

České vysoké učení technické v Praze,
Fakulta strojní

Czech Technical University in Prague,
Faculty of Mechanical Engineering

Doc. Ing. Milan Růžička, CSc.

**Metody a prostředky mechaniky při zvyšování pevnosti, životnosti
a spolehlivosti lehkých strojních konstrukcí**

**Methods and tools of mechanics used for the strength, fatigue life
and reliability improvement of light-weight mechanical structures**

Summary

The future belongs to light-weight, but sufficiently stiff, heavily loaded but adequately strong structures, 'intelligent structures', with passive and active components which will guarantee their operating safety and reliability. Only skilfully designed and detailed structures will be able, from the point of view of the resistance against their *limiting states*, to meet the other criteria necessary to reduce production and operating costs as well as repair costs, and thus optimise their price. After the aeronautics and aerospace industries, these state-of-the-art structures made of high-strength steels, light alloys and, in particular, composite materials, are now finding application in other industries. In engineering, it is mainly transportation technologies, robotics, manipulation equipment and machining centres, wind power stations, printing industry and various consumer goods industries, such as sports equipment and tool manufacturing. The paper focuses in detail on two major issues concerning assessment of the limiting states of these state-of-the-art structures.

The first part is the design of their static strength and stiffness. This deals with design calculations and testing, especially of filament wound composite structures and their joints. New analytical approaches have been devised and computer programs developed for optimising the stiffness and strength of both circular and non-circular cross-section members. The technological parameters of the winding process affecting the macrostructure of periodic unit cell with crossed and non-crossed layers are considered. The calculation results have been verified by mechanical tests of both types of structures, showing a good match between the calculations and the experiments.

The second part of the paper deals with monitoring stress in structures, in this case applied to a small aircraft. A methodology has been developed and an onboard instrument constructed for assessing operating stress, local deformations and for assessing the fatigue life exhausted in critical points of the airframe in real time, with immediate on-board information and monitoring using GSM network.

Souhrn

Budoucnost bude patřit lehkým, přesto dostatečně tuhým konstrukcím, konstrukcím vysoce zatíženým a přesto dostatečně pevným, „inteligentním“ konstrukcím s pasivními i aktivními prvky, které zajistí jejich provozní bezpečnost a spolehlivost. Pouze kvalifikovaně navržená a nadimenzovaná konstrukce z hlediska odolnosti vůči jejím *mezním stavům* může splnit další kritéria, která jsou potřebná pro snížení výrobních a provozních nákladů i nákladů na opravy vedoucí k optimalizaci její ceny. Z oborů letectví, kosmonautiky se tyto progresivní konstrukce z vysoko pevnostních ocelí, lehkých slitin a zejména z kompozitů uplatňují i v dalších oborech. Ve strojírenství je to zejména v dopravní technice, robotice, manipulační technice a obráběcích centrech, v zařízeních větrných elektráren, tiskařském průmyslu a i v oblastech spotřebního průmyslu, např. sportovních zařízení a náčiní. Přednáška se blíže zaměřuje na dvě díle problematiky posuzování mezních stavů progresivních konstrukcí.

První z nich je navrhování na statickou pevnost a tuhost. Zabývá se výpočty a zkoušením zejména vláknových navíjených kompozitových struktur a jejich spojů. Byly odvozeny nové analytické přístupy a vytvořeny počítačové programy pro optimalizaci tuhosti i pevnosti prutových prvků kruhového i nekruhového průřezu. Jsou zohledněny technologické parametry navíjení, ovlivňující makrostrukturu periodické buňky s kříženými nebo nekříženými vrstvami. Verifikace výsledků výpočtů byla prováděna mechanickými zkouškami obou typů struktur a dávala dobrou shodu výpočtů a experimentů.

Druhá část přednášky je věnována monitorování namáhání konstrukcí, zde v aplikaci na malá letadla. Byla vytvořena metodika a realizováno palubní zařízení pro vyhodnocování provozních zatížení, lokálních deformací a vyhodnocování čerpání únavového života v kritických místech draku letounu v reálném čase s možností okamžité palubní informace a monitorování pomocí GSM sítě.

Klíčová slova:

výpočtová mechanika, lehké konstrukce, mezní stavy, kompozitní materiály, experimentální analýza namáhání, únavová pevnost, únavová životnost, malá letadla, monitorování provozních zatížení, sledování únavového poškození

Keywords:

computational mechanics, light-weight structures, composite materials, experimental stress analysis, fatigue strength, fatigue life, small airplanes, operational loading monitoring, fatigue damage monitoring.

Obsah

1	Úvod.....	6
2	Požadavky na moderní konstrukci a způsoby zvyšování jejích parametrů	7
3	Příspěvek k metodám výpočtu a navrhování kompozitových dílů a jejich spojů.....	9
3.1	Vliv struktury navíjení na tuhost kompozitových trubek.....	9
3.2	Popis nelineárního deformačního chování kompozitových trubek	11
3.3	Vývoj nových typů kompozitových spojů	14
4	Příspěvek ke zvýšení spolehlivosti monitorováním skutečného provozu a predikce okamžitého stavu únavového poškození malých letadel	15
4.1	Vstupní podklady	15
4.2	Popis jednotlivých kroků algoritmu	16
4.3	Realizace monitorování provozních zatížení na ultralehkých letadlech	22
5	Závěr	23
_____	Literatura.....	24

1 Úvod

V současném období na prahu nového tisíciletí se stále více prosazují do praxe kvalitativní změny technických řešení a typy *pokročilých strojních konstrukcí*, které musejí splňovat nejvyšší nároky na obecně prosazované požadavky ekonomičnosti pořízení i provozu při vysokých nárocích na jakost, spolehlivost a bezpečnost. Přitom musí být takto navržené stroje a zařízení schopny odolávat trendu zvyšování provozních parametrů, a tím jejich namáhání, odolávat náročným pracovním podmínkám (např. extrémním teplotám, agresivnímu prostředí), které limitují jejich mezní stavy porušování. Nepřehlédnutelným požadavkem na tyto typy konstrukcí jsou v tomto kontextu ekologické provozní parametry a recyklovatelnost materiálů.

Moderní nástroje mechaniky umožňují získat detailní přehled o lokálních napětích a deformacích, jsou schopny simulovat dynamickou odezvu konstrukce, odolnost rázům a impaktnímu porušení, ztrátu stability aj. Podobně simulační výpočty kumulace únavového a creepového poškození, vzniku a šíření trhlin, podporované experimenty přinášejí reálnější obraz o možném vzniku různých mezních stavů porušování než před řadou let. „*Inteligentní*“ konstrukce monitorovaná snímači a informující o svém stavu namáhání dovoluje daleko reálněji hodnotit skutečné provozní podmínky i míru degradace jejich limitních vlastností.

Přesto je konstrukční praxe často vázána používáním zaběhlých postupů a konzervativních norem, které neumožňují plně využívat výše uvedené možnosti. Nejen v leteckém průmyslu se všeobecně traduje, že náklady rostou úměrně s hmotností. Je proto třeba vymaňovat se z hmotnostního a konstrukčního „komfortu“ a promítat současné inženýrské znalosti do návrhové praxe. Např. jsou nadále používány součinitelé spolehlivosti (bezpečnosti), které vycházejí z deterministického pojetí, které bylo vlastní minulému století. Zohledňují se jimi nejčastěji následující nejistoty:

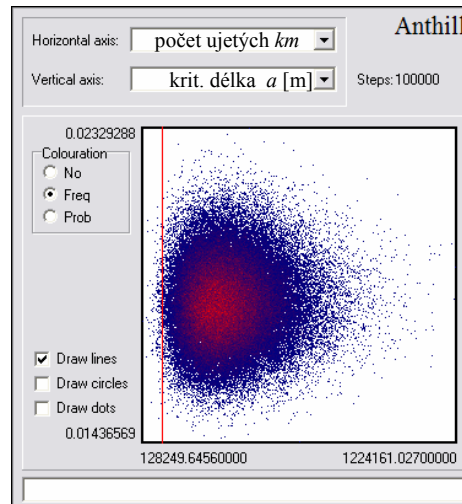
- neznalost skutečných provozních zatížení
- nepřesnost podkladů o mezních hodnotách materiálu
- neznámá míra rozptylů obou předchozích hodnot
- přenositelnost výsledků ze zkoušek na konstrukci
- variabilita rozměrů a technologie reálného dílu
- variabilita montáže a lidského faktoru
- nejednoznačná detekovatelnost případné poruchy aj.

Deterministický postup přitom uplatňuje konzervativní hledisko ve všech kategoriích současně. Parciální součinitelé bezpečnosti jsou však vzájemně propojeny a nikdy tak nelze výsledek spojit s realitou, co do vyjádření skutečné pravděpodobnosti možné poruchy.

Proto se v posledním desetiletích stále častěji uplatňují pravděpodobnostní přístupy. Dokáží provázat míru konzervativnosti ve všech jmenovaných oblastech a mohou vést k významné úspoře hmotnosti a nákladů a to bez zvýšení rizika porušení. Pravděpodobnostním přístupem lze kvantifikovat hustotu pravděpodobnosti výskytu každé vstupní veličiny na základě modelu statistického rozdělení nebo i empirických histogramů četnosti. Jsou-li systematicky sbírány informace a vytvářeny potřebné databáze vstupních dat, umožní tento přístup v konečném výsledku vyjádřit pravděpodobnost vzniku možné poruchy, kterou lze zhodnotit kritériem obecně únosného rizika selhání konstrukce.

Příkladem aplikace pravděpodobnostního přístupu je např. metoda SBRA [1] založená na počítačovém generování vstupních veličiny dle zadaných statistických rozdělení nebo

empirických histogramů četnosti metodou Monte Carlo. Obr. 1.1 ukazuje „mravenišť“ výsledků predikce počtu ujetých km při šíření únavové trhliny v součásti. Mezní čára stanovující požadovaný dráhový proběh do kontroly potom rozděluje celou oblast na dvě podoblasti. Poměr výsledků simulace vyskytujících se v těchto podoblastech definuje pravděpodobnost výskytu trhliny dané velikosti před provedením kontroly.



Obr. 1.1

Další významné zpřesnění a zvýšení spolehlivosti přináší hodnocení poškození konstrukce *podle jejího reálného stavu*. Tento přístup je založen na individuální monitorování zatížení nebo napětí v konstrukci v reálných provozních podmínkách. Sběr dat a jejich zpracování v reálném čase umožňuje rovněž vyhodnocovat degradační procesy v mezních parametrech a zohlednit je v procesu *řízeného stárnutí* a při hodnocení stupně čerpání životnosti konstrukce.

2 Požadavky na moderní konstrukci a způsoby zvyšování jejich parametrů

Výsledek návrhu strojů a zařízení musí garantovat jejich bezpečný provoz po celou dobu projektovaného života, schopnost odolávat vysokým a opakovaným provozním zatížením i náhlým rázům a přetížením. Zvýšení pevnosti a technického života lze obecně dosahovat různými způsoby. Prostředky užívané v konstruktérské praxi ve spojení s aplikovanou mechanikou a mechatrikou jsou obvykle spojovány s následujícími opatřeními:

1. Snižováním globální úrovně napětí v únavově kritických místech konstrukce. To však vede k volbě větších nosných průřezů a tím k nárůstu hmotnosti. Tento záměr je v rozporu s požadavky na lehkou pokročilou konstrukci, a proto musí být nahrazen jinými způsoby, viz dále.
2. Optimalizací konstrukčního návrhu tak, aby byly omezeny koncentrace napětí, náhlé změny průřezů a tuhostí aj. Tím dojde ke snížení lokálních špiček napětí bez nároků na významnější nárůst hmotnosti.
3. Výběrem materiálů s lepšími únavovými vlastnostmi, materiálů s řízenou tuhostí. Zde je třeba vybalancovat zvýšené náklady na materiál se ziskem vyšší pevnosti a životnosti

(např. použití kompozitních materiálů nebo náročnějších technologických postupů při zpracování materiálů tradičních).

4. Rozsáhlým experimentálním programem ověřování mechanických vlastností zkouškami. To umožní zpřesnit výpočtové postupy, získat statistické informace aplikované v pravděpodobnostních přístupech.
5. Progresivními technologickými postupy, které přinášejí zlepšení mechanických vlastností materiálu a jeho odolnosti vůči provozní degradaci.
6. Sledováním provozních podmínek a zatížení po reprezentativní dobu provozu, které vede k sestavení návrhových spekter zatížení.
7. Individuálním monitorováním zatížení nebo napětí v konstrukci, které zpřesňuje informace návrhových spekter podle reálných provozních podmínek.
8. Nasazením diagnostických prvků pro detekci poškození a provádění periodických kontrol a prohlídek odvozených z predikcí vzniku a rozvoje možných defektů v konstrukci.
9. Využitím aktivních prvků, které dokáží eliminovat nebo utlumit dynamické zatěžovací účinky.
10. Zohledněním degradačních procesů probíhajících v konstrukci z hlediska provozních podmínek a prostředí a jejich aktivní ovlivňování přístupem řízeného stárnutí konstrukce.

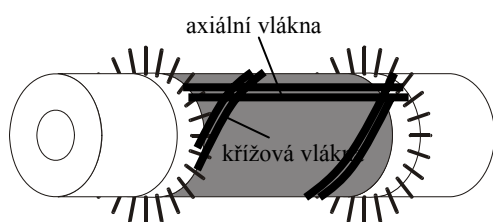
Jako vysoce efektivní lze potom označit využití většiny těchto faktorů současně a jejich propojení s technologiemi dotvářejícími pokročilé inteligentní konstrukce budoucnosti. Takovou konstrukci lze charakterizovat svojí schopností identifikovat, případně korigovat svoji geometrii a stav deformace. K tomu slouží jak klasické senzory deformací, tak pokročilé technologie v oblasti aplikace optických vláken (Braggovy nebo Fabry-Perotovy snímače), piezokeramické snímače (SMART Layer[®]) nebo snímače elektromagnetického pole (HELP Layer[®]). Předpokládá se vyšší využití materiálů s tvarovou pamětí se schopností zaujmout po fázové transformaci předem definovaný tvar. Použití těchto čidel integrovaných vně nebo i uvnitř struktury slouží jako identifikátor způsobu a míry poškození, jakéhosi „zdravotního“ stavu zařízení. Spojení těchto sensorických systémů s postupy vyhodnocování na bázi jak exaktních metod, tak neuronových a fuzzy algoritmů umožní vyhodnotit míru rizika selhání a rozhodnout o dalších opatřeních.

Po mechanické stránce potom od moderní konstrukce očekáváme, že bude vyrobena z moderních, vysoce kvalitních materiálů, které snášejí vysoká kmitavá namáhání a úsporou hmotností a vlastnostmi tak kompenzují svoji vyšší cenu. Její tvar bude za pomoci analytických i numerických postupů optimalizován tak, že úroveň napjatosti bude vyvážená, bez výrazných změn tuhosti nebo koncentrátorů napětí. Její statické i dynamické a únavové vlastnosti budou dostatečně experimentálně ověřeny. Možné extrémní provozní zatížení budou monitorovány a v aktuálním čase vyhodnoceny, což umožní predikovat průběh nárůstu poškozování kritických míst konstrukce.

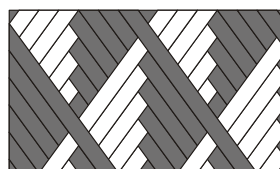
Právě vývoji těchto typů „vysokovýkonových“ konstrukcí jsou věnovány následující dva příspěvky. První pojednává o výpočtech a experimentálním ověřování tuhosti a pevnosti kompozitových dílů složených z navíjených vláknových struktur. Druhý příspěvek se zabývá návrhem a realizací systému pro monitorování zatížení malých letadel a sledování čerpání jejich únavového života v reálném provozu.

3 Příspěvek k metodám výpočtu a navrhování kompozitových dílů a jejich spojů

Řadu kompozitových dílů je výhodné vyrábět technologií navíjení vláken na trny. Užívá se uhlíkových, aramidových nebo skelných pramenců vláken prosycených v epoxidové pryskyřici. Po vytvrzení epoxidové matrice jsou trubky z trnů sejmuty. Speciální přídavné zařízení systému jehlic [1] dovoluje aplikovat rovněž axiální směr vláken, která obvykle tvoří hlavní nosné vrstvy výrobku, viz obr. 3.1. Navíjením vzniká struktura charakteristické mřížky křížících se pramenců vláken. Vliv struktury takto vytvořené periodické buňky (viz obr. 3.2) na napěťově deformační chování kompozitové trubky lze např. postihnout níže uvedeným analytickým modelem řešeném na makroúrovni stavby kompozitu. Jiná řešení s využitím MKP nebo FFT na mezo- resp. mikroúrovni uvádí např. [3].



Obr 3.1



Obr. 3.2

Ploušťka vrstvy, která vznikne při navíjení vláken pod úhlem φ na trn s průměrem D_{in} je dána vztahem

$$t = \left(\sqrt{\frac{4 S_f}{\pi V_f \cos \varphi} - D_{in}^2} + D_{in} \right) \cdot \frac{1}{2}, \quad (3.1)$$

kde S_f je plocha pramence v příčném řezu a V_f je objemový podíl vláken.

3.1 Vliv struktury navíjení na tuhost kompozitových trubek

Výpočtově i experimentálně byl analyzován vliv struktury navíjení na axiální tuhost trubek tvořených dvěma nebo více symetrickými vrstvami. Vztah mezi vektorem poměrných deformací střednicové roviny $\boldsymbol{\varepsilon}^0$ a jednotkových sil \mathbf{N} popisuje matice axiální tuhosti \mathbf{A} . Za předpokladu splnění podmínek klasické laminační teorie (KLT) platí

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix}. \quad (3.2)$$

Technický modul pružnosti v podélné ose trubky a Poissonovo číslo lze potom vyjádřit vztahy

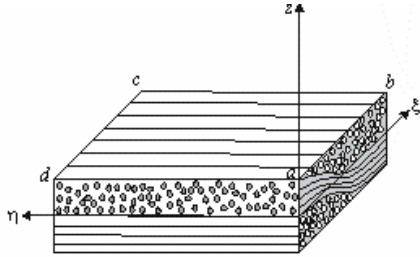
$$E_x = \frac{N_x}{t \varepsilon_x^0} = \frac{A_{11} A_{22} A_{66} + 2 A_{12} A_{16} A_{26} - A_{11} A_{26}^2 - A_{22} A_{16}^2 - A_{66} A_{12}^2}{t(A_{66} A_{22} - A_{26}^2)}, \quad (3.3)$$

$$\nu_{xy} = -\frac{\varepsilon_y^0}{\varepsilon_x^0} = \frac{A_{12} A_{66} - A_{16} A_{26}}{A_{22} A_{66} - A_{26}^2}, \quad (3.4)$$

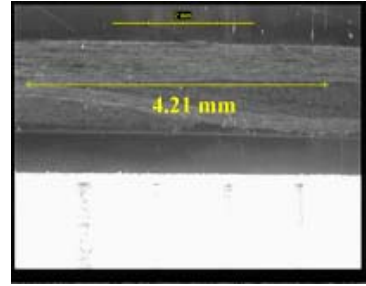
$$G_{xy} = \frac{N_{xy}}{t\gamma_{xy}^0} = \frac{A_{11}A_{22}A_{66} + 2A_{12}A_{16}A_{26} - A_{11}A_{26}^2 - A_{22}A_{16}^2 - A_{66}A_{12}^2}{t(A_{11}A_{22} - A_{12}^2)}. \quad (3.5)$$

Pro symetrické oblasti s úhlem $(+\varphi/-\varphi)$ jsou členy $A_{16}=A_{26}=0$. V oblasti křížení pramenců (šířky b , s počtem křížení N_u), viz obr. 3.3 resp. 3.4, jsou parametry tuhosti korigovány v poměru podílu plochy průřezu, kde dochází ke křížení, ku celkové ploše příčného průřezu jednotkové buňky

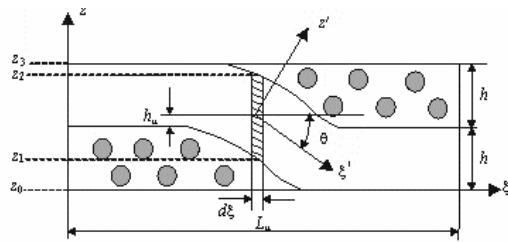
$$R_u = \frac{A_u}{A_p}, \quad A_u = N_u \left(L_u b - \frac{L_u}{2} \frac{L_u}{2} \sin(2\varphi) \right). \quad (3.6)$$



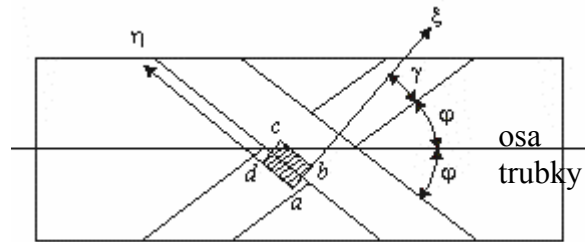
Obr 3.3



Obr. 3.4



Obr 3.5



Obr. 3.6

Výsledné matice tuhosti A_{ij}^{und} ve směru osy ξ pro dílčí oblast křížení $abcd$ lze získat ze vztahu (viz obr 3.5 a 3.6)

$$\bar{A}_{ij}^{und} = \frac{2}{L_u} \int_0^{\frac{L_u}{2}} A_{ij}^{und} d\xi, \quad (3.7)$$

kde dílčí tuhosti v jednotlivých vrstvách prvku lze vyjádřit součtem

$$A_{ij}^{und} = \bar{Q}_{ij}^{90} (z_1 - z_0) + \bar{Q}_{ij}^{und} (z_2 - z_1) + \bar{Q}_{ij}^{90} (z_3 - z_2) \quad (i, j = 1, 2, 6). \quad (3.8)$$

Mimoosové tuhosti jsou dány KLT, v oblasti překřížení potom vztahem

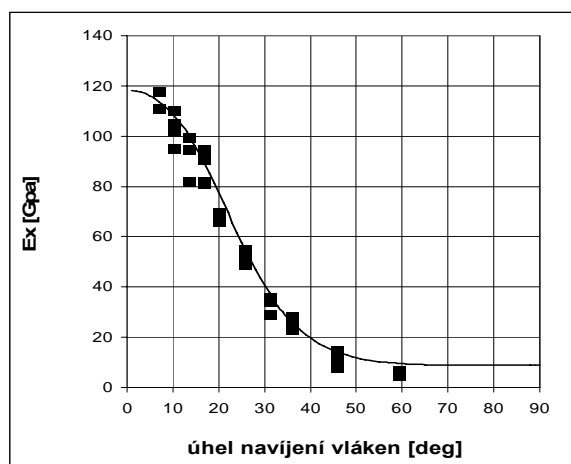
$$\bar{Q}_{ij}^{und} = Q_{ij}^{und} - \frac{Q_{i3}^{und} Q_{3j}^{und}}{Q_{33}^{und}} \quad (i, j = 1, 2, 6), \quad (3.9)$$

který je třeba ještě transformovat maticemi souřadnic geometrických úhlů γ a θ .

Výsledný technický modul pružnosti se zohledněním křížení vrstev je vyjádřen rovnicí, která zahrnuje oblast křížení i oblast přímého směru pramenců vláken

$$E_x = R_u E_x^{und} + (1 - R_u) E_x^{lam}. \quad (3.10)$$

Porovnání výsledků výpočtů s experimenty ukazují obr. 3.7 a obr. 3.8. Zde jsou uvedeny výsledky tahových zkoušek trubek s vnitřním průměrem 26 mm navíjených z uhlíkových vláken T700 24K, resp. T700 12K a vyztužených epoxidovou matricí P418 [5]. Je zřejmé, že experimentální výsledky vykazují větší rozptyl způsobený technologickými vlivy (např. změnou předpětí vlákna při navíjení, proměnným objemovým podílem složek aj.). Výpočet tuhosti však výstižně aproximuje její závislost na úhlu navíjení.



Obr 3.7



Obr. 3.8

3.2 Popis nelineárního deformačního chování kompozitových trubek

Při zkouškách trubek s větším úhlem vinutí byl pozorován nelineární nárůst jejich deformace se zatížením, což konstitutivní vztah (3.2) nepostihuje. Pro popis byla modifikována metoda [4], [6] založená na vyjádření deformací pomocí derivace hustoty komplementární energie podle vztahu

$$\varepsilon_{ij} = \frac{\partial W^*}{\partial \sigma_{ij}}, \quad (3.11)$$

kde pro rovinný stav napjatosti po zjednodušení zůstává pouze jeden člen čtvrtého řádu

$$W^* = \frac{1}{2} S_{11} \sigma_1^2 + \frac{1}{2} S_{22} \sigma_2^2 + S_{12} \sigma_1 \sigma_2 + \frac{1}{2} S_{66} \sigma_6^2 + \frac{1}{4} S_{6666} \sigma_6^4. \quad (3.12)$$

Nelineární konstitutivní vztah pro danou vrstvu lze potom vyjádřit jako

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} + S_{6666} \tau_{12}^2 \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix}. \quad (3.13)$$

Výpočet vektoru složek deformací (při působení tahových jednotkových sil N nebo momentů M) je určován přírůstkově s využitím KLT rozšířené o výše uvedený nelineární člen

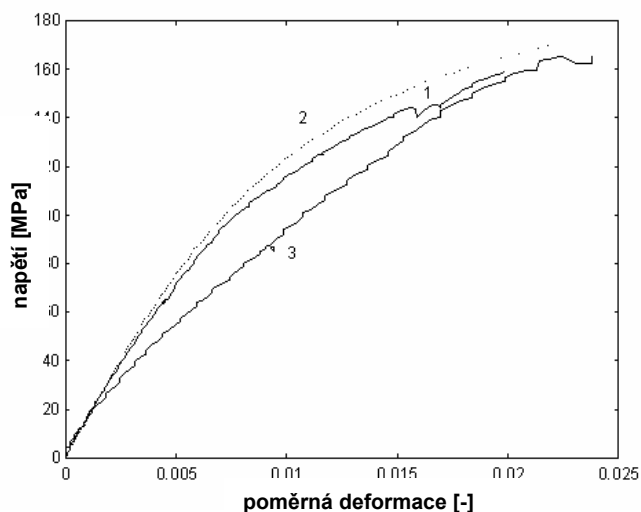
$$\begin{Bmatrix} \Delta \varepsilon \\ \Delta \kappa \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}' & \mathbf{B}' \\ \mathbf{C}' & \mathbf{D}' \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \mathbf{N} \\ \Delta \mathbf{M} \end{Bmatrix}. \quad (3.14)$$

Výpočtová simulace tahové zkoušky symetricky navíjené trubky znamená, že $\Delta \kappa = 0$, $\Delta N_y = \Delta N_{xy} = 0$ a v l -tém kroku tak spočteme přírůstky a celkové hodnoty globálních napětí a deformací z rovnic

$$\begin{Bmatrix} \Delta \varepsilon_x \\ \Delta \varepsilon_y \\ \Delta \gamma_{xy} \end{Bmatrix}^{(l)} = [K]^{(l)} \begin{Bmatrix} \Delta N_x \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}^{(l)}, \quad (3.15)$$

$$\begin{aligned} (\sigma_x)^{(l)} &= (\sigma_x)^{(l-1)} + \Delta N_x^{(l)} / t \\ (\varepsilon_x)^{(l)} &= (\varepsilon_x)^{(l-1)} + (\Delta \varepsilon_x)^{(l)}. \end{aligned} \quad (3.16)$$

Příklad výsledků výpočtu napětově deformační odezvy pro trubku s úhlem vinutí 46° v porovnání s experimenty ukazuje obr. 3.8. Je zřejmé, že výpočtový model (křivka 2) je dostatečně výstižný pro trubky bez křížení vrstev (křivka 1), oproti tomu trubky s křížovou vazbou (křivka 3) vykazují poněkud nižší tuhost ve shodě s dříve uvedeným modelem.



Obr. 3.8



Obr. 3.9

Pro účely výpočtu napětí, deformací a hodnocení pevnosti navíjených kompozitových struktur bylo vytvořeno několik analytických 2D a pseudo 3D analytických postupů a výpočtových programů. Lze jimi řešit napjatost a deformace kruhových, ale i nekruhových, a to jak tenkostěnných tak tlustostěnných profilů, viz [7], [8], [9]. Pomocí nich lze provádět rychlé konstrukční návrhy a operativní úpravy skládání vrstev s různým úhlem vinutí (pseudo-optimalizaci). Tyto postupy se ukazují velmi efektivní ve srovnání s mnohem pracnější a nákladnější detailní analýzou pomocí MKP, která je vhodná pro detailní rozbor struktury v konečném návrhu. Byla provedena řada zkoušek pro jejich experimentální ověření (obr. 3.9.), [10], [11]. Propojení těchto algoritmů s klasickou metodou přenosových matic umožňuje řešit prutové prvky s různými okrajovými podmínkami a konfigurací zatížení a s využitím velkého počtu krátkých délkových prvků i profily s proměnným průřezem, např. kónické atp. Příklad aplikace metody bude popsán podle obr. 3.10.

Vektorem $\{v\}_i$ jsou definovány deformace a vnitřní silové účinky v obecném místě nosníku

$$\{v\}_i = \begin{Bmatrix} y \\ y' \\ M \\ Q \\ \phi \\ T \end{Bmatrix}_i \quad (3.17)$$

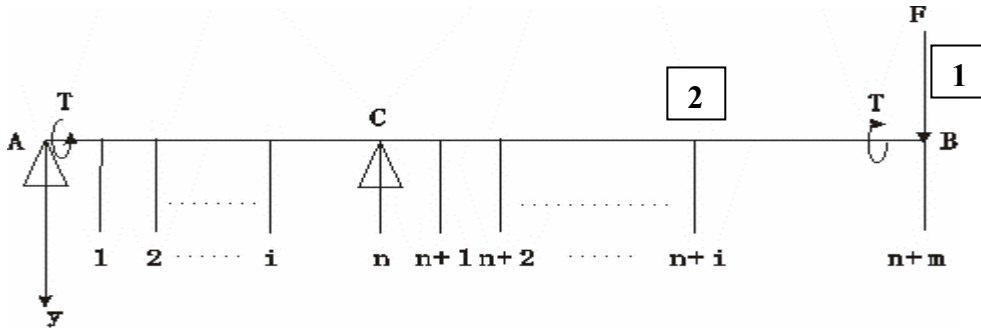
Pro počet prvků n resp. m v prvním AC resp. druhém CB úseku nosníku lze vyjádřit vektor účinků ve sledovaném bodě B pomocí řetězce přenosových matic

$$\{v\}_B = [c]_{AB} \{v\}_A + [c]_{CB} \{v\}_C, \quad (3.18)$$

$$[c]_{AB} = [c]_{0,1} [c]_{1,2} \cdots [c]_{n-1,n} [c]_{n,n+1} \cdots [c]_{n+m-1,n+m}, \quad (3.19)$$

$$[c]_{CB} = [c]_{n,n+1} [c]_{n+1,n+2} \cdots [c]_{n+m-1,n+m}, \quad (3.20)$$

$$[c]_{i-1,i} = \begin{bmatrix} 1 & l_i & -\frac{l_i^2}{2E_i I_i} & -\frac{l_i^3}{6E_i I_i} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -\frac{l_i}{E_i I_i} & -\frac{l_i^2}{2E_i I_i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \frac{l_i}{G_i J_i} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{i-1,i} \quad (3.21)$$

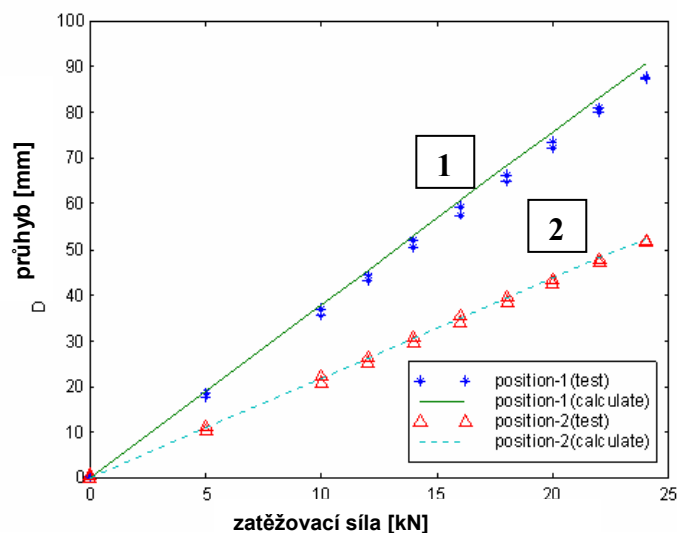


Obr. 3.10

Ze známých silový účinků v bodě B lze dopočítat reakce v uložení a dále hledané deformace v bodě B. Poté se pro odvozenou globální matici tuhosti profilu [7],

$$\{\delta\}_{xy} = [K]_{xy}^{-1} \{F\} \quad (3.22)$$

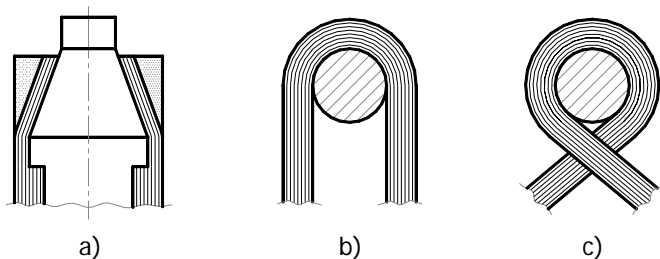
určí deformace střední roviny a posléze i deformace a napětí v jednotlivých vrstvách laminátu. Příklad porovnání výpočtu a experimentálního měření průhybu v bodech 1 a 2 je vykreslen na obr. 3.11 a vypovídá o shodě s realitou.



Obr. 3.11

3.3 Vývoj nových typů kompozitových spojů

Technologie axiálního navíjení umožňuje dále vytváření integrovaných ok, která lze využít jako spojovacích prvků. V současné době je řešen projekt GA ČR, v rámci něhož jsou prováděny návrhy, výpočty a experimentální zkoušky různých typů lepených, ovíjených a kolíkových spojů, viz [12], zobrazených na obr. 3.12 a 3.13.



Obr. 3.12



Obr. 3.13

Další možností této technologie navíjení nebo laminace kompozitových struktur je aplikace prvků typických pro pokročilé inteligentní konstrukce. Jednak je to možnost integrace pasivních čidel, které jsou schopna měřit teplotu, lokální deformaci nebo signalizovat porušení struktury. Zde se užívají integrované termočlánky, odporové snímače v poslední době i optická vlákna s Braggovými senzory. Do struktury lze v budoucnu integrovat polovodičové křemíkové prvky využívané zejména jako tlumiče vibrací.

Operativní pevnostní návrhy navíjených kompozitových struktur našly ohlas při konkrétních aplikacích v průmyslu [10], [11], [12]. Některé realizace demonstrují obr. 3.14, 3.15.



Obr. 3.14



Obr. 3.15

4 Příspěvek ke zvýšení spolehlivosti monitorováním skutečného provozu a predikce okamžitého stavu únavového poškození malých letadel

Jedním z nejdůležitějších předpokladů využívání a hodnocení konstrukce podle jejího reálného stavu je znalost provozních podmínek a stupeň degradace (poškození) kritických míst. Cílem projektu, který je prezentován v této kapitole, bylo vytvořit metodiku, konkrétní algoritmy a dále realizovat off-line systém pro individuální sledování provozních zatížení (vyhodnocování letových spekter) a pro on-line monitorování, jak jsou čerpány únavové životy letadel sledované flotily v provozu, [13], [14]. Zvolená strategie přístupu a metodika výpočtového odhadu zbytkové životnosti je do značné míry závislá na věrohodnosti a přesnosti vstupních veličin. Aby bylo možno formulovat obecnější metodiku řešení, byly definovány tři úrovně „jakosti“ vstupních dat a tím i „validity“ získaných výsledků. Tyto kategorie jsou označeny *A*, *B* a *C*. Postup kategorie *A* předpokládá splnění specifikovaných požadavků a postupů v plné šíři, jak to odpovídá schématu ve formě vývojového diagramu podle obr. 4.1.

4.1 Vstupní podklady

Základní informací jsou *velikosti provozních zatížení*, resp. konkrétní hodnoty časově proměnných napětí v posuzovaných místech konstrukce. Nejvěrnější údaje je možno získat monitorováním pomocí snímačů deformace, např. tenzometricky. Globálnější pohled umožňuje sledování násobků gravitačních zrychlení v těžišti letounu, případně v jiných potřebných místech (ocasní plochy) [15], [16]. V takovém případě je však potřebné provést kalibrační tenzometrická měření pro stanovení korelačních závislostí (pokud jsou prokázány) mezi násobky v těžišti letounu a v konkrétních monitorovaných místech.

Další vstupní informací je *popis únavových vlastností kritického místa konstrukce*. Nejhodnotnějším podkladem pro navržený algoritmus výpočtu jsou výsledky únavových zkoušek získaných na samotném konstrukčním elementu nebo konstrukčním uzlu. I přes ekonomickou náročnost zkoušek je jejich provedení nutné nejméně v rozsahu nezbytném pro certifikaci dle daných předpisů. Pro ultralehká letadla, která únavové certifikaci nepodléhají, lze předpokládat, že podklady podobného charakteru budou ojedinělé. Data lze v takovém případě získat kvalifikovaným přepočtem výsledků zrealizovaných únavových zkoušek konstrukce podobného typu [18], [23]. Byly vytvořeny databáze a katalogy S-N křivek dílů leteckých konstrukcí [19]. V neposlední řadě je třeba znát únavové křivky napětí a únavové křivky deformace použitých materiálů. Vhodné jsou i S-N křivky na vzorcích bez vrubu případně s typickou vrubovitostí, která by charakterizovala kritické místo konstrukce. Tyto podklady umožní rovněž získat informace o možném rozptylu životnosti, který je třeba znát

při odhadech bezpečných životů s nízkou pravděpodobností vzniku poruchy.

Třetí kvalitativní úrovní vstupních parametrů jsou *informace o distribuci napětí v konstrukci* tak, aby mohla být identifikována kritická místa. V nich je třeba vyšetřit konkrétní velikosti špiček napětí a to často při kombinovaných typech zatěžování, které na konstrukci za provozu působí. I zde jsou cenná každá experimentální provozní nebo laboratorní měření [20]. Často jsou nezbytné jako podklad pro verifikaci globálních numerických modelů pro výpočty napětí a deformací metodou konečných prvků (MKP), [21]. Modely MKP umožní určit hladiny napětí při různých dílčích i kombinovaných zatěžovacích stavech a vypočítat rozkmity napětí, které poškozují konstrukci únavovou degradací materiálu. Splnění cíle spolehlivé předpovědi a čerpání únavového poškození (podle kategorie *A*) tak bude možné pouze při vzájemné součinnosti získávání a využití všech výše popsaných vstupních informací.

4.2 Popis jednotlivých kroků algoritmu

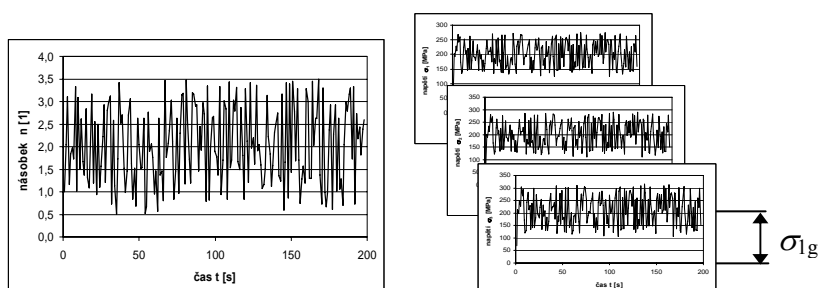
Projekt sledování životnosti je založen na měření zatížení (a řady dalších parametrů) v reálném čase za letu letounu a na jeho okamžitém zpracování, včetně sumace únavových poškození po každém uskutečněném přistání letounu [20], [24]. Zatímco za letu je letoun pro vzdáleného operátora off-line, po přistání a zpracování signálu z letu je možno monitorovat stav flotily letadel a jejich zbytkový život on-line pomocí telefonních sítí (GSM).

Během každého letu jsou do vektoru \mathbf{n} (n_1, n_2, \dots, n_t) ukládány navzorkované hodnoty násobků gravitačního zrychlení v těžišti letounu, kam je přístroj v letadle instalován. Předpokládaná maximální délka snímaného času s dostatečnou rezervou je 10 hodin záznamu. Vzorkovací frekvence byla na základě předchozích měření zvolena 20 Hz. Tento záznam je zpracováván následujícím algoritmem:

- **Přepočítání násobků na napětí ve sledovaných místech**

Sekvence hodnot \mathbf{n} se přepočítává podle zadaných sloupcových vektorů korelačních závislostí \mathbf{a} a \mathbf{b} na matici sekvencí hodnot napětí v i -tém kritickém místě $\mathbf{Y} = \{Y_{j,i}\}_i$.

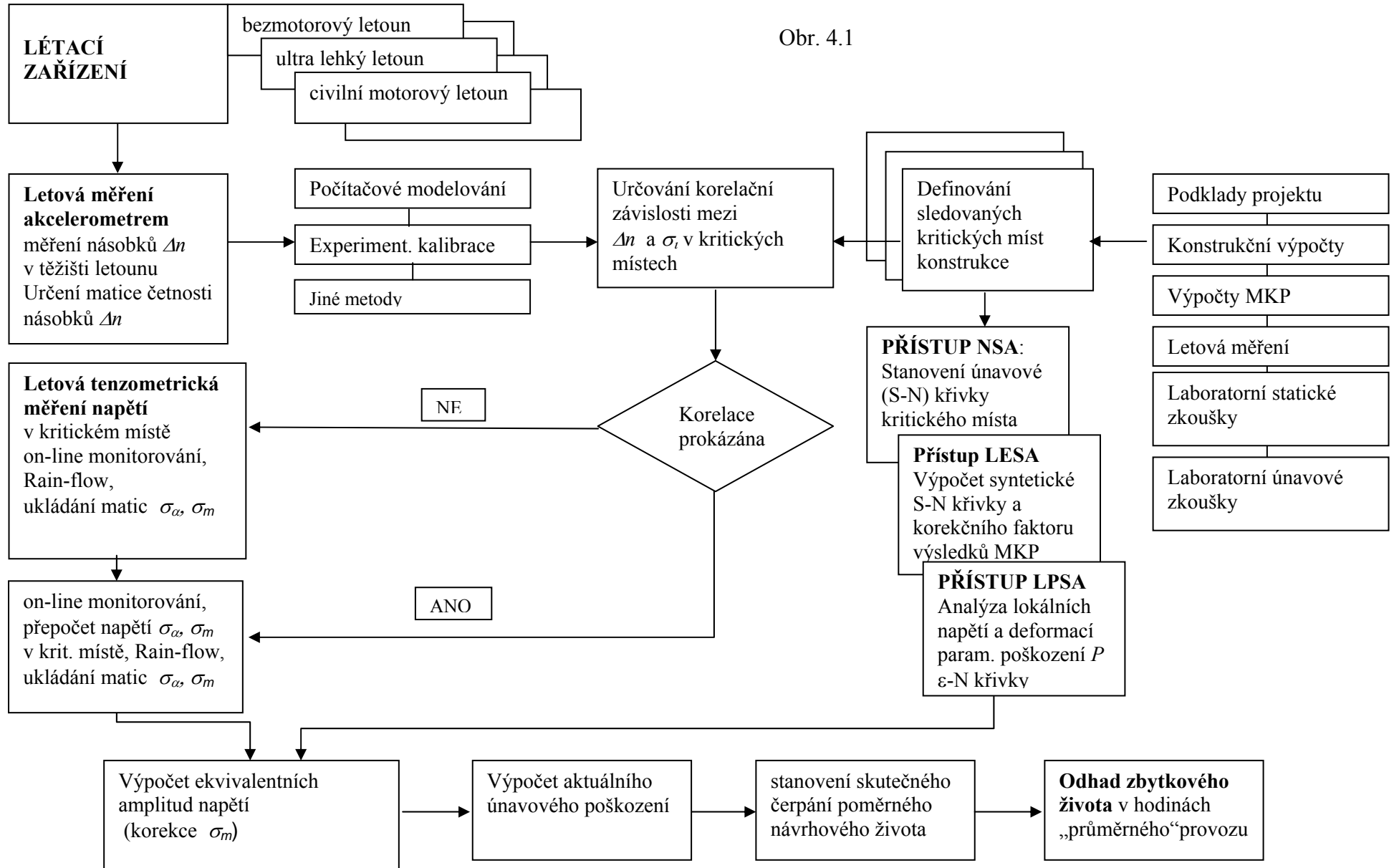
$$\{Y_{j,i}\} = a_i \cdot (n_j - 1) + b_i, \quad j = 1 \dots t, \quad i = 1 \dots r. \quad (4.1)$$



Obr 4.2 Schéma konstrukce matice napětí kritických míst

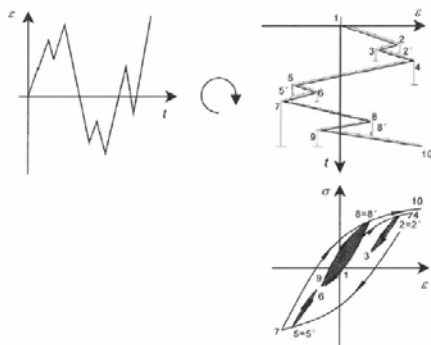
Schématicky je tento postup naznačen na obr 4.2. Hodnota napětí označená na obr. 4.2 jako σ_{1g} , která představuje „statické“ předpětí od zatížení násobku $n=1$. Zároveň se ukládá do proměnné t [hod] doba trvání jednoho letu a do součtové proměnné T [hod] celková doba sledování života konstrukce.

Obr. 4.1

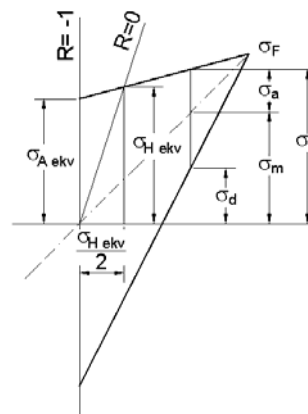


- **Aplikace metody stékání deště na časovou sekvenci napětí ve sledovaných místech**

Časová sekvence jednotlivých řádků matice napětí ve sledovaných kritických místech konstrukce je v tomto kroku podrobena analýze metodou stékání deště, viz obr. 4.3. Zpracování obsahuje následující operace, které jsou součástí podprogramu *Rain IT*, který byl popsán a jeho zdrojový kód publikován ve zprávě [25]. Algoritmus provádí odfiltrování malých kmitů, jejichž hodnota rozkmitu napětí nepřekročí hodnotu zadanou ve vstupním vektoru f ($f_1, f_2, \dots, f_i, \dots, f_r$). Tímto postupem je zaručeno, že se odfiltrují nežádoucí (ale nepoškozující) kmity. Doporučená hodnota filtru je cca 5 MPa. Výstupní soubor tvoří trojsloupcová matice horních, dolních hodnot pro $p=1 \dots s_i$ uzavřených hysterezních smyček pro každé sledované kritické místo.



Obr. 4.3.



Obr. 4.4

- **Provedení korekce středních hodnot napětí hysterezních smyček**

Protože únavové vlastnosti většiny materiálů jsou negativně ovlivněny kladnou hodnotou středního napětí kmitu [22], je třeba korigovat tento vliv přepočtem na ekvivalentní míjivý kmit $\sigma^{H,eq}$ (sym. střídavý kmit $\sigma^{A,eq}$), viz obr. 4.4. Byly navrženy dva způsoby korekce středního napětí - lineární a nelineární, a to podle vztahů

$$\sigma^{A,eq} = \frac{\sigma^A}{1 - \left(\frac{\sigma^M}{\sigma^F} \right)}, \quad (4.2)$$

$$\sigma^{H,eq} = \sigma^H (1 - R)^m, \quad (4.3)$$

kde exponent m je přečten ze vstupního vektoru \mathbf{m} ($m_1, m_2, \dots, m_i, \dots, m_r$) pro sledovaná kritická místa $i=1 \dots r$ a součinitel asymetrie kmitu R je počítán pro poměr dolního a horního napětí každé hysterezní smyčky podle vztahu $R = \frac{\sigma^D}{\sigma^H}$. To vše se provede pro hodnocená kritická

místa $i=1 \dots r$. Protože z původní třísloupcové matice $\{\sigma_p^H, \sigma_p^D, 1\}_{p=1 \dots s}$ se vypočte sloupcový vektor $\sigma_p^{A,eq}$, lze z těchto vektorů pro všechna kritická místa $i=1 \dots r$ vytvořit matici $\sigma^{eq} = \{\sigma_{p,i}^{eq}\} = \left\{ \left\{ \sigma_{p=1 \dots s_{\max}}^{A,eq} \right\}_{i=1 \dots r} \right\}$. Počet sloupců matice je dán maximálním počtem smyček, které se vyskytnou v daném letu v kterémkoli hodnoceném místě. Sloupcový index tedy bude dán hodnotou $s_{\max} = \max_{i=1 \dots r} (s_i)$. Neobsazená pole matice jsou potom doplněny nulami.

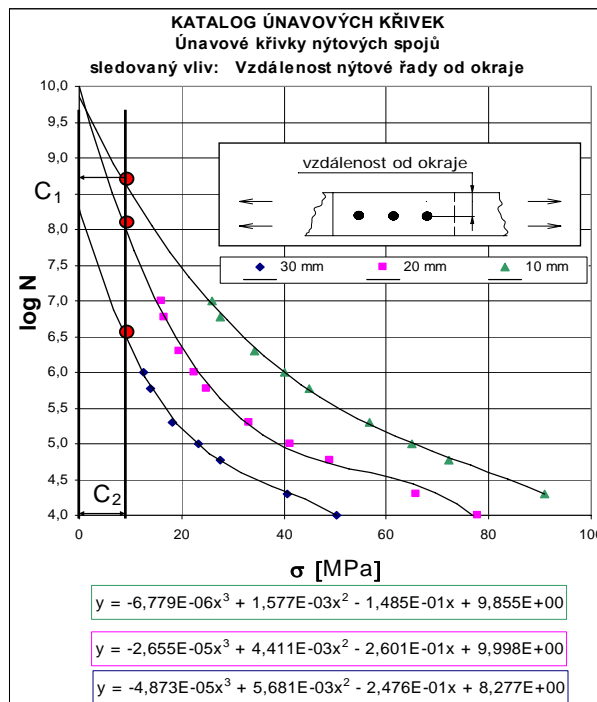
- **Popis únavových S-N křivek hodnocených kritických míst**

Klíčovým úkolem pro zadání vstupních hodnot je kromě správného výběru „skutečných“ kritických míst co „nejvěrnější“ odhad únavových křivek pro tato místa. Křivky jsou projektantem určeny na základě provedených únavových zkoušek, nebo jsou voleny z katalogů únavových křivek na základě zkušeností získaných z podobných konstrukcí. Protože zadání křivek může být provedeno velmi rozmanitým způsobem, je třeba vytvořit několik možných vstupů, které by pokrývaly nejčastěji se vyskytující případy tvarů a aproximací křivek. V projektu bylo navrženo pět tříd způsobů zadání křivek, které jsou indikovány podle hodnot složek vektoru $l(l_1, l_2, \dots, l_i, \dots, l_r)$ pro $i=1..r$ kritických míst, (platí $l_i = 1$ pro logaritmicko-lineární polynomický model, $l_i = 2$ pro bilogaritmický polynomický model, $l_i = 3$ pro bilineární logaritmický model, $l_i = 4$ pro bilineární bilogaritmický model a $l_i = 5$ pro jiný individuálně programovaný model). Např. logaritmicko-lineární polynomický model aproximuje únavovou křivku rovnicí

$$\log N = A_0 + A_1 \cdot (\sigma^{eq}) + A_2 \cdot (\sigma^{eq})^2 + A_3 \cdot (\sigma^{eq})^3 + A_4 (\sigma^{eq})^4 + A_5 (\sigma^{eq})^5 . \quad (4.4)$$

Matice koeficientů polynomů $A[6, r] = \{A_{j,i}\}$ má 6 sloupců (je uvažován polynom maximálně 5-tého stupně) a počet řádek r , který je dán počtem kritických míst. Pokud bude aproximaci vyhovovat stupeň polynomu nižší hodnoty než 5, jsou koeficienty vyšších řádů nulové.

Protože polynomická aproximace funkce za hranicemi „platnosti“ aproximace může dávat značně odchylné hodnoty od původní funkce, jsou aproximační modely omezeny bodem „smluvní“ meze únavy. Ty jsou pro $i=1..r$ kritických míst uloženy v matici vstupních hodnot $C[2, r] = \{C_{1,i}, C_{2,i}\}$. Pokud hodnota σ^{eq} bude nižší, než zadaná hodnota meze únavy v konstantě C_2 daného i -tého kritického místa, bude programován počet kmitů $N \rightarrow \infty$, který vede k nulovému poškození. Případ osvětluje obrázek obr. 4.5, zároveň demonstuje katalogizované S-N křivky.



Obr. 4.5

- **Výpočet přípustného únavového poškození v kritických místech**

Mezní hodnotou pro vznik lomu (nebo iniciace trhliny) v kritickém místě je dosažení kritické hodnoty *únavového poškození*. Tuto hodnotu lze zvolit na základě únavových zkoušek konstrukce při znárodněném průběhu zatížení. Lineární Palmgrenova-Minerova hypotéza kumulace poškození, která je ve výpočtu uvažována $d = \sum \frac{n_i}{N_i^f}$, předpokládá hodnotu kritického poškození rovnou jedné. Hodnoty kritického poškození jsou zadávány do vektoru $\mathbf{d}^{crit} = (d_1^{crit}, d_2^{crit}, \dots, d_r^{crit})$, který je součástí souboru vstupních hodnot. Protože tzv. bezpečný život konstrukce předpokládá jen krajně malou pravděpodobnost vzniku únavové poruchy, je hodnota kritického poškození snížena na svoji limitní přípustnou hodnotu. Hodnoty složek tohoto limitního únavového poškození $\mathbf{d}^{lim} = (d_1^{lim}, d_2^{lim}, \dots, d_r^{lim})$ se získají vydělením hodnot kritického poškození hodnotami součinitelů spolehlivosti (bezpečnosti) $\mathbf{k}(k_1, k_2, \dots, k_i, \dots, k_r)$. I tento vektor je součástí souboru vstupních hodnot programu. Pro velikost složek přípustného únavového poškození v každém kritickém místě tak platí $d_i^{lim} = \frac{d_i^{crit}}{k_i}$.

- **Výpočet únavového poškození v kritických místech za každý let**

Pro každou hodnotu ekvivalentních napětí v matici $\sigma^{eq} = \{\sigma_{p,i}^{eq}\}$ je určen z rovnice S-N křivky kritického místa mezní počet kmitů. Obdržíme matici mezních počtů kmitů $\mathbf{N}^f = \{N_{p,i}^f\} = \left\{ \left\{ N_{p,i}^f \right\}_{p=1 \dots s \max} \right\}_{i=1 \dots r}$. Protože jsou poškození určována sekvenčně pro každou uzavřenou hysterezní smyčku, stačí do matice poškození $\Delta \mathbf{D} = \{\Delta D_{p,i}\} = \left\{ \left\{ \Delta D_{p,i} \right\}_{p=1 \dots s \max} \right\}_{i=1 \dots r}$ ukládat převrácené hodnoty prvků matice \mathbf{N}^f . Proto lze ve vlastním algoritmu výpočtu oba kroky sloučit a do matice ukládat již výsledné poškození.

Hodnota výsledného součtu poškození za jeden let v daném kritickém místě bude dána součtem dílčích poškození, tedy součtem prvků na odpovídajícím řádku matice $\Delta \mathbf{D}$. Dostáváme tak sloupcový vektor poškození $\mathbf{d}^{1let}(d_1, d_2, \dots, d_i, \dots, d_r)$ za jeden let pro každé kritické místo $i=1 \dots r$. Platí tedy

$$\mathbf{d}^{1let}(d_1, d_2, \dots, d_i, \dots, d_r) = \left\{ \sum_{p=1}^{s \max} \Delta D_{p,i} \right\}_{i=1 \dots r} \quad (4.5)$$

Uvedený popis zahrnuje pouze kmity získané za letu. Proto je třeba do celkového únavového poškození celé fáze letu zahrnout poškozující účinek od pojezdu a přistání. Hodnoty těchto poškození lze opět registrovat monitorovacím zařízením, nebo je paušálně připočítávat na základě měření a výpočtů ve fázi přípravy dat. Součet poškození se potom za každý let bude přičítat do sumárního vektoru poškození \mathbf{d}^T , který odpovídá poškození za celou dobu sledování provozu T .

$$\mathbf{d}^{T+1}(d_1, d_2, \dots, d_i, \dots, d_r) = \mathbf{d}^T + \mathbf{d}^{1let} + \mathbf{d}^{1poj} \quad (4.6)$$

Obdržíme tak novou hodnotu vektoru sumárního poškození \mathbf{d}^{T+1} , která popisuje aktuální stav poškození v každém v i -tém kritickém místě.

- **Výpočet relativního čerpání únavového života letounu**

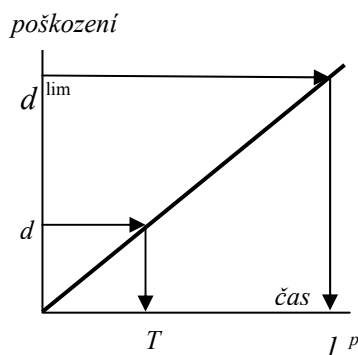
Jedním z hlavních výstupů monitorovacího přístroje je zobrazovat v kabině pilota aktuální stav čerpání únavového života resp. jeho zbytkové doby únavového života a tento údaj rovněž hlásit operátorovi. Relativní čerpání života \mathbf{l}^c v procentech v každém kritickém místě získáme podílem vektorů sumárního poškození \mathbf{d}^T za dobu sledování provozu T ku vektoru limitních přípustných poškození \mathbf{d}^{lim} v kritických místech. Složky vektoru \mathbf{l}^c určíme tedy podle vztahu

$$l_i^c [\%] = \frac{d_i^T}{d_i^{lim}} \cdot 100. \quad (4.7)$$

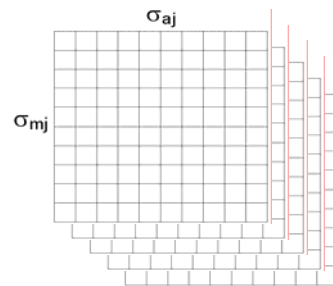
Z vektoru hodnot \mathbf{l}^c je třeba vybrat jeho maximální hodnotu ze sledovaných r kritických míst $l_{max}^c = \max_{i=1..r} [l_i^c]$, která bude zobrazena na displeji přístroje v kabině pilota.

- **Predikce bezpečného zbytkového únavového života letounu**

Spočtená hodnota sumárního poškození za celkovou dobu sledování provozu T , která je po každém letu doplňována, umožňuje provádět predikci bezpečného únavového života. Ten je limitován dosažením přípustného poškození podle rovnice v každém kritickém místě. Extrapolaci (predikci) pro tuto hodnotu ukazuje obr. 4.6. Složky vektoru predikovaného života tak vypočteme ze vztahu $l_i^p = \frac{T}{d_i^T} \cdot d_i^{lim}$



Obr. 4.6



Obr. 4.7

Pro praxi je významnější znát hodnotu tzv. zbytkového života konstrukce. Ten je určen výběrem minima, tj kritického místa s nejnižším reziduálním životem $l_{min}^r = \min_{i=1..r} [l_i^p - T]$.

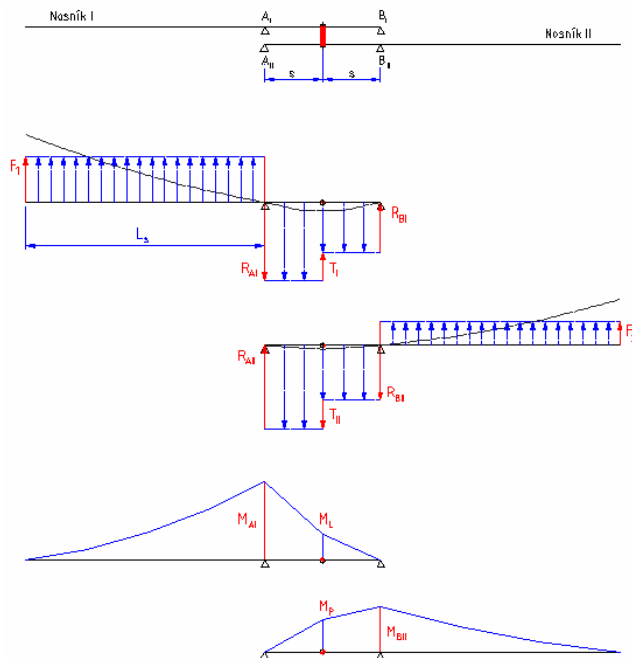
- **Ukládání dvouparametrických matic četností amplitud a středních hodnot napětí**

K účelům možných pozdějších kontrol i k porovnávání provozu různých letounů slouží sledování kumulativních četností (spekter), které poskytuje zpracování průběhů napětí v kritických místech metodou stékání deště. Za tímto účelem byly vytvořeny čtvercové matice řádu $[j_i \times j_i]$, do kterých jsou ukládány četnosti výskytu amplitud a středních hodnot jednotlivých hysterezních smyček v i -tém kritickém místě. Pro porovnávání spekter by bylo vhodné, aby intervaly rozkmitů napětí byly pro různé letouny shodné, např. dostačující přesnost bude již $\Delta\sigma_i = 2,5$ MPa. Ve vztahu k maximální hodnotě možného napětí za provozu je volen řád matice j_i . Dostáváme tak soubor matic četností (Rain-flow matic z metody stékání deště) $\{\mathbf{S}^{RF} [j_i, j_i]\}_i = \{\{\mathbf{S}_{m,m}^{RF}\}\}_i$ pro každé kritické místo $i=1..r$, rozdělených do j_i tříd ($m=1..j_i$), podle schématu obr. 4.7.

4.3 Realizace monitorování provozních zatížení na ultralehkých letadlech

V období vývoje zařízení bylo monitorováno zatížení dvou typů ultralehkých letadel (P-92 ECHO a P-96 STAR). Získaná dvouparametrická a následně jednoparametrická spektra byla využita pro srovnávání podmínek provozu této třídy letounů, která dosud nebyla systematicky sledována, a k získání zkušeností pro vývoj měřiče životnosti. Pro ověření korelace násobků gravitačního zrychlení v těžišti letounu s hodnotami namáhání hlavních dílů křídla letounu byly instalovány na hlavní nosník systémy odporových tenzometrů. Na základě měření byly určeny ohybové momenty M a posouvající síly T v systému propojení nosníků křídla letounu P-96 STAR (viz obr. 4.8 a vztahy (4.8)), které sloužily rovněž k verifikaci MKP modelů. Před vlastním letovým měřením byly prováděny kalibrace „vážením“ letounu, viz. obr. 4.9. Příklad měřeného a vyhodnocovaného signálu a pohled na realizovaný měřič životnosti firmou TL Elektronik s.r.o. jsou ukázány na obr. 4.10 a 4.11.

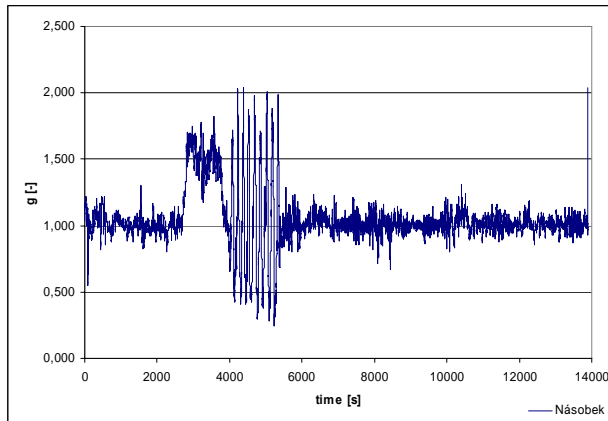
$$\begin{aligned}
 F_I - R_{AI} + T_I + R_{BI} &= 0, & F_{II} + R_{AII} - T_{II} - R_{BII} &= 0, & T_I &= T_{II} \\
 M_{AI} = F_I \cdot L_s = R_{BI} \cdot 2 \cdot s + T_I \cdot s &, & M_{BII} = F_{II} \cdot L_s = -R_{AII} \cdot 2 \cdot s + T_{II} \cdot s &, \\
 EJy_I &= \left(\frac{M_{AI} - M_L \cdot s}{2} \cdot s \right) \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{s}{2} + (M_L \cdot s) \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{s}{2} + \left(\frac{M_L \cdot s}{2} \right) \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{s}{2}, \\
 EJy_{II} &= \left(\frac{M_{BII} - M_P \cdot s}{2} \cdot s \right) \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{s}{2} + (M_P \cdot s) \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{s}{2} + \left(\frac{M_P \cdot s}{2} \right) \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{s}{2}, \\
 y_I &= y_{II} \quad . \quad (4.8)
 \end{aligned}$$



Obr. 4.8



Obr. 4.9



Obr. 4.10



Obr. 4.11

5 Závěr

Zkušenosti lidstva potvrzují, že příroda a její evolucí optimalizované „návrhy“ jsou trvalou inspirací pro multioborový pohled na výzkum a vývoj nových typů strojů, zařízení a konstrukcí. Pokroky v oblasti nových materiálů, výrobních technologií, počítačových nástrojů mechaniky, ale i v oblasti identifikace (sběru dat), řízení a vývoje umělé inteligence vytyčují nové směry rozvoje konstrukcí budoucnosti.

Aplikace kompozitních materiálů v hlavních nosných systémech konstrukcí s využitím předností axiálně orientovaných vláken, podobně jako v rostlinných strukturách, byla obsahem prvního z příkladů. Prezentované metody umožňují provádění rychlých analytických návrhů vedoucích k optimalizaci tuhosti a únosnosti dílů. Vývoj nových typů spojů a integrovaných prostředků pro detekci poruch slibuje splnění náročných požadavků na vysokovýkonové a přitom bezpečné prvky zařízení se schopností indikovat počátek stavu svého poškození nebo porušování.

Druhý příklad poskytl informace o základním know-how systému sledování čerpání únavového života malých letadel. Navržený systém vychází z možnosti sledování provozu každého individuálního letounu. Při realizaci celého komplexního systému analýzy poškození kritického místa konstrukce umožní on-line sledovat podíl čerpání únavového života každého letounu sledované flotily a tím přispět ke zvýšení jejich provozní bezpečnosti.

Poděkování

Výsledky prezentované v této přednášce byly dosaženy za podpory projektů GA ČR (103/00/0756 a 106/05/0680), za podpory MPO č. FF-P/033 a ve spolupráci s Centrem leteckého a kosmického výzkumu.

Literatura

- [1] MAREK, P.- BROZZETTI, J.- GUŠTAR, M.- TIKALSKY, P., Editors. Probabilistic Assessment of Structures using Monte Carlo Simulation. Basics, Exercises, Software, ITAM Academy of Sciences of Czech Republic, 2003, ISBN 80-86246-19-1.
- [2] RŮŽIČKA, M. - UHER, O.: The Analytical Analysis and Experimental Verification of C/E Composite Beams. In: Proceedings of the 15th Symposium Danubia-Adria. Forli: Serirar s.p.a.. 1998. p. 81-82.
- [3] WIERERER, M.: Multiscale analysis of woven composites. PhD –thesis CTU in Prague, 2004.
- [4] H. HAHN AND S. W. TSAI. Nonlinear Elastic Behavior of Unidirectional Composite Lamina. J. Composite Materials. Vol.7, January, 1973, 102-118.
- [5] RŮŽIČKA, M. - UHER, O.: Analytické modelování a experimentální ověření vlastností navíjených kompozitových trubek uhlík/epoxy. In: 19. Reinforced Plastic, Plzeň: Dům techniky Plzeň, s.r.o. 1997, s. 35-42.
- [6] SUN, J. - RŮŽIČKA, M. - UHER, O.: Nonlinear Behavior Analysis of Filament-Wound Composite Tubes. In: Engineering Mechanics 2003. Prague: Academy of Sciences of the CR, Institute of Theoretical and Applied Mechanics, 2003, s. 316-317.
- [7] RŮŽIČKA, M. - SUN, J. - UHER, O.: Development and Application of Computer Program for Design of Filament Wound Composite Beams with Circular and Non-Circular Cross-Section. In: Proceedings of the First Asian-Pacific Congress on Computational Mechanics. Sydney: University of New South Wales, 2001, s. 268-273.
- [8] SUN, J. - RŮŽIČKA, M. - UHER, O.: Stress Analysis of Laminated and Filament Wound Composite Tubes under Torsion. In: Engineering Mechanics 2002. Brno: Institute of Mechanics of Solids, Faculty of mechanical Engineering, Brno University of Technology, 2002, s. 256-266.
- [9] SUN, J. - RŮŽIČKA, M.: A Computational Method of Filament Wound Composite Cylindrical Beam under General Load. In: Computational Mechanic, WCCM VI in conjunction with APCOM'04, Sept. 5-10, 2004, Beijing, China, Tsinghua University Press & Springer-Verlag 2004, CD ROM, ISBN 7-89494-512-9, pp. 1-10.
- [10] BLAHOUS, K. - UHER, O. - RŮŽIČKA, M.: Composite Rudder Shaft bending Test. ICEM12- 12th International Conference on Experimental Mechanics. 29 August - 2 September, 2004 Politecnico di Bari, Italy, ISBN 88 386 6273-8, pp 261-267.
- [11] RŮŽIČKA, M. - POUL, R.- BLAHOUS, K - UHER, O: Experimental verification of bending stiffness analysis of the windmill shaft. In: 20-th Danubia-Adria Symposium on Experimental Methods in Solid Mechanics. 24-27. 9. 2003, Hungary. Scientific Society of Mech. Engineering, 2003. ISBN: 963 9058 20 3, pp. 196-197.
- [12] BLAHOUS, K. –CHROMÝ, J. –POUL, R – UHER, O. – RŮŽIČKA, M: Pevnostní testy kolíkových spojů kompozitních válců. In: 24. Reinforced Plastic, Plzeň: Dům techniky Plzeň, s.r.o. 2005, (v tisku).
- [13] RŮŽIČKA, M. – MARCZI, T.: Návrh metodiky pro určování zbytkové životnosti letadel. výzkumná zpráva FS ČVUT v Praze č. 2051/02/03, Praha 2002, 29 str.

- [14] RŮŽIČKA, M. – MARCZI, T.: Popis algoritmu pro určování zbytkové životnosti letadel. Výzkumná zpráva FS ČVUT v Praze č. 2051/03/08, Praha 2003, 22 str.
- [15] MARCZI, T.- SLAVÍK, S.- RŮŽIČKA, M.: Monitoring and Improvement of Small Sport Planes Operational Safety from the Fatigue Point of View. In.: 24-th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences. Yokohama, August 29-Sept. 3, 2004 Japan, Published by Optimage Ltd., Edinburgh, UK, ISBN 0-9533991-6-8,
- [16] RŮŽIČKA, M. - MARCZI, T. - BALDA, M. - KÁBRT, M.: Measurement and Evaluation of the Small Sports Aircraft Loading. In: Experimental Stress Analysis 2003. Brno: University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, 2003, s. 85-86. ISBN 80-214-2314-5.
- [17] MARCZI, T. - RŮŽIČKA, M-SLAVÍK, S.: Advanced Operational Data Acquisition and Fatigue Monitoring of Sport Planes In: AED 2004 [CD-ROM]. Glasgow, ISBN 80-86059-41-3, pp. 1-10.
- [18] MALÉŘ, Z. - MARCZI, T. - RŮŽIČKA, M. - SLAVÍK, S.: Common Mathematical Model of Fatigue Characteristics. In: AED 2003 [CD-ROM]. Praha: Procesní inženýrství Ing. J. Novosad, 2003, s. 24. ISBN 80-86059-35-9.
- [19] RŮŽIČKA, M.: Podklady pro predikci životnosti částí trupu letounu AE 270. Část 1: Únavové křivky materiálů, metodika odvození únavových křivek kritických míst konstrukce. AC0125CZ. CVUT v Praze, Odbor pružnosti a pevnosti 1998. 41 s
- [20] MARCZI, T. - RŮŽIČKA, M -SLAVÍK, S: Bezpečnost konstrukce UL letounů.. PILOT. roč. XIII, srpen 2004, str. 21-23.
- [21] RŮŽIČKA, M.: Predikce životnosti motorového lože letounu. In: Dynamika strojů 99 - Sborník. Praha : AV ČR, Ústav termomechaniky, 1999, s. 217-224.
- [22] RŮŽIČKA, M.: Úvod do metod hodnocení únavové pevnosti a životnosti letadel. Zpráva FS ČVUT v Praze 2051/02/34, 2002
- [23] MARCZI, T. - RŮŽIČKA, M. - MALÉŘ, Z. - SLAVÍK, S.: Fatigue Data Acquisition and Fatigue Life Evaluation of Small Sport Plane. In: AED 2003 [CD-ROM]. Praha: Procesní inženýrství Ing. J. Novosad, 2003, s. 23. ISBN 80-86059-35-9.
- [24] MARCZI, T. - RŮŽIČKA, M –SLAVÍK, S.: Sledování provozu a čerpání únavové životnosti sportovních letounů. Letectví a kosmonautika (80. roč.) č. 9, 2004, str. 28-30.
- [25] PAPUGA, J. - RŮŽIČKA, M.: Zpracování zatěžovací historie v reálném čase programem RainIT. Zpráva FS ČVUT v Praze 2051/02/33, 2002.
- [26] RŮŽIČKA, M.: PoD křivky určované pomocí nedestruktivních kontrol letadel. In: Degradácia vlastností konštrukčných materiálů únavou. Žilina: Žilinská univerzita, 2001, díl 1, s. 73-78. ISBN 80-7100-873-7.
- [27] Military Standardization Handbook. Metallic materials and elements for aerospace vehicle structure, MIL-HDBK-5D, June 1987

Doc. Ing. Milan Růžička, CSc.

Narodil se 6. 2. 1955 v Nymburce. Po maturitě na SPŠ strojnické v Praze studoval na Fakultě strojní ČVUT v Praze obor Aplikovaná mechanika. Studium ukončil s vyznamenáním obhajobou diplomové práce na téma „Napjatost při tváření plechů kapalinou“. V letech 1980 – 1983 studoval jako interní aspirant na Katedře pružnosti a pevnosti Fakulty strojní. Během této doby absolvoval 6-ti měsíční stáž ve VZLÚ Praha a 3 měsíční studijní pobyt na TU Drážďany v Německu. V roce 1985 obhájil kandidátskou disertační práci na téma „Únavové vlastnosti závěsných ok“ a nastoupil na Fakultu strojní jako odborný asistent. Ve školním roce 1986/87 absolvoval dva semestry kursu VŠ pedagogiky ve VÚIS Praha, na který navázal v r. 1991 kursem u prof. Melezinka na Universitě v Klagenfurtu, Rakousko.

V letech 1995-97 působil jako externí pracovník oddělení experimentální dynamiky Ústavu termomechaniky AV ČR. V roce 1999 obhájil habilitační práci na téma: „Kritéria a postupy při posuzování únavové pevnosti a životnosti konstrukcí“ a byl jmenován docentem Fakulty strojní ČVUT v Praze, kde působí na Ústavu mechaniky doposud.

Během svého působení na ČVUT přednášel v základním studiu i ve specializacích. Externě přednášel na VŠE (programování) a dosud přednáší v certifikačních kursech svářečských škol. Zaváděl do výuky nové předměty Dynamická pevnost a životnost, Pevnost a životnost letadel III a podílel se na tvorbě předmětů dalších - Mechanika kompozitních materiálů, Mezní stavy konstrukcí. Podílel se na vybudování experimentálního pracoviště jako řešitel projektu FR VŠ 1831/200. Je autorem dvou výukových videoprogramů, tří dílů odborných monografií technických kurzů ČSVTS a řady skript (čtyři tituly ČVUT dvě internetové publikace). Jako školitel a školitel specialista úspěšně dovedl do obhajoby tři studenty doktorského studia, dalších 5 studentů vychovává v současné době.

V odborné činnosti se věnuje hodnocení mezních stavů konstrukcí a experimentálním metodám v mechanice a biomechanice. Zaměřuje se zejména na výpočty pevnosti, životnosti a spolehlivosti konstrukcí, zabývá se výpočty a zkoušením dílů z kompozitních materiálů. V uplynulých letech i v současnosti se podílí na řešení řady grantových projektů (řešitel 1 projektu GAČR, hlavní spoluřešitel 5 projektů GA ČR, 3 projektů MPO ČR). Široce spolupracuje s průmyslem, zejména s podniky Aero Vodochody, VZLÚ Praha a dalšími leteckými podniky, se ŠKODA VÝZKUM v Plzni, Škoda AUTO, COMPOTECH Plus Sušice, SVÚM Praha, Transgas, Bonatrans Bohumín aj. Je autorem nebo spoluautorem 2 dalších monografií, 12 článků v recenzovaných časopisech, 52 příspěvků na mezinárodních konferencích a 75 příspěvků na konferencích tuzemských. Podílel se nebo byl autorem 16 oponentovaných a 68 dalších výzkumných a technických zpráv. V posledních letech se rovněž zabývá lomovou mechanikou a simulačními stochastickými metodami. Navázal na výzkum v oblasti mezních stavů tlakových těles a prohloubil teorii mezních křivek pro predikci porušování dálkových plynovodů. Vyvíjí a aplikuje pravděpodobnostní přístupy v hodnocení mezních stavů. V rámci výměny vědeckých zkušeností navštívil nebo krátkodobě působil na řadě zahraničních univerzit a institucí (TU Dresden-1984, 1999, Karlsruhe-1988, 1994, Stuttgart, FI -LBF Darmstadt-1994, University Berkeley, Stanford – 2004.

Z dalších odborných a společenských aktivit lze uvést členství v Akademickém senátu FS ČVUT Praha (1992-98 a 2004), ve VŠTJ Technika Praha strojní, v Asociaci strojních inženýrů. Je členem hlavního výboru a výborů dvou odborných skupin Společnosti pro mechaniku. V současné době je členem oborové a podoborové komise strojírenství Grantové agentury ČR.

Je ženatý, manželka Ing. Zdenka Růžičková pracuje na Ministerstvu financí ČR. Má dvě děti, dcera Lucie studuje ve 3. ročníku na Gymnáziu prof. Jana Patočky v Praze, syn Radek ve 3. ročníku FD ČVUT v Praze.