

MĚŘENÍ DEFORMACÍ A NAPĚTÍ V ZEMINÁCH

Ing. Jiří Sykora, CSc

**Fakulta stavební ČVUT, katedra stavební mechaniky
Praha**

Resumé.

Na katedře stavební mechaniky jsou řadu let vyvíjeny jedonosé tlakové krabice k měření napětí resp. poměrných deformací v konstrukčních vrstvách silničních a letištních vozovek a v podloží. Cílem je získat takové výsledky měření, které by bylo možno porovnávat s teoretickým výpočtem. V referátu jsou popsány jednotlivé typy snímačů, způsob jejich cejchování a použití. Výhodou posledního typu krabice je možnost změny tuhosti a tím případné přiblížení k modulu pružnosti měřeného prostředí.

Vysokou citlivost snímačů zaručují polovodičové tensometry, jejichž signál je úměrný napětí na povrchu krabice. Např. lze spolehlivě registrovat v podkladních vrstvách změnu zatížení betonové vozovky od 250 N.

Spolehlivost změřených hodnot závisí na poměru modulů pružnosti prostředí a krabice. Porovnáním výsledků získaných z jednoho místa dvěma snímači odlišné velikosti se ukázalo, že přepočít napětí dle dosud uváděných vzorců je nesprávný.

Měření je prováděno soupravou firmy Hottinger a vyhodnocováno na stolním kalkulátoru Hewlett Packard.

1. Úvod.

Na katedře stavební mechaniky Fakulty stavební ČVUT v Praze byly postupně vyvinuty a odzkoušeny měřicí tlakové krabice pro zjišťování napětí v konstrukci vozovky, v podloží a v zeminách. První typ krabice s pevnými okraji byl převzat z VÚD Praha. Krabice tohoto typu byly zabudovány do vozovky s živичným krytem na Leninově třídě v Praze 6, avšak při zatížení vozidlem T 111 nevykázaly žádné měřitelné hodnoty. Další typ krabice označený GS 1 byl již vyroben na katedře. GS 1 byla bez pevných okrajů a byl tak vyloučen klenbový účinek. Byla zkoušena pod betonovou vozovkou v ulici Pionýrů, ale ani zde nebyly vykázány hodnoty, které by bylo možno použít k vyhodnocení, i když výsledek vedl k dalšímu vývoji snímače.

Další krabice typu GS 2 byla vybavena polovodičovými tensometry a při měření na dálnici Praha - Mirošovice byly získány první zhodnotitelné výsledky.

Tlaková krabice GS 3 je prozatím posledním typem vývojové řady. Bylo uloženo celkem 10 těchto snímačů v pravé polovině dálniční vozovky Praha - Brno u Hvězdonic a 2 snímače na pokusném úseku letiště Praha Kbely. S těmito krabicemi jsou plánována další měření, aby byla prokázána jejich dlouhodobá životnost a spolehlivost.

2. Popis tlakových krabic a způsob cejchování.

2.1. Tlaková krabice GS 2.

Celkový pohled na tento snímač je na obr. 1. Aby byla zachována funkce měřicí tlakové krabice v měřeném prostředí (v soudržných a nesoudržných materiálech), chrání ji před vniknutím zrn do mezery mezi horní kruhovou deskou a membránou gumová objímka (na obr. 1 chybí). Tuhost krabice je závislá na tloušťce ocelové membrány (u vyrobených krabic byla 0,6 mm). Horní deska byla připevněna ke středu membrány nýtem, jehož hrot tlačí na ocelový předepnutý ocelový pásek umístěný pod membránou. Na tomto pásku byl nalepen jeden polovodičový tensometr vyrobený ve Výzkumném a zkušebním leteckém ústavu Praha, který byl spolu s kompenzačním tensometrem zapojen do polovičního mostu. Řez krabicí je na obr. 6.

2.2. Cejchování krabice GS 2.

Bylo prováděno v zatěžovacím rámu postupným přidáváním a odebíráním závaží. Byl sledován vztah mezi deformací krabice (měřená tisícinnými indikátorovými hodinkami) a signálem tensometru zesíleným zesilovačem KWS/6T - 5 Hottinger v $\mu\text{m}/\text{m}$. Zjištěné cejchovní křivky však nebyly lineární. Přibližně však bylo možno určit 2 až 3 rozsahy zatěžování, v nichž byly křivky nahrazeny přímkami. Závislost mezi deformací a signálem tensometru v lineární oblasti vyjadřuje konstanta krabice

$$K_{kr} = \frac{\Delta \varepsilon_{tn}}{\frac{\Delta z}{h_{kr}}} , \quad (1)$$

kde Δz je snížení horní desky krabice v μm

$\Delta \varepsilon_{tn}$ je odpovídající změna signálu tensometru v $\mu\text{m}/\text{m}$

h_{kr} je výška krabice před přitížením v m.

Modul pružnosti snímače je dán vztahem

$$E_{kr} = \frac{\Delta p \cdot K_{kr}}{\Delta \varepsilon_{tn}} \cdot 10^3 \quad [\text{MPa}] , \quad (2)$$

kde Δp je změna tlaku v kPa odpovídající změně $\Delta \varepsilon_{tn}$.

Výsledné napětí působící na krabici stanovíme ze vztahu

$$p = \frac{E_{kr} \cdot \varepsilon_{tn}}{K_{kr}} \cdot 10^{-3} = \alpha_{kr} \cdot \varepsilon_{tn} \quad [\text{kPa}] , \quad (3)$$

kde ε_{tn} je signál tensometru, když před zatěžováním byl most vyvážen

α_{kr} je citlivost krabice.

Citlivost GS 2 byla od $\alpha_{kr} = 7 \cdot 10^{-3}$ do $\alpha_{kr} = 13 \cdot 10^{-3}$, t.j. signál 1000 $\mu\text{m/m}$ odpovídal řádově napětí 10 kPa.

Moduly pružnosti byly poměrně nízké a pohybovaly se v rozmezí od 15 do 23 MPa. To a jistá nelinearita byly důvodem k provedení konstrukčních změn u dalšího typu.

2.3. Tlaková krabice GS 3.

Je to opět krabice bez pevných okrajů. Byly vyrobeny dva druhy, jeden o průměru $d_{kr} = 50$ mm a výšce $h_{kr} = 19$ mm, druhý $d_{kr} = 100$ mm a $h_{kr} = 28$ mm. Vlastní měřicí a současně spolu s membránou nosný element je ocelový nosníček uložený v prvním případě na tupo na okraj dna krabice a v druhém případě na válečcích o průměru 1 mm. Uprostřed nosníčku jsou nalepeny dvě polovodičové tensometry. Aktivní je umístěn v ose nosníčku, kompenzační kolmo k němu. Ke dnu krabice je element zachycen volně šroubky tak, aby nebyl ovlávněn tímto přichycením vlastní průhyb. Se shora je nosníček zakryt ocelovou membránou, která je vetknuta do kruhového věnce řadou šroubů. Uprostřed je k této membráně nýtem připevněna kruhová tuhá ocelová deska. V nýtu je vyvrtán závit pro stavěcí šroubek, který tlačí bodově na nosníček a umožňuje i regulaci předpětí nosníčku a membrány. Volná mezera mezi deskou a membránou je před uložením do měřeného prostředí utěsněna měkkou pryží.

Pohled na větší krabici je na obr. 2. Spodní část s osazeným nosníčkem je na obr. 3.

2.4. Cejchování krabice GS 3.

Před vlastním cejchováním byl každý snímač podroben jednodennímu cyklickému zatěžování. Pak byl vložen do zatěžovacího rámu (detail uložení je na obr. 4) tak, aby tlak na horní desku krabice byl rovnoměrný. Deformace krabice při zatěžování byla měřena dvěma snímači dráhy W 10 K Hottinger, přitěžování se provádělo zavěšováním závaží na páku. Snímače dráhy i polovodičové tensometry byly připojeny k zesilovači KWS/6E - 5 Hottinger. Výhodou tohoto zesilovače je možnost napájení tensometrů volitelným napětím 1V, 4V nebo 10V a přesné určení hodnoty paralelních odporů při vyvažování.

Počátek cejchování byl volen při určitém předtížení tak, aby odpovídal počátečnímu stavu v prostředí, do něhož budou krabice uloženy. Odečtené cejchovní údaje byly ukládány do paměti stolního kalkulátoru Hewlett-Packard 9820 A a jím dle programů dále zpracovány. Především užitím metody nejmenších čtverců byla provedena regresní analýsa a cejchovní křivka byla nahrazena přímkou, vyjadřující vztah mezi napětím nebo poměrnou deformací krabice a signálem tensometru. Variační koeficient chyby vzhledem k odečteným údajům nepřesáhl hodnotu 0,0276 u krabic průměru 100 mm a 0,045 u krabic průměru 50 mm.

Variační koeficient chyby je dán vztahem

$$V = \frac{s}{\bar{y}} \quad (4)$$

kde s je směrodatná chyba

$\bar{y}$ je aritmetický průměr ze všech odečtených hodnot poměrných deformací nebo napětí krabice.

Na XY zapisovači HP 9862 A byla zakreslena cejchovní křivka spolu s změřenými hodnotami, zapsána rovnice regresní přímky a statistické údaje. Při zatěžování se projevila hystereze mezi zatížením krabice a signálem tensometru, což je prozatím neodstranitelná vlastnost použitého materiálu pro měřicí element a membránu. Citlivosti u malých krabic byly okolo $\alpha_{kr} = 13 \cdot 10^{-3}$, u velkých $\alpha_{kr} = 50 \cdot 10^{-3}$ až $60 \cdot 10^{-3}$. Modul pružnosti u malých krabic je okolo $E = 160\,000$ kPa až $180\,000$ kPa, u velkých pouze $E = 40\,000$ kPa. Tyto hodnoty je však možno zvýšit výměnou nosníku s tensometry nebo zkrácením jeho rozpětí.

3. Uložení tlakových krabic do konstrukce vozovky.

Až dosud nebylo možno provádět měření na pokusných úsecích, které by mohly být budovány s ohledem na požadavky výzkumu a tedy s největší opatrností vzhledem k ukládaným snímačům. Bylo nutno se spokojit se zabudováním krabic na běžně prováděných stavbách. Uložení bylo proto možno provést až před zhotovením dostatečně únosné vrstvy, protože jinak by došlo k jejich poškození.

Zajistit v takovém případě neporušenost jednotlivých vrstev je nemožné. Krabice typu GS 2 a GS 3 byly uloženy do podkladních vrstev a do podloží během provádění první stabilizační vrstvy tak, že byla vykopána jáma a do jejího boku vyhloubeny otvory pro krabice (obr. 5). Při těsnění krabic v otvorech bylo sledováno předpětí na zesilovači. Pak byla jáma pečlivě zasypana a zhutněna v odpovídajících vrstvách. Vodiče od krabic byly vyvedeny v ocelové trubce na okraj vozovky a zde jejich konce izolovány a vloženy do kovového obalu. Po konečném uložení krabice do měřeného prostředí a také před každým měřením byl počáteční stav předtížení určen dle vyvážení polovičního Wheatsonova mostu. Poloha uložených krabic v km 28,9 dálnice Praha - Brno je zřejmá z obr. 7 a 8.

4. Měření a jeho vyhodnocování.

4.1. Postup zatěžování.

U dosavadních měřených konstrukcí dálnice byl sledován vliv cementobetonového krytu na únosnost vozovky. Proto první měření bylo vždy provedeno po dokončení a dostatečném vyztužení cementové stabilizační vrstvy, další pak po dokončení cementobetonové desky v různých ročních obdobích.

V km 12,4 bylo zatěžováno plně naloženým nákladním vozem T 138, betonová vozovka po uvedení dálnice Praha - Mirošovice do provozu byla také zatěžována cisternovým vozem Škoda 706. Toto dvounápravové vozidlo bylo užito i při dalších měřeních v km 28,9.

Zatěžování bylo vždy prováděno podle následujícího rozpisu :

- a) Statické zatížení s pomalým najetím vozidla předním kolem nad osu krabic, po ustálení signálu byl pak sledován vliv zadních zdvojených kol.
- b) Zatížení projíždějícím vozidlem konstantní rychlostí. Rychlost byla zvyšována po 10 km/h až do maximální možné rychlosti naloženého vozidla (asi 70 km/h). Každá jízda byla 4x zopakována.
- c) Zatížení projíždějícím vozidlem přes normovou mostní překážku.

Aby byla dodržena jízdní stopa vozidel, bylo na vozovce provedeno vodorovné značení v zorném poli řidiče tak, aby pravá kola projížděla nad zabudovanými krabicemi.

4.2. Měřicí linka.

Signál tensometru byl přiveden k 6ti kanálovému zesilovači KWS/6E-5 (příp. KWS/6T-5) a dále registrován měřicím magnetofonem MBS 5 Hottinger. Nahraný záznam byl ihned kontrolován dle potřeby 8mi kanálovým přímopíšicím oscilografem UV AF-8-G Fischer. Skutečnou rychlost vozidel lze zjistit z časového odstupu vlivu přední a zadní nápravy na signál tlakových krabic. Vzhledem k malému rozvoru vozidla však bylo vždy použito dvou kolmo k ose vozovky v určité vzdálenosti položených vzduchových hadic, které při přejetí kolem sepnuly pneuspínač. Ten uzavíral proudový okruh připojený k jednomu z kanálů magnetofonu. Na obr. 9 je příklad průběhu napětí zjištěný tlakovými krabicemi při měření vlivu průjezdu zatěžovacího vozidla po betonové vozovce.

4.3. Vyhodnocovací linka.

K vyhodnocování změřených hodnot je využíván kalkulátor HP 9820 A. K tomu, aby záznam bylo možno zpracovat, je nutno ho nejdříve digitalisovat. Prozatím je signál každého snímače zpracováván samostatně. Signál při přehrávání je z magnetofonu nejprve přiveden k pásmovému filtru a pak k Interface boxu M 17, který byl vyvinut a je vyráběn ve Vývojových dílnách ČSAV (konstruktér Ing. K. Vrána). Ten byl pro naše účely doplněn speciální deskou a převodníkem Výzkumného ústavu matematických strojů (Ing. Kudrnovský). Speciální deska analogový signál nejprve zesílí tak, aby byl využit plně rozsah převodníku. Převodník provede digitalisaci signálu v rozsahu $\pm 5V$ na 256 úrovní. Speciální deska umožní volit počet vzorků za vteřinu, které budou uloženy do paměti kalkulátoru. V případě rozšířené paměti na 1453 registrů lze uložit s použitím speciálního firemního programu nejvýše 10 000 vzorků, t.j. při rychlosti ukládání 1 000 vzorků za vteřinu lze zpracovat záznam trvající nejvýše 10 s. Další zpracovávání takto uloženého záznamu závisí na volbě vhodné sestaveného programu.

4.4. Vyhodnocení změřených hodnot.

V km 28,9 dálnice byly do podkladních vrstev uloženy do každé úrovně vždy dva snímače GS 3 různé velikosti. Dle předpokladu měla tak být umožněna vzájemná kontrola výsledků a upřesnění modul pružnosti prostředí. Ten se dosud zjišťuje metodami, které nezaručují jeho správné určení. Kromě toho se mění během stavby dalších vrstev a s vlhkostí. Skutečný modul pružnosti by bylo možno vypočítat ze vztahu

$$E_0 = \frac{E_{s1} \cdot E_{s2} \left[\frac{a_1}{h_1} K \cdot A_2 \cdot p_1 - \frac{a_2}{h_2} K \cdot A_1 \cdot p_2 \right]}{E_{s2} \cdot A_2 \cdot p - E_{s1} \cdot A \cdot p_2}, \quad (5)$$

kde

$$A_1 = \frac{a_1}{h_1} K - 1 \quad A_2 = \frac{a_2}{h_2} K - 1$$

$$K = \frac{\pi}{2} (\mu^2 - 1),$$

E_{s1} je modul pružnosti krabic,

a_1 je poloměr krabic,

h_1 je výška krabic před zatížením,

p_1 je tlak určený z rov. (3).

Rovnice (5) předpokládá platnost vztahu pro výpočet skutečného napětí v prostředí :

$$\sigma_z = \frac{\frac{E_s \cdot \pi \cdot a}{2 E_0 \cdot h} (\mu^2 - 1) - 1}{\frac{E_s}{E_0} \left[\frac{\pi a}{2h} (\mu^2 - 1) \right]} p, \quad (6)$$

který byl odvozen z rovnice pro deformaci v pružném poloprostoru. Při předběžném vyhodnocení 2 zatím provedených měření se u-

kázalo, že pravděpodobně rovnice (5) a (6) neplatí, pokud předpokládáme, že většina krabic byla správně uložena a nachází se v homogenním prostředí. Výpočet dle (5) totiž vede nejen k velkému rozptylu hodnot E_0 , ale i k zcela nesmyslným výsledkům.

5. Závěr.

Lze konstatovat, že citlivost zejména krabic typu GS 3 je více než dostatečná a že je s nimi možno měřit bezpečně relativní vztahy mezi jednotlivými vozidly nebo porovnávat vliv jednotlivých náprav. Lze porovnávat vliv zdvojených kol, vliv nerovností (při měření byla užita překážka vysoká 6 cm), klesající účinek zatížení se vzdáleností od měřeného místa a pod.

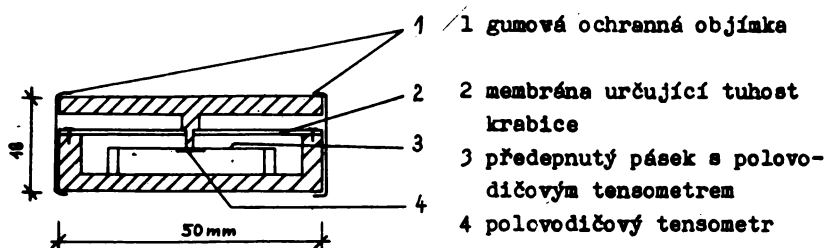
Avšak vyčíslení absolutní hodnoty napětí nebo poměrné deformace zatím není možno provést, protože buď neplatí rovnice (6), nebo chování krabic se od stavu při cejchování podstatně změnilo. Dle dosavadních výsledků však je pravděpodobné, že bude možné vyřešit jiný správnější vzorec. K tomu je nutno provést další skupinu měření a osadit nové tlakové krabice nejlépe v laboratorních podmínkách. Pak bude provedeno konečné zhodnocení popsanych tlakových krabic a použité metody měření.

6. Seznam obrázků a fotografií.

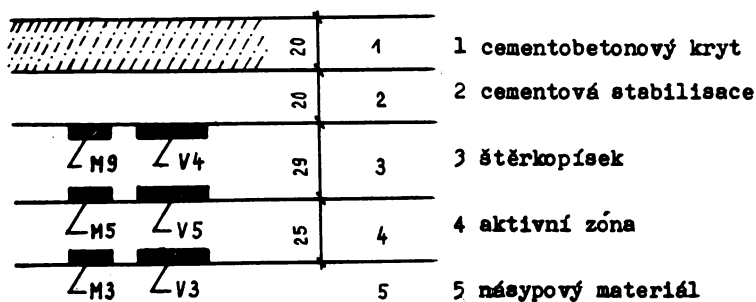
1. Pohled na tlakovou krabici GS 2 bez ochranné gumové objímky.
2. Pohled na tlakovou krabici GS 3 ($d=100$ mm).
3. Dno tlakové krabice GS 3 ($d=100$ mm) s osazeným nosníčkem.
4. Tlaková krabice GS 3 (50 mm) v zatěžovacím rámu.
5. Osazená tlaková krabice v podkladní vrstvě (pohled na
jámu).
6. Řez tlakovou krabicí GS 2.
7. Schema uložení GS 3 v dálniční vozovce u Hvězdonic (km 28).
8. Situace uložení GS 3.
9. Záznam vlivu jízdy cisternového vozu Škoda.

7. Literatura.

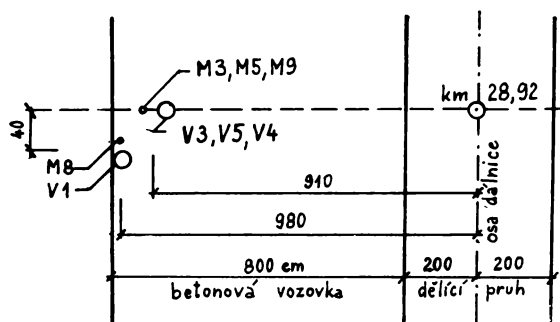
- 1 Fischer K. : Beispiele zur Bodenmechanik. Verlag Von Wilhelm Ernst u. Sohn, Berlin - München 1965.
- 2 Prange B. : Ein Beitrag zum Problem der Spannungsmessung im Halbraum. (Doktorská disertace).
- 3 Sýkora J. : Výzkum napětí v konstrukčních vrstvách silničních vozovek a podloží. Fakultní výzkumný úkol 105 F 71 - 73. FS ČVUT Praha 1973.
- 4 Sýkora J. : Vývoj tlakových krabic. Fakultní výzkumný úkol 162 F 74 -75. FS ČVUT Praha 1975.



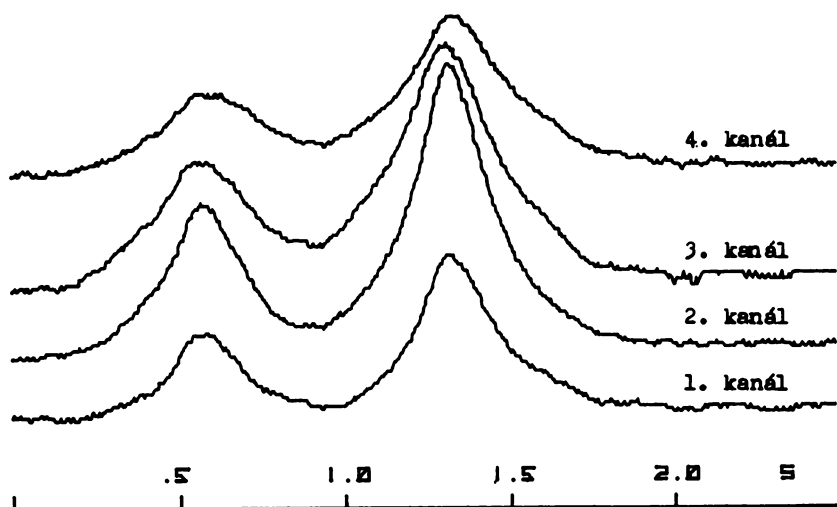
Obr. 6 Řez tlakovou krabicí GS 2.



Obr. 7. Řez dálniční vozovkou s tlakovými krabicemi.



Obr. 8. Situace rozmístění tlakových krabic GS 3.



Signál tlakových krabic GS 3 při přejezdu cisternového vozu Škoda po betonové vozovce v km 28,9 dálnice Praha - Brno. Rychlost jízdy 20 km/h.

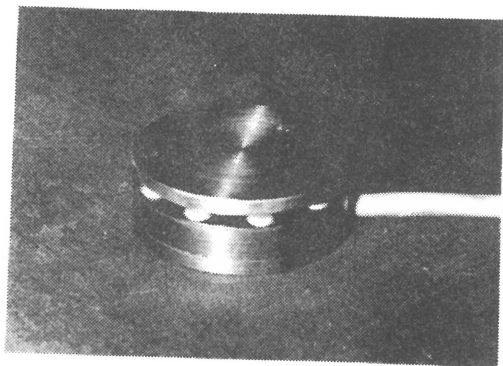
1. kanál :	tl. krabice M9,	přední kolo $p = 5,43 \text{ kPa}$,	zadní kolo $p = 10,22$.
2. kanál :	V4	$p = 4,43 \text{ kPa}$	$p = 8,55 \text{ kPa}$
3. kanál :	M5	$p = 3,65 \text{ kPa}$	$p = 6,61 \text{ kPa}$
4. kanál :	V5	$p = 1,42 \text{ kPa}$	$p = 2,80 \text{ kPa}$

M je malá tlaková krabice GS 3 ($d = 50 \text{ mm}$)

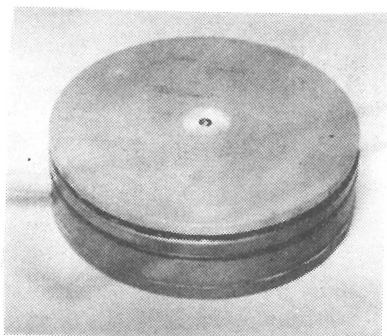
V je velká tl. krabice GS 3 ($d = 100 \text{ mm}$).

Obr. 9.

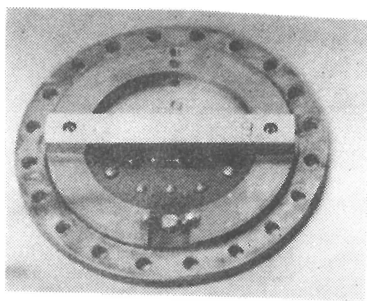
1



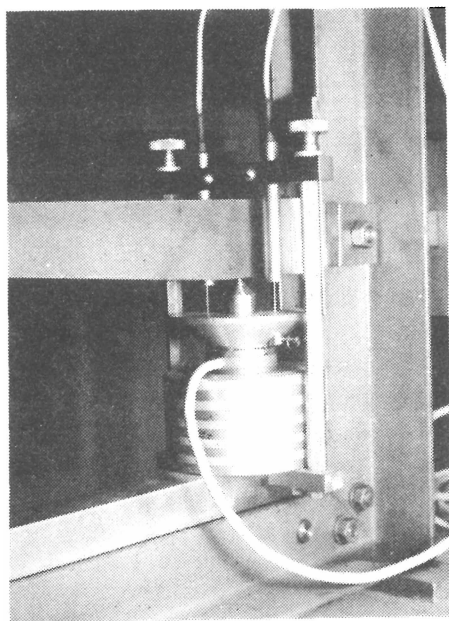
Obr. 2



Obr. 3-



Obr. 4.



Obr. 5

