvku. V souladu s měřením byl výpočtový model lože zatížen ve střední části vodicích ploch silou  $F_1 = 10 \text{ N}$  pro lože na okrajích podepřené a vetknuté a silou  $F_2 = 45,35 \text{ N}$  pro lože pružně uložené. Základní šrouby byly ve výpočtovém modelu nahrazeny pružinami o tuhosti  $k_m = 2500 \text{ Nmm}^{-1}$ . Pro tyto pružiny byly pro různé alternativy výpočtu zajištěny následující okrajové podmínky

- a) volné posuvy a rotace ve všech směrech
- b) fixace posuvů ve směrech os  $x$ ,  $y$  a fixace rotace kolem osy  $z$
- c) volný posuv pouze ve směru osy  $z$ .

Alternativa ad c) nejlépe vyhovovala realizovaným podmínkám měření. Výsledky výpočtu pro lože pružně uložené jsou uvedeny na obr. 2. Výpočty byly provedeny na počítači M4030.

### 4. Závěr

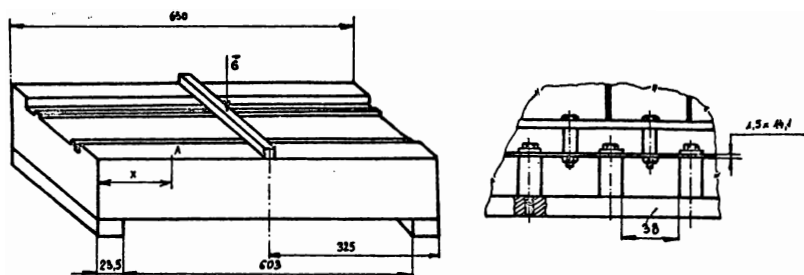
Hodnoty deformací naměřené holografickou interferometrií a vypočtené vykazují velmi dobrou shodu. Maximální odchylka je 10 %. Na obr. 2. jsou uvedeny hodnoty deformací pro lože pružně uložené ve dvou a čtyřech řadách šroubů. Z obr. je rovněž vidět, že pro dané zatížení je výhodnější alternativa se čtyřmi řadami šroubů, kdy jsou deformace na vnitřní i vnější hraně vedení téměř shodné.

Alternativa se dvěma řadami šroubů vykazuje deformace v příčném směru na vnější a vnitřní hraně vedení značně rozdílné (až 50 %) a dvojnásobné oproti předchozí variantě.

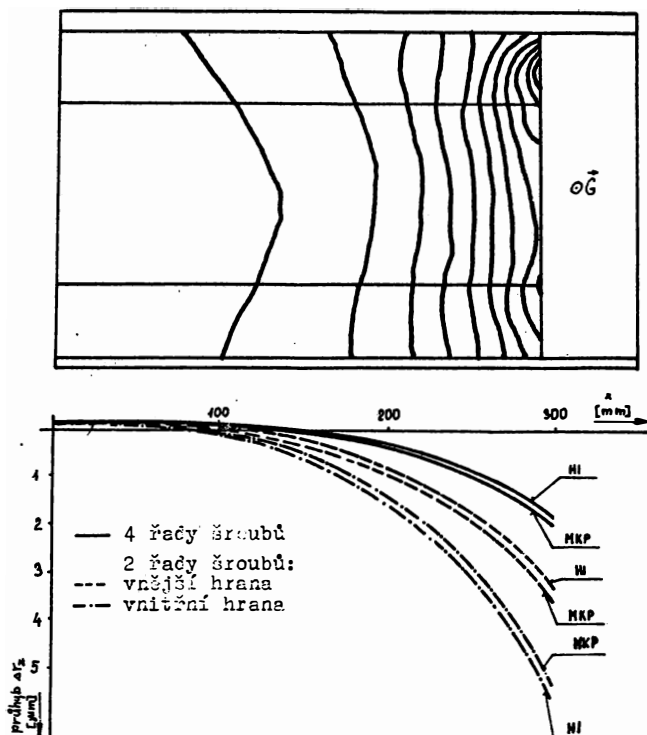
Pro upřesnění okrajových podmínek pro pružné uložení bude třeba provést serii dalších výpočtů a měření nových typů loží jak na modelech, tak na díle.

## 5. Literatura

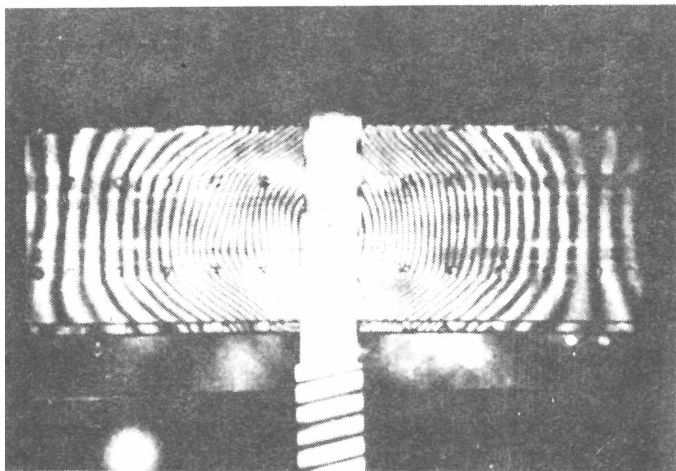
- /1/ Ennos, A.E.: J. Phys.E (J. Sci Instrum.) 1 (1968) 731-4
- /2/ Steinbichler, H.: Beitrag zur quantitativen Auswertung von holographischen Interferogrammen, disertační práce, Mnichov 1973
- /3/ Miler, M.: Stroboskopická holografie; výzkumná zpráva Z-769/A, ČSAV-ÚŘE Praha 1976
- /4/ Dhir, S.K., Sikora J.P.: An Improved Method for Obtaining the General - displacement Field from a Holographic Interferogram, Experimental Mechanics, 1972, No 7, 323-327
- /5/ Zienkiewicz, O.C.: The Finite Element Method, New-York-London, Mc. Graw-Hill, 1977
- /6/ Bakule, B., Čadek, V., Šíma, J.: Of Large Machine Tools, ŠKODA REVUE, No 3, 1983



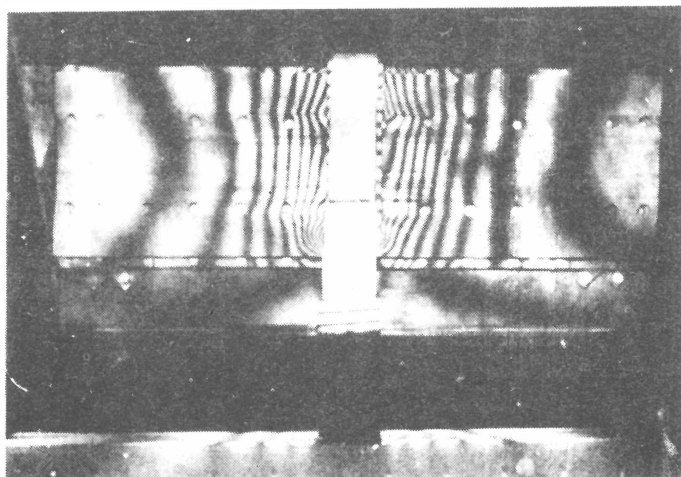
Obr.1 Náčrt měřeného lože a detail pružného uložení



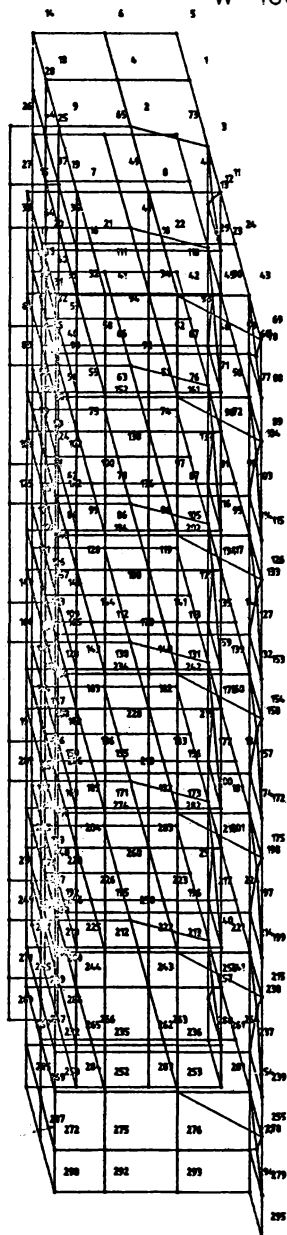
Obr.2 Příklad interferogramu vodících ploch lože při uložení na 4 řadách upínacích šroubů a vyhodnocení průhybu hran pro obě varianty uložení



Obr.3 Interferogram lože uloženého na 2 řadách  
upínacích šroubů



Obr.4 Interferogram lože uloženého na 4 řadách  
upínacích šroubů



0 br. 5