

## EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZA NAPĚTÍ A DEFORMACÍ LETECKÝCH VRTULÍ S KOMPOZITNÍMI LISTY VE VZLÚ.

Ing. Zdeněk Huječek, CSc. VZLÚ Praha

Ing. Milan Holl, CSc. VZLÚ Praha

Nejnovější generace leteckých vrtulí, na jejímž předvývojovém výzkumu a přípravě vývoje ve VZLÚ se systematicky pracuje od r. 1986 /1/, /2/, /3/, /4/, je charakterizována listy z kompozitních materiálů a náboji z lehkých slitin. Vzhledem k tomu, že se jedná o primární letecké konstrukční části, je nutné experimentální analýze napětí a deformací věnovat prvořadou pozornost.

Dosud se u nás náboje vrtulí vyráběly vesměs z ocelových výkovků. Jejich výrobní technologie je velmi náročná. Snížení hmotnosti náboje bývá velmi obtížné, protože limitujícím faktorem zpravidla není pevnost, ale tuhost. Použitím skleněných a uhlíkových vláken, epoxydových pryskyřic a tvrdých pěn lze významně snížit hmotnost listu. Tím se podstatně sníží setrvačné síly a momenty působící na náboj, což umožňuje výhodně nahradit ocel lehkou slitinou např. 424207. Optimální tvarové řešení a dimenzování nábojů se v současné době neobejde bez strojových výpočtů a použití MKP. V rozsahu, který je umožněn nám dostupnou výpočetní technikou jsme získali ve VZLÚ první výsledky /5/ a pro jejich ověření a předepsané pevnostní průkazy vyvinuli unikátní zkušební zařízení: stend pro statické zatěžování nerotujícího náboje osmilité vrtule experimentální V09 a stend pro zkoušky rotujících vrtulových hlav při zatěžování náboje hmotnostními náhradami listů. Na stendu pro statické zatěžování jsme provedli orientační měření napjatosti náboje metodou křehkých laků a připravujeme tenzometrování. Na stendu s elektromotorem jsme ověřovali metodiku zkoušek měřením kvazistatického namáhání náboje vrtule V510 polovodičovými tenzometry. Výsledky byly porovnány s výsledky měření drátkovými tenzometry, které bylo prováděno při pevnostní statické zkoušce v r. 1985 na pevnostní zkušebně letadel ve VZLÚ a s výsledky výpočtů, viz obr. 1.

Ověřili jsme, že je nutno geometricky velmi přesně umístit tenzometry na náboj. Rovněž výrobní tolerance a dispozice statické zkoušky mohou značně ovlivnit výsledky měření. Pro instalaci tenzometrů na tvarově složitě těleso jsou nutné speciální přípravky a před instalací je nutno provést kvantitativní rozměrovou analýzu.

Prvým krokem při pevnostně dynamickém řešení kompozitního vrtulového listu je nezbytná analýza napětí a deformací v kořenové části listu, zejména ve spoji kompozitního materiálu listu s kovovými částmi kořene. Pro laboratorní zkoušky byly navrženy a zhotoveny zkušební konstrukční vzorky (řez viz na obr.2). Přípravky, které bylo nutno vyřešit pro upnutí zkušebních vzorků na zatěžovací stroj INOVA URS 1812, umožňují provádět statická měření i únavové zkoušky tahem, ohybem a kombinací tahu a ohybu. Úplný cyklus zkoušek nebyl dosud u nás uzavřen. Nástupní experimenty byly provedeny na zatěžovacím stroji Losenhausenwerk (C-350 kN) v r.1987 na části experimentálního listu V10WW upraveném pro statickou zkoušku kořene. V r.1988 byly na téže stroji zkoušeny vzorky kořenové části experimentálního kompozitního listu V530. Výsledky měření a výpočtu jsou uvedeny na obr.3.

Rozsáhlou a závažnou etapou výzkumné vývojových prací na kompozitních vrtulích jsou únavové zkoušky celých listů. Obdobně, jako u listů kovových, je nutné určit u kompozitních listů kritickou oblast s maximálním dynamickým namáháním při vybuzeném rezonančním kmitání. Tato analýza se u duralových listů prováděla tenzometricky /6/. Vzhledem k malé tepelné vodivosti, jakož i k větší pravděpodobnosti výskytu vad, je možné a vhodné posuzovat rozložení dynamického namáhání podle teplotních gradientů na povrchu kmitajícího kompozitního listu. Použili jsme k tomu dvě základní termografické techniky: jednodušší metody "chemické" využívající tekutých krystalů používaných v lékařské diagnostice a dokonalejší metody "elektronické", tj. termovize pomocí aparatury fy AGEMA zapůjčené a obsluhované pracovníky EVÚŠP Běchovice. Po tomto měření lze zvolit již poměrně malý počet míst pro instalaci tenzometrů k získání kvantita-

tivních údajů.

Specifikou analýzy napětí v kompozitních materiálech jsou značné nejistoty v určení materiálových "konstant" a v předpokladech o rozložení napjatostí uvnitř kompozitního výrobku. Z technického zvládnutí problematiky vývoje kompozitních vrtulových listů je nutnou podmínkou vypracování a ověření souboru výpočtových metod a pevnostních a dynamických programů, včetně adekvátního výpočtového modelu listu. Vzhledem k našim možnostem jsme se orientovali na zjednodušenou metodiku ekvivalentních řezů /7/, /8/, včetně získání základních výpočtových hodnot /9/, /10/, /11/ a na nosníkový model listu. Z korelací dosud u nás zjištěných mezi teoretickými a experimentálními výsledky vyplývá, že jsme schopni předpovědět pevnostně dynamické chování kompozitního listu dostatečně přesně pro zajištění nejbližších realizačních výstupů. Za prověrku správnosti a v některých oborech i přesnosti výpočtových postupů pokládáme jednak porovnání výsledků měření průhybu a deformací vetknutého listu s výpočtem, viz obr.4, jednak porovnání výpočtových a změřených frekvencí a tvarů rezonančního kmitání listu při laboratorních a poloprovozních podmínkách.

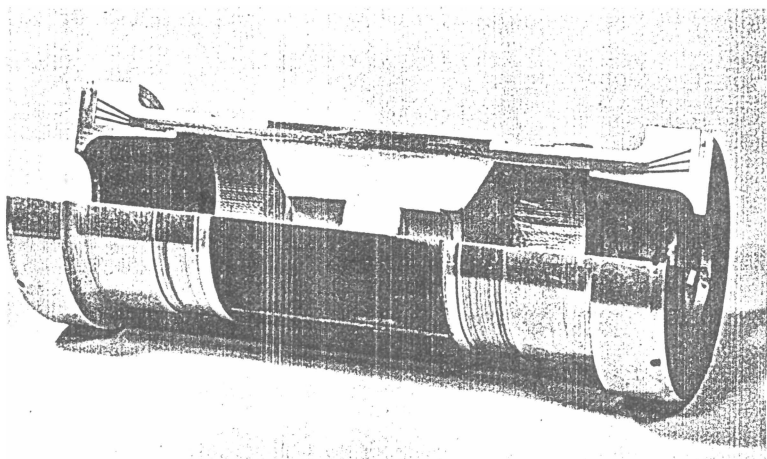
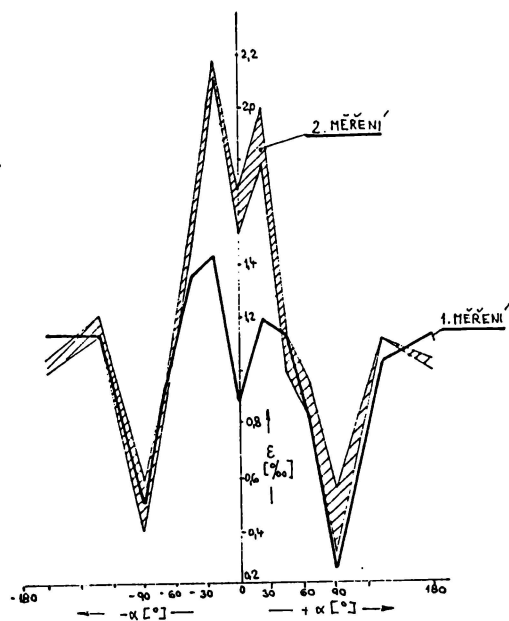
Předpokladem dostatečně přesné a přitom správné analýzy dynamického namáhání kompozitních a mnoholistových vrtulí je dostatečně velký počet tenzometrovaných míst v co nejkratším časovém intervalu při nastaveném provozním režimu pohonné jednotky. Počet měřených míst na rotující vrtuli při jediném nastaveném režimu pohonné jednotky je limitován použitým přístrojovým vybavením pro přenos signálů z tenzometrů na rotující vrtuli a měřicí a registrační aparaturou. Dosavadní metodika tenzometrických měření na rotujících listech vychází z technických možností rotujících kontaktů Rottinger typ SK12. Dosud se ve VZLÚ měřilo současně 5 tenzometrů na rotující části pohonné jednotky. Před měřením další pětice bylo nutno přeletovat příводы tenzometrů při zastavené pohonné jednotce. Ve /12/ je navržena a posléze úspěšně vyvinuta aparatura umožňující měření s přepínáním tenzometrů za rotace vrtule. Při měřeních na pětিলísté experimentální kompozitní vrtuli V10WW bylo bez přeruše-

ní nastaveného režimu motoru měřeno vždy 10 tenzometrů, při měřeních na experimentálních listech V530 maximálně 32 tenzometrů při použití rotujících kontaktů SK12 a speciální aparatury dle /12/. Typické záznamy signálů tenzometrů registrované při experimentálním upřesňování oblasti odtrhového flutteru listů V530-S jsou uvedeny na obr.5. Automatická analýza signálů tenzometrů /13/ registrovaných na měřícím magnetofonu umožňuje velmi operativně určit rezonance a významné budící frekvence, jakož i závažnost jednotlivých rezonančních režimů.

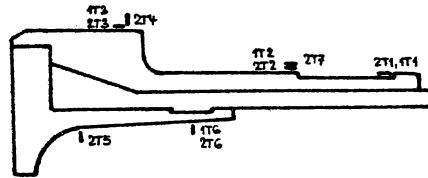
#### Literatura

- /1/ Benda L., Fáber V.: Kompozitní vrtule.  
Zpráva VZLÚ V 1570/86
- /2/ Machovec P.: Experimentální pětistá vrtule s kompozitními listy.  
Zpráva VZLÚ V /87
- /3/ Holl M., Jakubiček R., Bornhorstová V.: Pevnostně dynamický návrh, výpočet a experimentální ověření kompozitních vrtulových listů V10WW.  
Zpráva VZLÚ V 1617/88
- /4/ Polák J.: Technologie výroby experimentálního listu vrtule V10WW z kompozitních materiálů.  
Zpráva VZLÚ V /88
- /5/ Groll S., Holl M.: Poznatky z vývoje a aplikace metody výpočtu náboje vrtulové hlavy.  
Zpráva VZLÚ - je v oponentním řízení
- /6/ Huječek Z., Holl M.: Příspěvek k experimentální analýze napětí duralových listů nové generace leteckých vrtulí, Sborník 21.  
Celostátní konference Experiment. analýza napětí, Luhačovice
- /7/ Holl M.: Metodika výpočtu napětí vrtule od stacionárních sil a vynuceného kmitání v mimorezonanční oblasti.  
Zpráva VZLÚ V 1474/82
- /8/ Jakubiček R.: Programy pro výpočet ekvivalentních charakteristik kompozitních průřezů.  
Zpráva VZLÚ K 2342/86
- /9/ Jelínek M., Křena J.: Základní mechanické hodnoty kompozitu se skelnou tkaninou.  
Protokol 3160/1/87
- /10/ Jelínek M.: Základní hodnoty kompozitu s G-C vláknem.  
Protokol 3160/2/87
- /11/ Pospíšil B.: Základní mechanické hodnoty kompozitů pro vrtulový list V10WW.  
Protokol 2370/1/87
- /12/ Pospíšil B.: Dálkové přepínání měřících míst při měření na rotujících částech.  
ZN 87/87, PV 6543/87
- /13/ Kabeš P.: Referát z konference v Motorletu.

Obr.1.

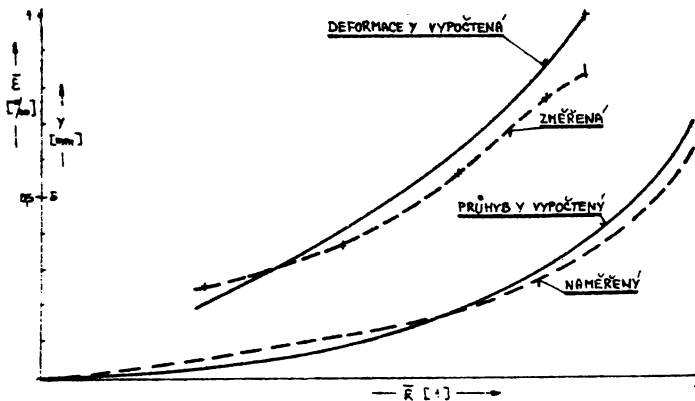


Obr.2.

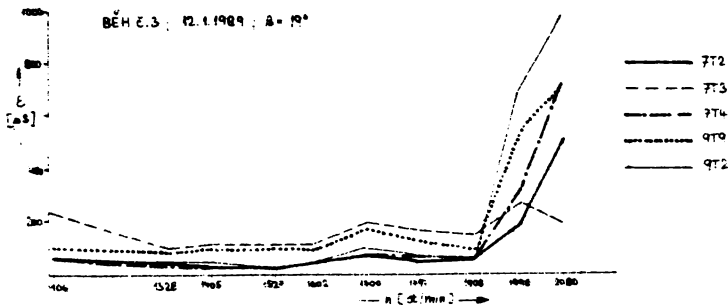


| Tenzometr | 1T1 | 2T1 | 1T2 | 2T2 | 2T7 | 1T3  | 2T3  | 2T4 | 2T5 | 1T6 | 2T6 |
|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|-----|-----|-----|-----|
| Naměřeno  | 100 | 96  | 230 | 180 | 230 | -390 | -315 | 40  | 37  | 52  | 45  |
| Výpočet   | 140 |     |     | 182 |     |      | -272 | 36  | 12  |     | 72  |

Obr.3.



Obr.4.



Obr.5.