

**EXPERIMENTÁLNÍ VYŠETŘOVÁNÍ PŘETVOŘENÍ A NAPJATOSTI
V RADIALNÍCH OBĚŽNÝCH KOLECH**

Přemysl JANÍČEK

**Strojní fakulta VUT Brno, katedra technické mechaniky,
pružnosti a pevnosti**

V článku se autor zabývá aplikacemi experimentálních metod na vyšetřování přetvoření a napjatosti v radiálních oběžných kolech. Jsou uvedeny výsledky použití metody křehkých látek při zatížení oběžného kola axiálními silami pracovní látky, při nasazení kola na hřídel s přesahem a při vyšetřování směrů hlavních napětí na povrchu lopatky při jejich různých tvarech kmitů. V článku jsou popsány výsledky získané na zkušebním zařízení pro statická tenzometrická měření za rotace. Byly zjišťovány teplotní charakteristiky teplotně přizpůsobených tenzometrů Hottinger Baldwin a ověřovány přechodové odpory snímací hlavičky Hottinger. Při testování přesnosti měřených poměrných deformací na rotujícím tělese se využilo metody konečných prvků. V závěru jsou uvedeny rozborů možností použití reflexní fotoelasticimetrie na zjišťování napjatosti u radiálních oběžných kol.

ÚVOD.

Oběžná kola radiálních turbin a kompresorů patří obvykle k jejich pevnostně nejexponovanějším částem. Pro tato kola je charakteristická složitost a různorodost provozních podmínek, systémů zatěžujících účinků, konstrukčních provedení a mezních stavů. I když úroveň matematického přístupu k řešení problematiky přetvoření a napjatosti v oběžných kolech se zásluhou metody konečných prvků zvýšila, jsme vždy nuceni v důsledku složitosti uvedených charakteristik a s ohledem na dostupnou výpočetní techniku pracovat s více či méně dokonalými výpočtovými modely. Experimentální přístup tak zůstává i nadále neoddelitelnou složkou pevnostních výpočtů, jímž se ověřují, upřesňují a doplňují řešení získaná matematickým modelem. V mnoha případech je použití experimentálního přístupu časově i finančně výhodnější, někdy je též jediným možným způsobem řešení. Závažným úkolem při řešení konkrétního problému, např. radiálního oběžného kola, je volba vhodné experimentální metody. Je totiž velmi obtížné najít univerzální metodu, která by splňovala všechny požadavky kladené na experiment, např. při různých zatěžujících účincích.

Na katedře technické mechaniky, pružnosti a pevnosti strojní fakulty v Brně bylo při řešení přetvoření a napjatosti jednostranných radiálních oběžných kol použito metody křehkých laků, odporové tenzometrie a reflexní fotoelastimetrie.

METODA KŘEHKÝCH LAKŮ.

U rotačně symetrických těles jsou hlavními směry radiální, obvodový a osový směr. Tyto směry zůstávají hlavními i u oběžných kol s radiálními lopatkami, na osy symetrie mezi dvěma přílehlými lopatkami. V místech poblíž styku lopatek s kotoučem se dá očekávat odklon směrů hlavních napětí od uvedených směrů. Získat přehled o napjatosti v těchto místech je možné např. tenzometrickými růžicemi. Ovšem vzhledem ke konečným délkám vinutí tenzometrů dostaneme pouze určité střední hodnoty směrů hlavních

napětí, a to jen v omezeném počtu míst. Byly proto učiněny pokusy získat celkový přehled o napjatosti pomocí křehkých laků, a to při zatížení axiálními účinky pracovní látky, účinky nasazení kola na hřídel s přesahem, účinky rotace a od dynamic-
kých účinků při různých tvarech kmitu lopatky. Byly použity Brafa laky, jejichž vlastnosti a technologie nanášení jsou uvedeny v literatuře [1] .

Axiální síly pracovní látky, které vznikají v důsledku nestejných tlakových gradientů v radiálním směru na přední a zadní straně kola, lze při použití ucpávkového systému umístěného na válcové části náboje kola vyjádřit přetlakem působícím na zadní stranu kol. Tento přetlak byl při experimentech realizovaných na lisu nahrazen dvěma modely, a to spojitým zatížením a liniovou silou na vnějším obvodu kola, které bylo nalisované na hřídel. Při zatížení oběžného kola na jeho zadní straně budou na jeho přední straně, kde je nanesena vrstva laku, vznikat tlaková napětí. Z tohoto důvodu je nutno použít relaxační metody, při které se vrstva laku nanáší na zatížené těleso a odlehčení se provádí až po samovolném ochlazení vrstvy na příslušnou teplotu. Trhlínky, představující jednu osu isostat, vzniklé v oblasti mezi lopatkami, jsou znázorněny na obr. 1. Z analýzy výsledků měření vyplývá:

- a) poblíž styku lopatky s kotoučem dochází k výraznému odklonu hlavních směrů od obvodového a radiálního směru
- b) v místě styku lopatky s kotoučem nedochází ke koncentraci napětí, neboť trhlínky se začaly šířit od osy symetrie mezi přilehlými lopatkami směrem k lopatkám
- c) odklon hlavních směrů je výraznější při zatížení spojitým zatížením než při zatížení liniovou silou.

Isostaty vzniklé na boční ploše lopatky jsou znázorněny na obr. 2. Výsledky získané křehkými laky byly ověřeny tenzometricky, a to pomocí růžic se základnami 1,5 mm od firmy Hottinger - Baldwin. Detailní rozbor výsledků, jejich interpretace a zdůvodnění jsou uvedeny v literatuře [2] .

Při nasazení kola na hřídel s přesahem dochází v blízkosti lopatek také k odklonu hlavních směrů od radiálního a obvodo-

vého směru. Odklon je však značně menší než u ohýbaného kola a jeho charakter závisí na průběhu velikosti přesahu mezi nábojem a hřídelem v axiálním směru. Soustava isostat získaná relaxační metodou je na obr. 3.

Byly prováděny pokusy s aplikací Brafa laků na rotující tělesa. Experimenty byly realizovány na tenkém kotouči konstantní tloušťky, na jehož vnějším obvodu byl masivní prsteneček přerušovaný radiálními drážkami a na kotouči s otvory. Pokusy nebyly úspěšné, neboť trhlinky nevznikaly ve směrech odpovídajících teoretickému řešení.

Vyšetřování hlavních směrů při různých tvarech kmitu lopatky bylo prováděno na jedné variantě oběžného kola kompresoru leteckého motoru M601. Měření se realizovalo na zkušebním zařízení vyvinutém pracovníky VZLÚ Letňany. Buzení lopatek se provádělo tlakovým vzduchem, který se z kompresoru přes zásobník přiváděl do dělicí hlavice. Součástí hlavice byl rotační element, jehož otáčkami byla regulována budící frekvence. Z hlavice vyústovala trubice, v jejíž těsné blízkosti se umísťovala vyšetřovaná lopatka oběžného kola, uchyceného na otočné desce (obr. 4). Po nanesení vrstvy křehkého laku, jejím samovolným ochlazením, byly postupně zvyšovány otáčky rotačního elementu v dělicí hlavici na hodnotu odpovídající frekvenci vyšetřovaného tvaru kmitu. Pak byl do dělicí hlavice vpouštěn tlakový vzduch v množství, vyvolávajícím popraskání lakové vrstvy. Při serii zkoušek, kdy teplota tlakového vzduchu byla kolem 25°C a kdy proud vzduchu byl přiváděn na opačnou stranu lopatky než byla laková vrstva, bylo dosaženo dobrých výsledků. Na obr. 5 jsou znázorněny isostaty při prvním tvaru kmitu. První trhlinka se objevila u kořene lopatky poblíž výstupní hrany a šířila se podél uchycení lopatky ke kotouči. Při dalším zvyšování intenzity budící síly se vytvářely isostaty podél výstupní hrany lopatky. Při určité hodnotě budící síly nastalo odlupování lakové vrstvy na lopatce a trhliny se začaly objevovat na mezipatce.

Systém isostat při druhém tvaru kmitu je na obr. 6. Jeliž isostaty jsou tvarově složitě, byly před dokumentací zvidi-

telněny barvou.

Serie zkoušek, kdy teplota vzduchu nasávaného kompresorem byla menší než 10°C a kdy vzduch z dělicí hlavice byl přiváděn na nalakovanou stranu lopatky, docházelo k samovolnému praskání lakové vrstvy již při nepatrném fouknutí vzduchem z hubice. Tento jev lze vysvětlit tím, že v rozmezí tzv. "praskací teploty", která leží těsně pod teplotou charakterizující jednotlivé typy Brafa laků, může způsobit chaotické praskání i nepatrná náhlá změna teploty vrstvy.

Serie zkoušek ukázaly, že použití křehkých laků pro určování tvaru isostat při různých tvarech kmitů lopatky je reálné, dává velmi názorné výsledky a je vhodným doplňkem pro kvantitativní určování hladin napětí tenzometrickým měřením. Pro odstranění chaotického praskání lakové vrstvy a tím i zajištění serióznosti experimentů by bylo vhodné zařadit do větve tlakového vzduchu zařízení pro regulaci jeho teploty.

STATICKÁ TENZOMETRICKÁ MĚŘENÍ ZA ROTACE.

Ve spolupráci s První brněnskou strojírnou, závodem Velká Bíteš a Ústavem aplikované mechaniky VŽKG při VAAZ bylo navrženo zkušební zařízení pro tenzometrická měření za rotace, obr. 7, na němž bylo provedeno testování použité měřicí metody a měření na reálném radiálním oběžném kole. Snímání signálů z tenzometrů bylo provedeno přes rotující přepínač a 12-ti místnou snímací hlavici Hottinger. Pohon zkušebního zařízení byl realizován elektromotorem umožňujícím plynulou regulaci otáček do hodnoty 100 Hz. Byla použita teplotní kompenzace korekcí s využitím teplotní charakteristiky tenzometrů. Jako snímače byly použity teplotně způsobené tenzometry Hottinger se základnami 0,6 mm a 3 mm.

V rámci testování metody byly zjišťovány teplotní charakteristiky těchto tenzometrů při aplikacích jednosložkového (Z70) a dvojsložkového (X60) lepidla. Zároveň bylo ověřováno dvou a třídrátové zapojení tenzometrů v rozsahu teplot odpovídajících ohřátí kotouče od ventilačních ztrát. Teplotní charakteristiky tenzometrů 3/120 LY11HBM se základnou 3 mm při použití lepidla

X60 jsou na obr. 8, při použití lepidla Z70 na obr. 9.

Ověřovány byly také přechodové odpory snímací hlavice Hottinger při otáčkách $n = 66 \text{ s}^{-1}$ v závislosti na čase (obr. 10). Maximální změna přechodových odporů z klidu na uvedené otáčky byla $\Delta R = 1,6 \text{ m}\Omega$, čemuž při použití tenzometrů s nominálním odporem $R = 120 \Omega$ odpovídá zdánlivá deformace 13,3 mikrostrainů, což je přijatelná hodnota.

Testování přesnosti měření poměrných deformací na rotující součásti se provádělo na tenkém rotujícím kotouči, při otáčkách $n = 66 \text{ s}^{-1}$. Jako testovací standart byly brány poměrné obvodové deformace, stanovené metodou konečných prvků. Průběh těchto deformací pro různé možnosti uchycení náboje kotouče je uveden na obr. 11. Tenzometry 3/120 LY 11 HBM byly nalepeny na kotouč v obvodovém směru do míst, kde deformace ε_t vykazují v závislosti na poloměru malou změnu. Současně s měřením časových závislostí ε_t byly měřeny i průběhy teplot, a to v místě nalepených tenzometrů a na vnějším obvodě kola. Teploty byly měřeny miniaturními termistory 13-NR-09/A2. Prováděla se měření při najetí z chladného a teplého stavu při dvoudrátovém a třídrátovém zapojení tenzometrů. Dále byl ověřován vliv izolačního spraye Barrier C firmy Hottinger na časový průběh poměrných deformací a teplot. Výsledky měření při najetí z chladného stavu při třídrátovém zapojení bez použití izolační vrstvy jsou na obr. 12. Získané poznatky lze shrnout takto:

- a) Na vnějším obvodě kola nastává v důsledku vyšší obvodové rychlosti a tím i větších třecích ztrát větší ohřev než poblíž náboje. Přibližně po 20 minutách nastává stabilizace teplot, přičemž při $n = 66 \text{ Hz}$ činí zvýšení teploty cca 6°C , takže vzhledem k charakteru teplotní charakteristiky snímačů 3/120 LY 11 HBM není nutno provádět korekci naměřených poměrných deformací.
- b) Po odečtení zdánlivé deformace vyvolané přechodovým odporem snímací hlavice (obr. 10) od naměřených poměrných deformací se dosáhne dobrého souladu s vypočtenými poměrnými deformacemi.

- c) Vliv povrchové ochrany sprayem Barrier C neovlivňuje naměřené poměrné deformace ani teploty.
- d) Dvoudrátové zapojení je zcela nevhodné i při nízkých teplotních změnách.

MOŽNOSTI POUŽITÍ REFLEXNÍ FOTOELASTICIMETRIE.

Aplikacemi reflexní fotoelasticimetrie, která patří mezi progresivní směry fotoelasticimetrických metod, se u nás zabývá řada pracovišť. Ve spolupráci s pracovníky experimentálního oddělení Vývojového závodu Turčianských strojárni v Martině, které patří mezi na šé přední fotoelasticimetrická pracoviště, byly prověřovány možnosti použití této metody na vyšetřování přetvoření a napjatosti v radiálních oběžných kolech. Bylo ověřeno, že i na tak složitý útvar, jako je mezilopatkový segment oběžného kola, je možno úspěšně nanést fotoelasticimetrickou vrstvu (obr. 13). Úspěšné byly i pokusy při určování nejvíce namáhaného místa při ohybu oběžného kola, kdy výsledky souhlasily s tenzometrickým měřením. Použití reflexní fotoelasticimetrie při vyšetřování napjatosti oběžných kol od staticky stálých zatěžujících účinků (násazení kola na hřídel s přesahem, ohyb kola axiálními silami) je tedy reálné. Určitou nevýhodou je, že je nutno použít vysokých hodnot zatěžujících účinků v důsledku nízké citlivosti fotoelasticimetrických vrstev. Pro orientační odhad byly odvozeny vztahy mezi zatěžujícím účinkem a řádem izochromat N pro nalisovaný a rotující tenký kotouč. Pro nalisovaný kotouč (K) na hřídel (H) na poloměru r_1 platí:

$$\frac{\Delta \sigma_1}{\sigma_1} = \frac{N \lambda}{4 t K} \frac{(1 - \mu_H) \frac{E_K}{E_H} + \frac{r_2^2 + r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} + \mu_K}{(1 + \mu_K) \frac{r_2^2}{r_2^2 - r_1^2}} \quad /1/$$

kde	Δr	přesah mezi kotoučem a hřídelem
	N	řád izochromaty na vnitřním poloměru kotouče
	λ	vlnová délka světla v polariskopu ($0,577 \cdot 10^{-6} \text{ m}$)
	K	fotoelasticimetrická konstanta (nejcitlivější vrstva $K = 0,15$)
	t	tloušťka fotoelasticimetrické vrstvy
	r_1, r_2	vnitřní a vnější poloměr kotouče

Pro úhlovou rychlost ω tenkého rotujícího kotouče platí:

$$\omega = \sqrt{\frac{N\lambda}{tK} \frac{E}{\rho} \frac{1}{r_1 r_2} \frac{1}{\sqrt{(1-\mu^2)(1+\mu)(3+\mu)}}} \quad /2/$$

$$\eta = \frac{\omega}{2\pi} \quad /3/$$

ρ měrná hmotnost kotouče

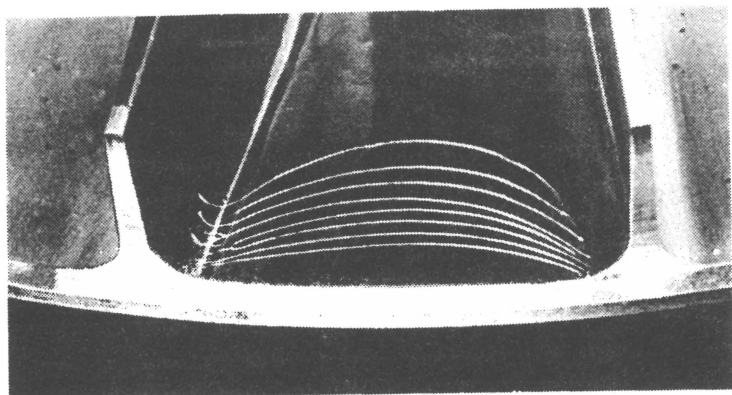
Grafické znázornění vztahu (3) pro ocelový kotouč je na obr. 14. Aplikace reflexní fotoelasticimetrie na rotující oběžná kola je tedy podmíněna vysokými otáčkami.

Při kvantitativním vyhodnocování rovinné napjatosti, která vzniká na všech volných površích rotujícího oběžného kola, je nutno kromě kolmého nasvětlení provést i nasvětlení šikmé. Toto se provádí pomocí adaptéru, přičemž je nutno přiblížit se hrotem adaptéru k měřenému místu. Při vysokých otáčkách, které jsou při měření nutné, to nebude snadné. Reflexní fotoelasticitru nelze za rotace aplikovat na boční plochy lopatek, protože není možné kolmé ani šikmé prosvětlení. V oblasti mezi lopatkami, kde nelze provést šikmé nasvětlení, lze získat pouze kvalitativní výsledky rozdílů hlavních poměrných deformací. Jedinou oblastí, kde bude možno provádět i kvantitativní měření, je zadní hladká strana kola a krycí kotouč u uzavřených typů turbín. Vzhledem k malým tloušťkám nosných a krycích kotoučů, které jsou srovnatelné s tloušťkou fotoelasticimetrické folie, bude nutno uvažovat její vyztužující vliv. V současné době jsou na katedře tech.mechaniky, pružnosti a pevnosti zjišťovány hodnoty korekčních součinitelů pro přímé a šikmé rotující kotouče a ramena pomocí metody konečných prvků.

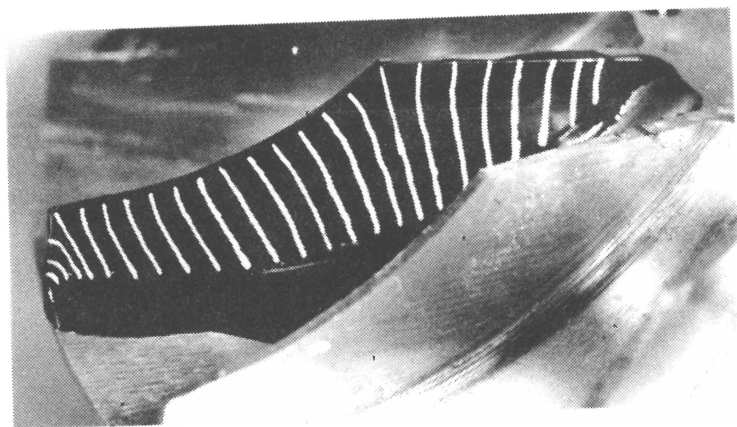
- 1 JANÍČEK, P., WASGESTIAN, I., ŽIVOTSKÝ, D.: Použití křehkých laků v technické praxi. Sborník ICEM, Praha 1972.
- 2 JANÍČEK, P.: Současný přístup k určování přetvoření a napjatosti v radiálních oběžných kolech. Habilitační práce, FS VUT Brno 1976.
- 3 JANÍČEK, P.: Aplikace křehkých laků při dynamických zatíženích. Technická zpráva pro VZLÚ Letňany, Brno 1973.

- Obr.1 Trhlinky v křehkém laku v mezilopátkovém prostoru oběžného kola od působení spojitého zatížení na jeho zadní stranu
- Obr.2 Trhlinky v křehkém laku na boční straně lopatky vyvolané působením spojitého zatížení na zadní stranu oběžného kola
- Obr.3 Trhlinky v křehkém laku v mezilopátkovém prostoru oběžného kola při jeho nalisování na hřídel s přesahem
- Obr.4 Zkušební zařízení pro vyšetřování napjatosti při různých tvarech kmitu lopatky
- Obr.5 Soustava isostat při prvním tvaru kmitu lopatky
- Obr.6 Soustava isostat při druhém tvaru kmitu lopatky
- Obr.7 Zkušební zařízení pro statické tenzometrické měření za rotace
- Obr.8 Teplotní charakteristiky tenzometrů 3/120 LY 11 HBM s použitím lepidla X60
- Obr.9 Teplotní charakteristiky tenzometrů 3/120 LY 11 HBM s použitím lepidla Z70
- Obr.10 Závislost přechodových odporů snímací hlavičky Hottinger v závislosti na čase při otáčkách $n = 66 \text{ s}^{-1}$
- Obr.11 Průběh poměrných obvodových deformací po poloměru testovacího kotouče pro různé případy jeho uchycení
- Obr.12 Průběh poměrných obvodových deformací a teplot v závislosti na čase získaných měřeními na testovacím kotouči
- Obr.13 Fotoelasticimetrická fólie natvarovaná na radiální lopatku oběžného kola
- Obr.14 Závislost otáček na vnitřním a vnějším poloměru tenkého ocelového kotouče potřebných pro vytvoření prvního řádu izochromat / $K = 0,15$, $t = 3 \text{ mm}$ /.

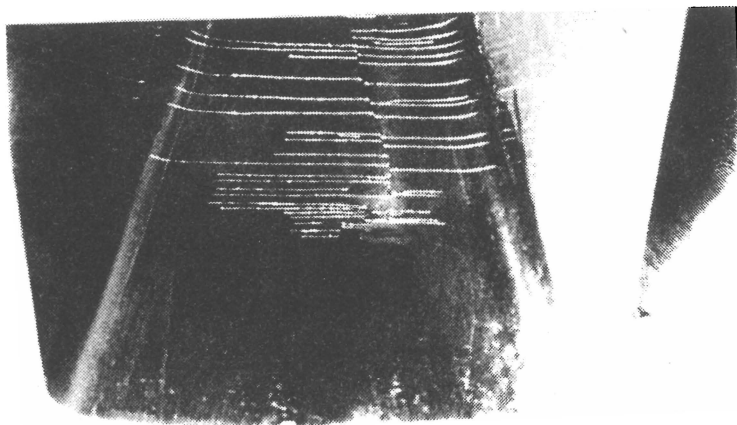
Обр. 1

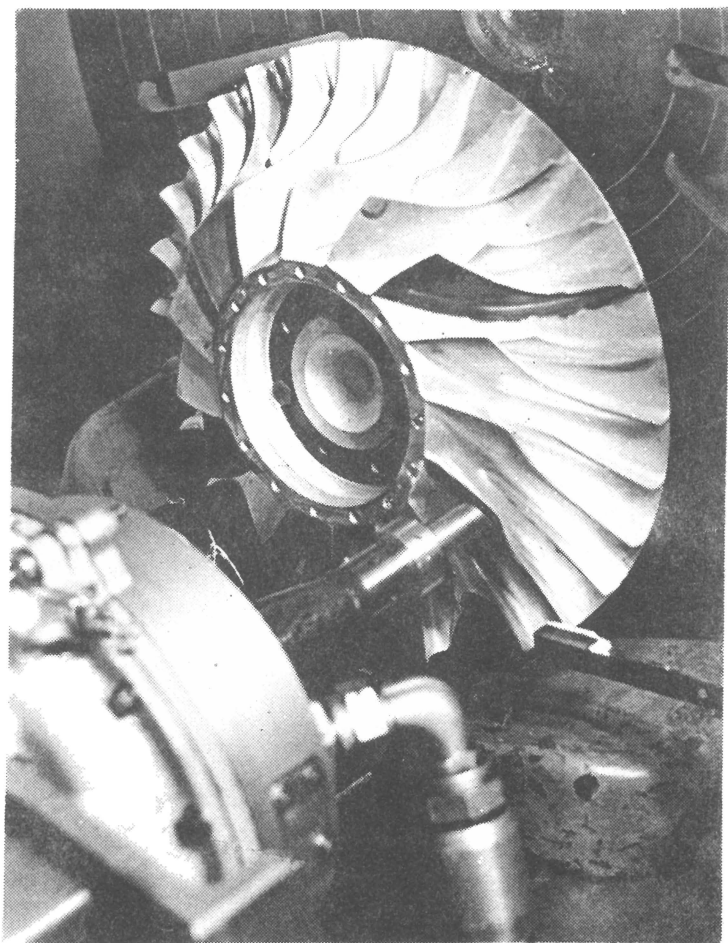


Обр. 2

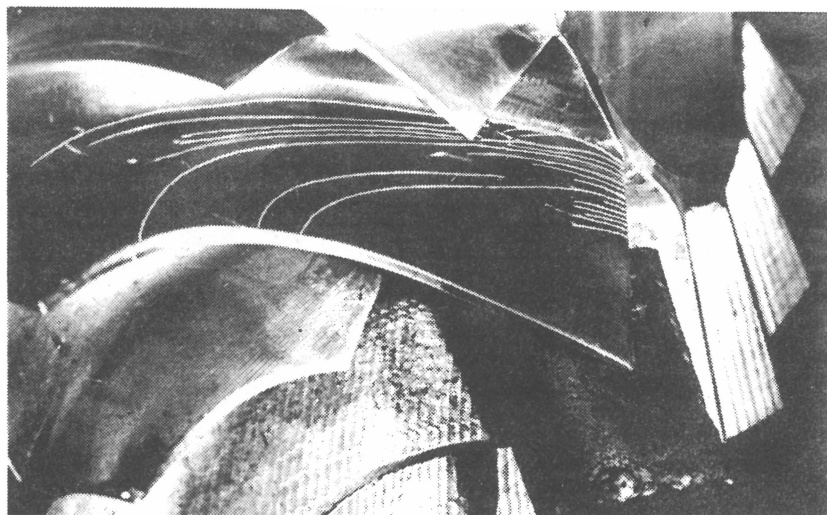


Обр. 3

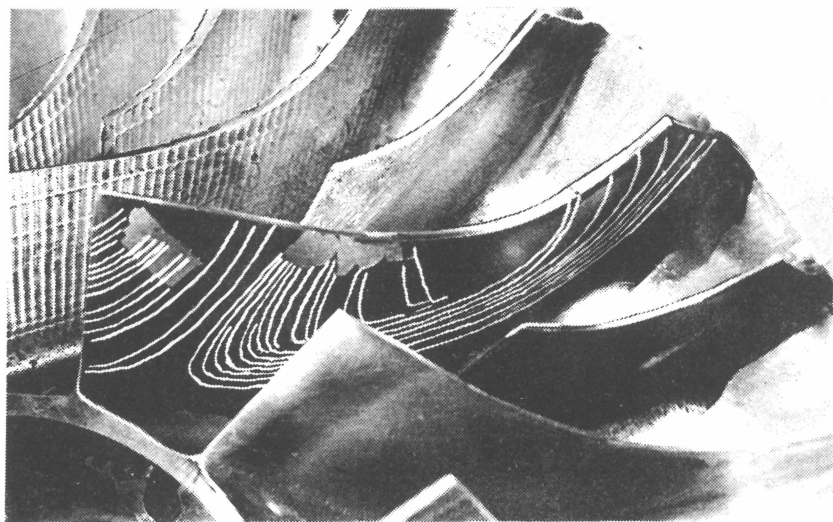




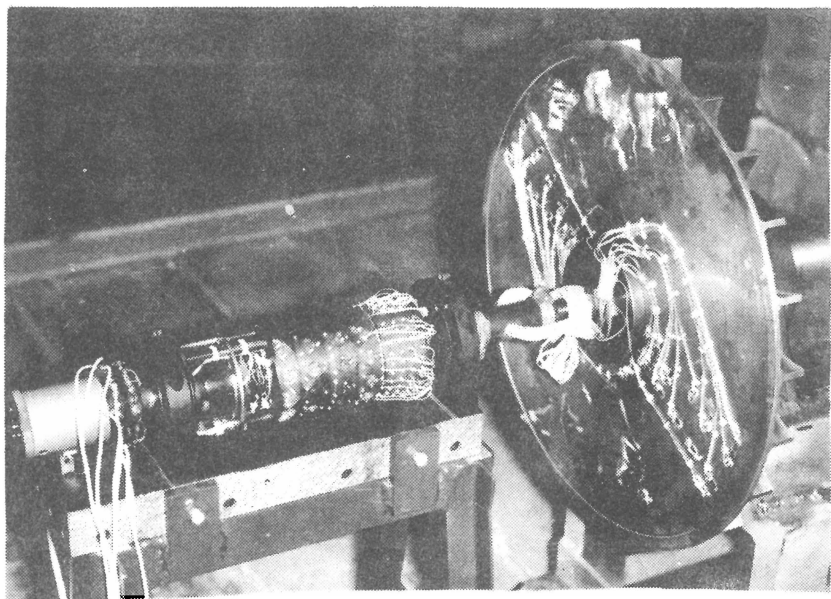
Obr. 5



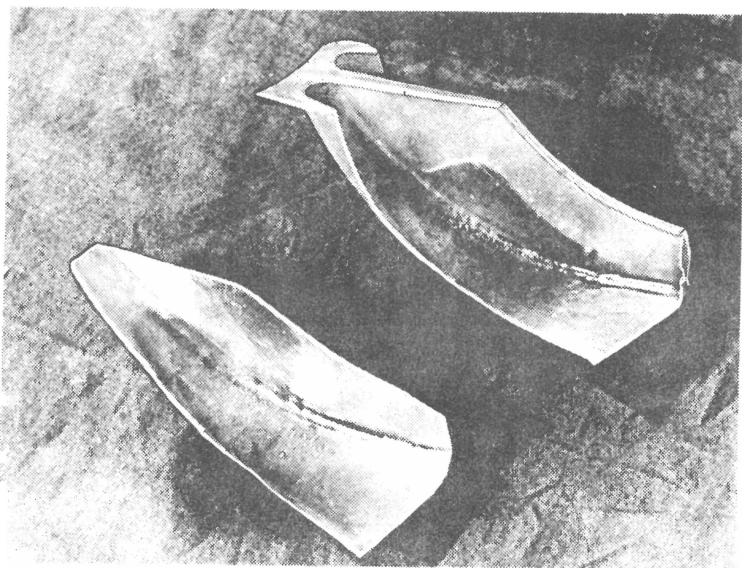
Obr. 6



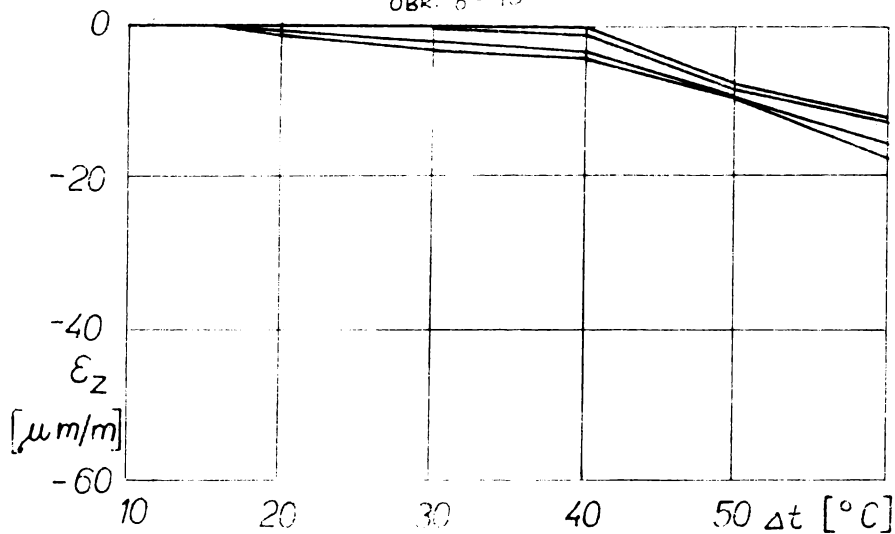
Oct. 7



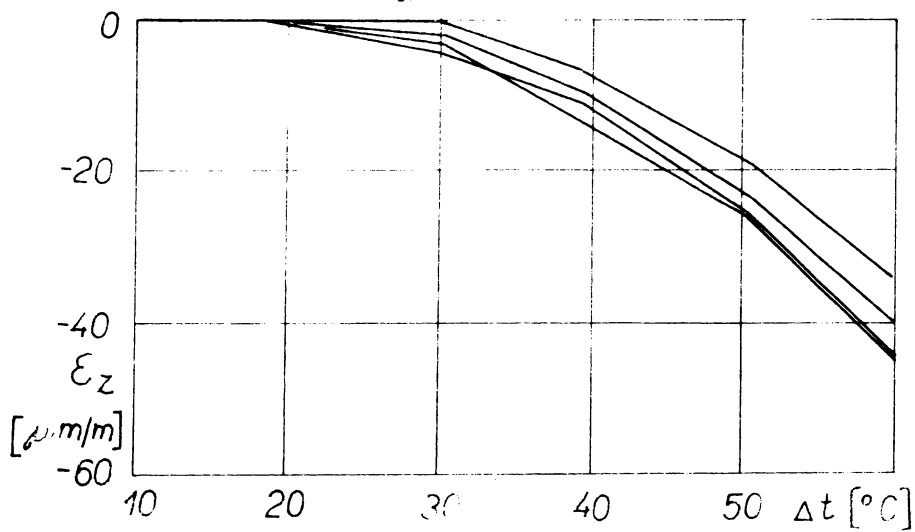
Oct. 13



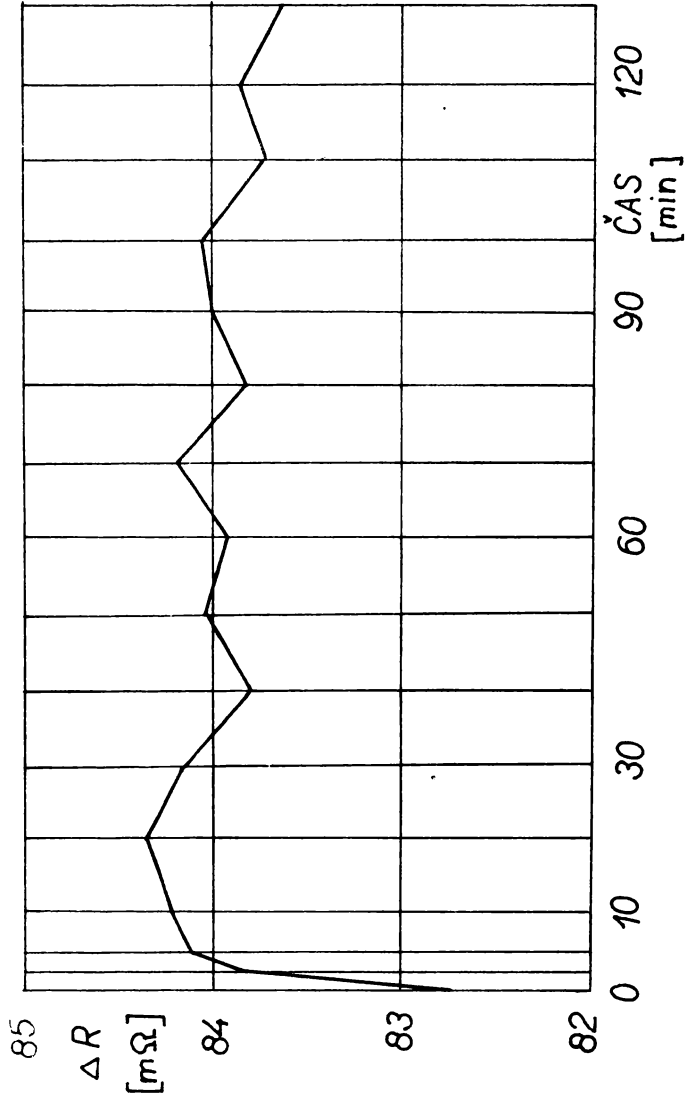
OBR. 8 - 10

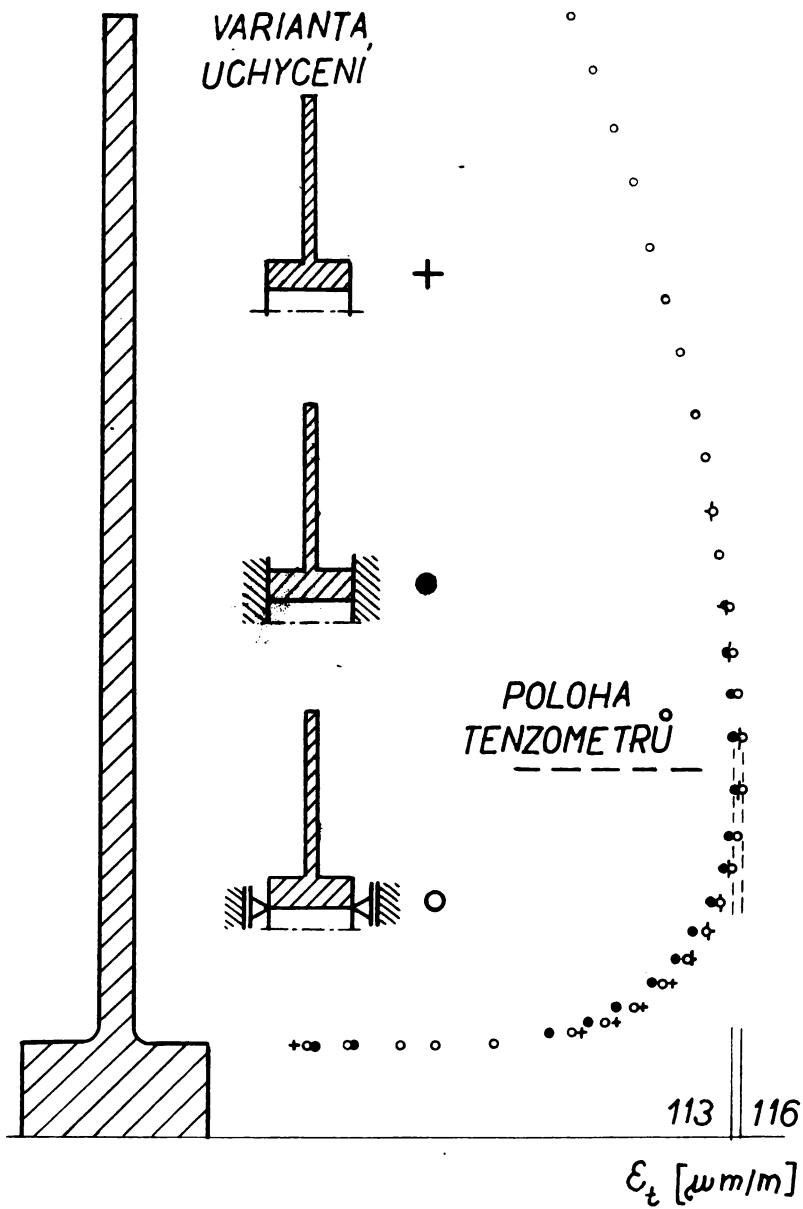


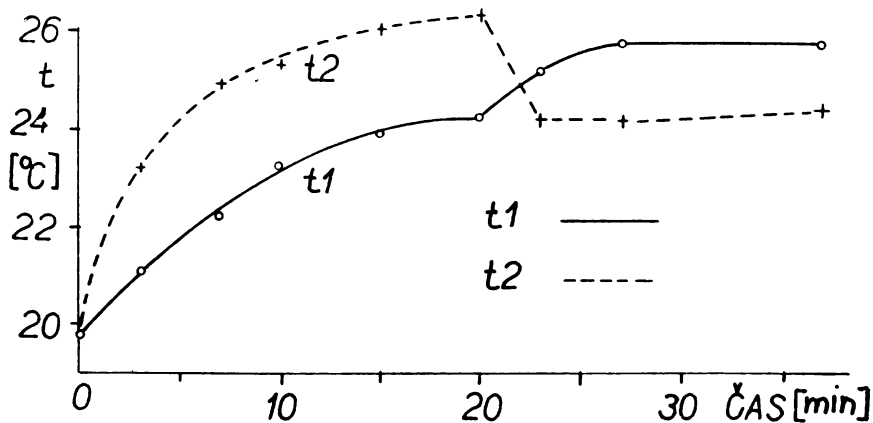
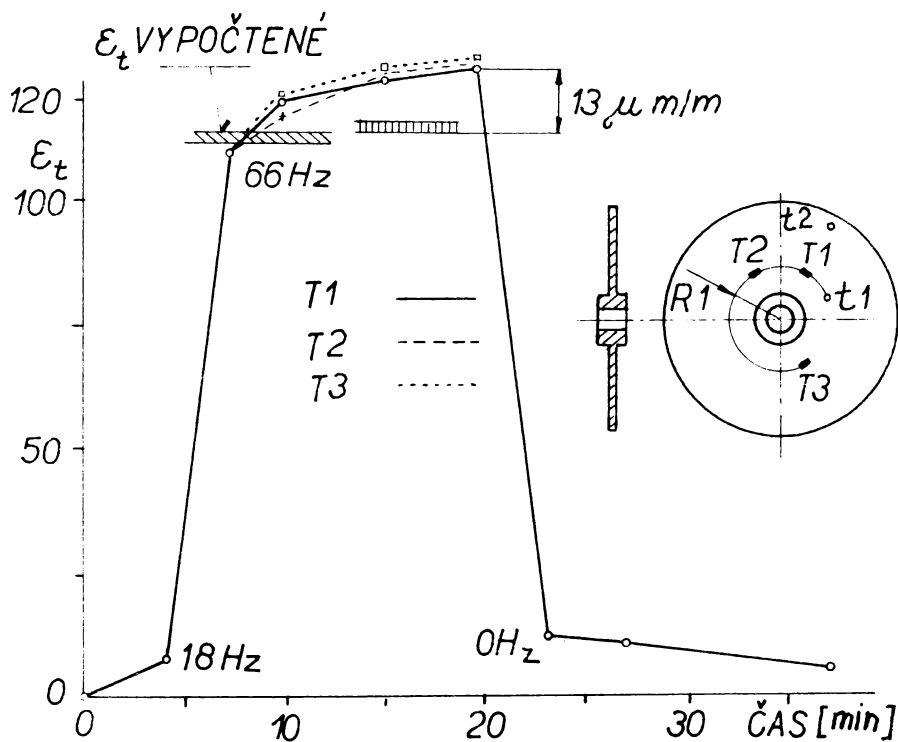
OBR. 9 - 10



10 - 10







obr. 14 - 10

