

FATIGUE CRACK GROWTH PREDICTION IN THE SMALL TRANSPORT AIRCRAFT LANDING GEAR BRACKET

R. Doubrava*, R. Růžek*

Summary: *The crack growth prediction techniques in the critical area of the small transport aircraft undercarriage bracket has been describe in this paper. Stress-state was determined by FEM numerical simulation. The PREDIKCE code was used for crack growth curve determination. This code was developed in the Aeronautical Research and Test Institute (VZLU). The crack initial size was determined based on experimental data and computation.*

1. Úvod

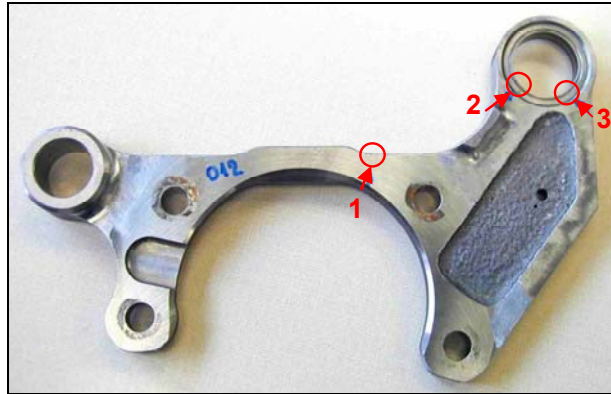
Výpočtové odhady predikce šíření únavových trhlin jsou nedílnou součástí průkazu letové způsobilosti konstrukcí navržených a provozovaných podle filozofie Damage Tolerance (DT). V předpisech letové způsobilosti jsou definovány velikosti a typy počátečních vad, které je nutné při výpočtech a odhadech životnosti uvažovat. Současně předpisy připouštějí možnost významně tuto velikost zmenšit v případě, že výrobce prokáže existenci počátečních poškození menšího rozsahu. To má v důsledku významný vliv na dobu provozu konstrukce, resp. významné snížení nákladů souvisejících s periodickými prohlídkami v provozu. Jednou z možností, jak existenci menších vad prokázat, je výpočet. V předložené práci je mimo jiné navržena a ověřena metodika, kterou lze tento průkaz realizovat.

Matematické modely pro odhad rychlosti šíření únavové trhliny vycházejí většinou z lineární lomové mechaniky a aplikace Parisova zákona. Parametrem charakterizujícím napjatost v tělese s trhlinou je v tomto případě elastický faktor intenzity napětí K . Ten je možné určit pomocí publikovaných analytických funkcí nebo z numerického řešení pomocí MKP. Ve VZLÚ byla navržena a ověřena metodika výpočtu růstových křivek šíření únavových trhlin pro tvarově složité konstrukční díly využívající kombinaci numerického a analytického řešení stavu napjatosti v tělese. Tento přístup je v metodice průkazu určení počáteční velikosti poškození konstrukce použit.

2. Experiment

Hlavním cílem experimentu bylo ověření způsobu iniciace a šíření únavové trhliny v oblasti, na kterou bude cíleně aplikována technologie pro zvýšení únavové životnosti (Kafka, Doubrava, 2002). Součást byla zatěžována prostřednictvím speciálního přípravku střídavým zatížením s frekvencí 1 Hz na hydraulickém zkušební zařízení SCHENCK 250. Fotografie zkušební tělesa s vyznačením míst vzniku únavových poruch je na obr.1.

* Ing. Radek Doubrava, Ing. Roman Růžek, Ph.D.: Výzkumný a zkušební letecký ústav, a.s.; Beranových 130; Praha – Letňany; 199 05; tel.: +420.225 115 134; fax: +420.283 920 018; e-mail: doubrava@vzlu.cz, ruzek@vzlu.cz website: www.vzlu.cz



Obr.1 Zkušební těleso s vyznačenými místy vzniku únavové poruchy.

3. Predikce šíření únavové trhliny

Metodika predikce šíření únavové trhliny, vycházející ze vzájemného propojení výpočtů faktoru intenzity napětí pomocí MKP a programu PREDIKCE (Růžek, 1998), byla vyvinuta ve VZLÚ, a.s. (Růžek, Doubrava, 1997). Schéma metodiky je na obr.2. Vstupními parametry výpočtu jsou únavové materiálové charakteristiky, proces zatěžování, geometrie tělesa a okrajové podmínky. Stav napjatosti v tělese s trhlinou je určen prostřednictvím faktoru intenzity napětí z výpočtu MKP nebo pomocí analytické funkce. Vlastní přírůstky délky trhliny jsou určovány pomocí programu PREDIKCE. Vypočtené hodnoty přírůstku délky trhliny a odpovídající počet kmitů jsou použity pro konstrukci nové geometrie čela trhliny a následně růstové křivky.

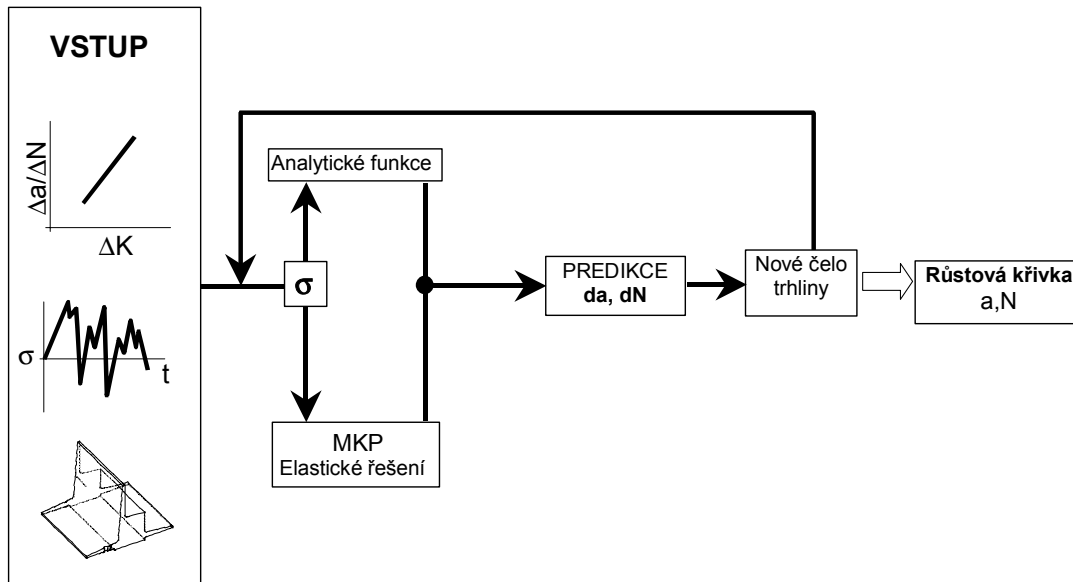
Výpočtový program PREDIKCE umožňuje vypočítat růstové křivky podle čtyř modelů. Jsou to:

- základní model,
- Willenborgův model,
- PREFAS model,
- CORPUS model.

Všechny užití modely počítají přírůstky délky trhliny metodou kmit po kmitu. Základní model využívající pouze PARISův vztah neuvažuje ve výpočtu žádné interakční účinky špiček v zatěžovací sekvenci. Jeho použití je plně oprávněné pouze při harmonickém zatěžování s konstantní amplitudou zatěžovací síly. V jiných případech může být výsledek výpočtu zatížen významnou nepřesností. Ostatní modely zabudované ve výpočtovém algoritmu programu PREDIKCE různým způsobem vliv přetěžovacích kmitů v zatěžovací sekvenci uvažují. Willenborgův model (Willenborg, Engle, Wood, 1971) vychází z analýzy plastické zóny, PREFAS (De Koning, 1981) a CORPUS (Aliaga, Davy, Schaff, 1986) model z analýzy jevu „uzavření“ trhliny. Přesnost všech modelů je do značné míry vázána na rozsah znalostí materiálových charakteristik. Podle dosavadních zkušeností s predikcí růstových křivek není možné jednoznačně upřednostnit jeden model před druhým. Při jejich využití je nutná zkušenost a někdy i realizace doplňkových experimentů. V letecké oblasti při výpočtech se sekvencemi reprezentujícími reálný provoz letadel se např. Willenborgův přístup osvědčuje spíše u akrobatických a vojenských konstrukcí, CORPUS a PREFAS modely se jeví vhodné spíše pro oblast civilního letectví s převažujícím poryvovým zatěžováním.

Jedním z hlavních vstupních parametrů výpočtu je faktor intenzity napětí, resp. korekční tvarové funkce pro určení faktoru intenzity napětí. Časově méně náročné a levnější je užití

analytických funkcí. Ty lze najít v literatuře pouze pro omezený počet geometrických tvarů a způsobů zatěžování. Z tohoto důvodu je nutné přikročit k analýzám využívajícím MKP a výsledky aplikovat do programu PREDIKCE. Hranice, kdy lze ještě použít analytická řešení a kdy je nutná analýza pomocí MKP není ostrá. Záleží na časových a finančních možnostech řešení ve vazbě na požadovanou přesnost.



Obr.2 Schéma metodiky predikce šíření únavové trhliny.

4. Výpočet šíření únavové trhliny v tělese konzoly podvozku

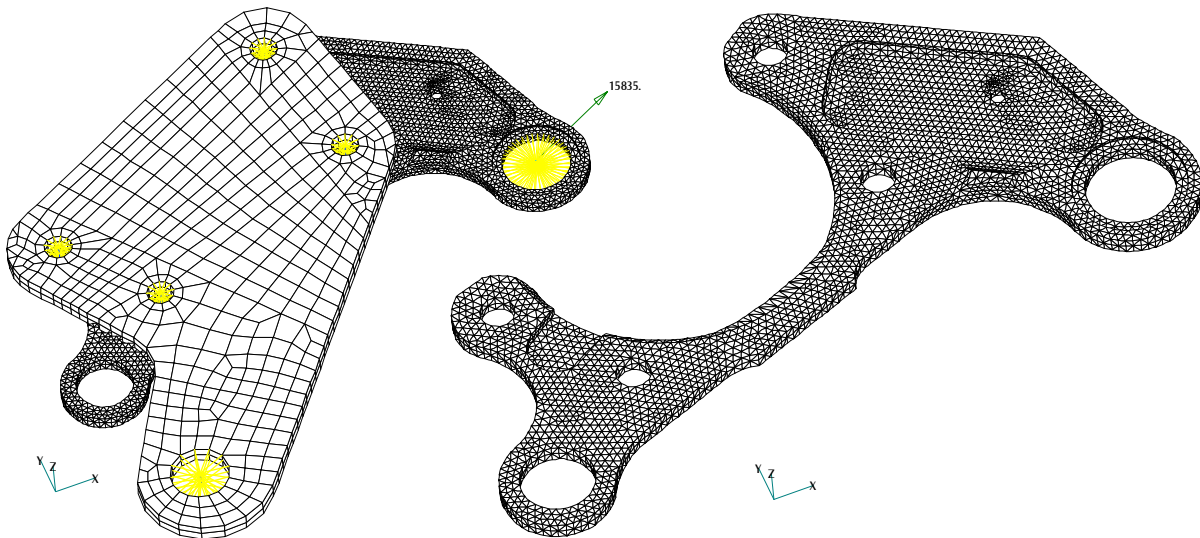
Pro popis stavu napjatosti v tělese s trhlinou je v lineární lomové mechanice používán faktor intenzity napětí. Ten lze stanovit pomocí publikovaných analytických funkcí nebo pomocí numerického řešení např. MKP. Ve VZLÚ, a.s. byla vypracována metodika výpočtu K-faktoru využívající trhlinový prvek programu MSC/NASTRAN. V minulosti byla pro velmi malé velikosti geometrie trhlín a jednoduché geometrie ověřena metodika kombinace MKP výpočtu s analytickými funkcemi na náhradním tvaru tělesa (Doubrava, 1997).

V případě konzoly podvozku byl nejprve proveden výpočet na globálním pevnostním modelu MKP, který ukázal ve shodě s experimentem koncentrace napětí v místech vzniku a šíření únavových trhlín. Pevnostní model MKP byl sestaven na základě CAD modelu konzoly podvozku a zatěžovacího přípravku. Vzhledem k symetrii tělesa konzoly byla modelována polovina se symetrickou deformační okrajovou podmínkou. Síť konečných prvků byla vytvořena v preprocesoru FEMAP pomocí automatického generátoru prvků typu TETRA. Přenos zatížení mezi přípravkem a tělesem konzoly byl realizován prostřednictvím kontaktních elementů GAP. Pevnostní model MKP je na obr.3.

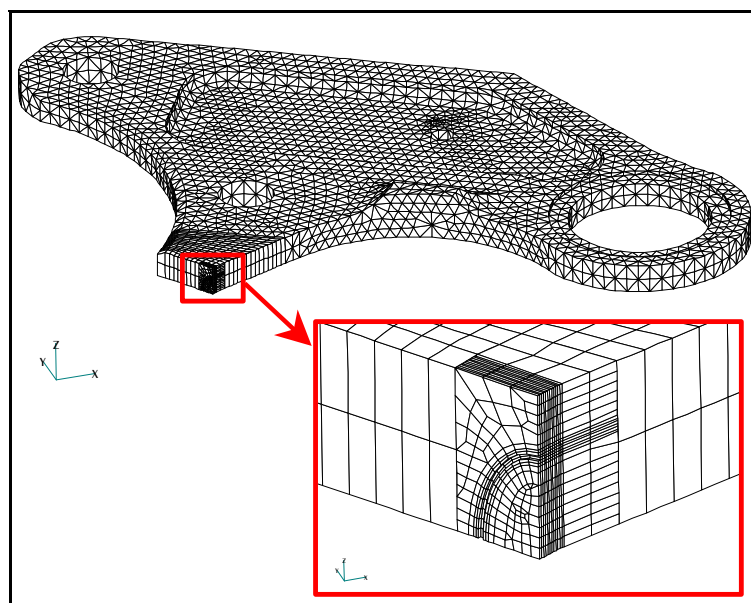
Pro výpočet predikce rychlosti šíření únavové trhliny byla vybrána oblast iniciace poruchy č.1 (obr.1), která se jeví významná jednak z hlediska korelace iniciace trhliny v provozu a jednak z hlediska zamýšlené cílené aplikace technologie pro zvýšení životnosti součásti (Doubrava, 2002).

Pro aplikaci trhlinových prvků byla ve vymezené oblasti nahrazena síť konečných prvků tvořená elementy typu TETRA elementy typu HEXA. Připojení těchto elementů bylo realizováno pomocí MPC (Doubrava, 1999) a ověřeno porovnáním upraveného a původního

globálního modelu z hlediska deformační a napěťové odezvy. Výpočet faktoru intenzity napětí byl proveden na čele polokruhové, resp. čtvrtkruhové (symetrie) trhliny o poloměru $R=1.3$ mm. Tato velikost trhliny je dána předpisem pro konstrukce navržené a provozované podle filozofie Damage Tolerance. Na základě porovnání hodnot K-faktoru vypočtených pomocí MKP a analytické funkce zapracované do programu PREDIKCE (Růžek, 1998), byla pro další výpočet použita tvarová funkce z MKP řešení. Výpočet K-faktoru byl proveden na globálním pevnostním modelu MKP s hustou sítí konečných prvků v okolí čela trhliny (obr.4).



Obr.3 Pevnostní model MKP konzoly se zatěžovacím přípravkem a samotné konzoly.



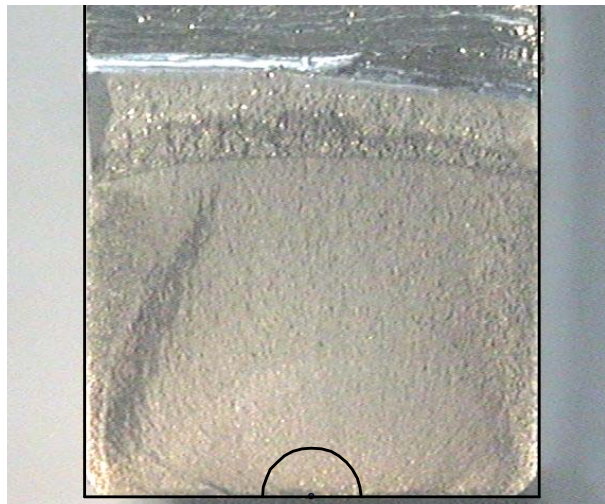
Obr.4 Detail sítě konečných prvků v oblasti predikovaného čela únavové trhliny.

Tímto způsobem byl vypočten přírůstek délky trhliny odpovídající přechodu z eliptického tvaru na průchozí tvar čela trhliny. Pro další výpočet šíření únavové trhliny byl uvažován přímý tvar čela trhliny odpovídající vnitřní délce posledního predikovaného čela eliptické trhliny. Pro výpočet přímého čela trhliny byla použita tvarová funkce zapracovaná do programu PREDIKCE.

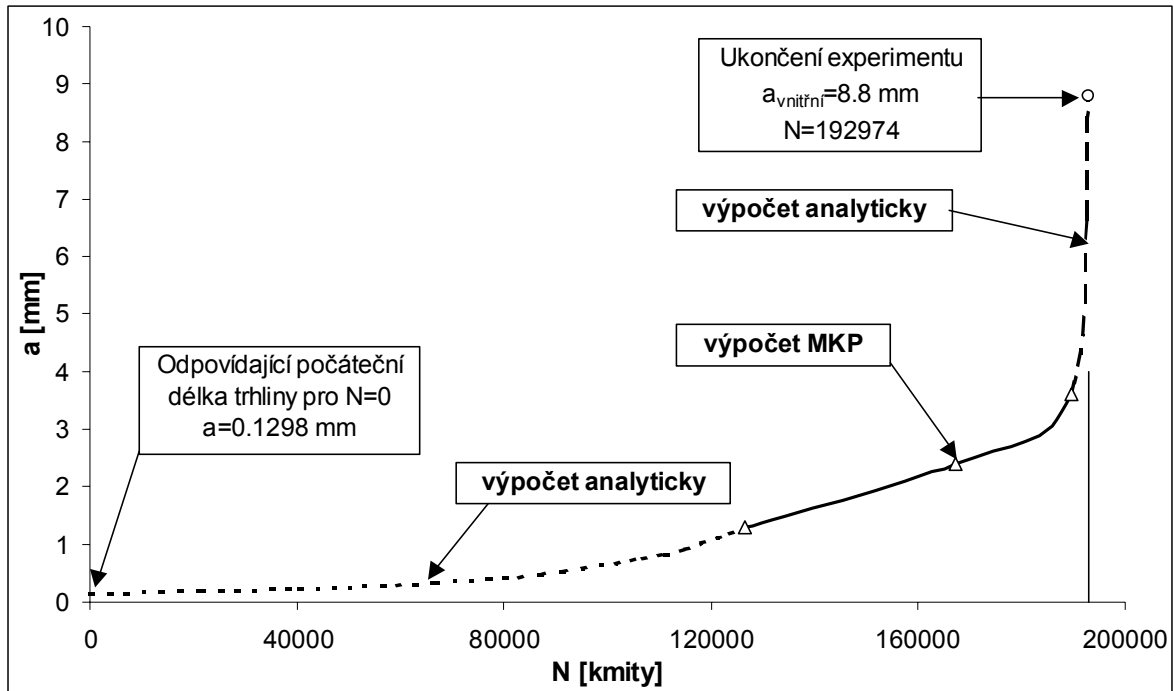
Na základě optického pozorování lomové plochy bylo zjištěno, že výpočtová velikost počáteční únavové poruchy je větší než byla u reálného tělesa obr.5.

Z tohoto důvodu byl proveden výpočet s vadou řádově menší s využitím analytických funkcí zapracovaných do programu PREDIKCE. Takto vypočtené počty kmitů do velikosti vnitřní délky odpovídající předpisové hodnotě, byly přičteny k predikovaným hodnotám od předpisové velikosti trhliny do koncové délky trhliny zjištěné z experimentu.

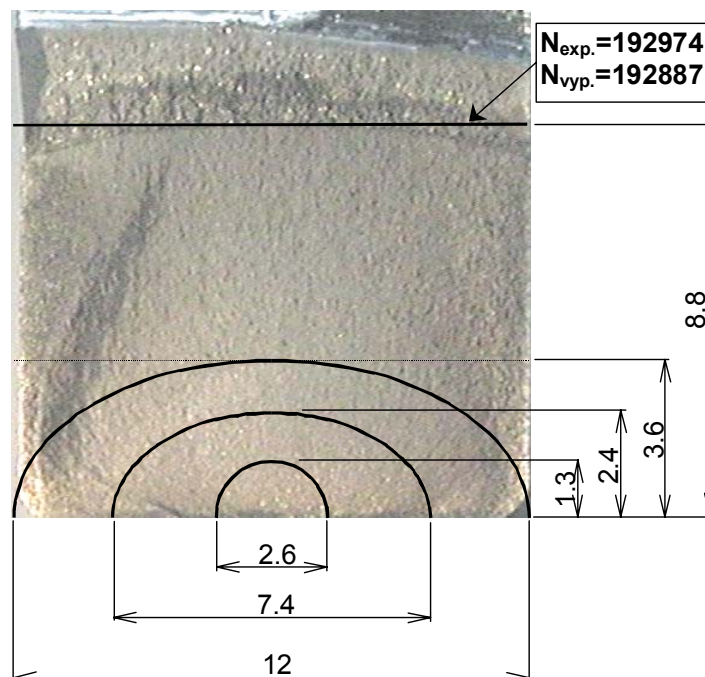
Vypočtené přírůstky délky trhliny ve středu tělesa a počty kmitů byly zahrnuty do růstové křivky. Takto stanovená výpočtová křivka byla následně posunuta do koncového bodu na čele únavové trhliny zjištěného z experimentu obr.6. Průsečík takto posunuté růstové křivky s počátkem zatěžování ($N = 0$) určuje ekvivalentní velikost únavové poruchy $R \approx 0.13$ mm. Výsledné predikované tvary čela trhliny jsou uvedeny na obr.7.



Obr.5 Lomová plocha únavové poruchy v tělese konzoly podvozku s vyznačením počáteční polokruhové poruchy o velikosti $R=1.3$ mm dané předpisem.



Obr.6 Výpočtová růstová křivka posunutá do experimentálně zjištěné konečné velikosti čela trhliny.



Obr.7 Porovnání predikovaných tvarů čela trhliny s lomovou plochou reálného tělesa.

4. Závěr

Výpočtem byla určena počáteční porucha o velikosti $a \approx 0.13$ mm. Pomocí této metody je možné v souladu s předpisem statisticky na souboru více měření prokázat existenci menší velikosti počáteční vady oproti hodnotě vyžadované předpisem. Tímto postupem lze v důsledku prodloužit dobu provozu, resp. interval prohlídek konstrukce a snížit provozní náklady.

5. Poděkování

Tato výzkumná práce byla realizována za finanční podpory ze státních prostředků poskytnutých Ministerstvem průmyslu a obchodu.

6. Literatura

- Aliaga, D., Davy, A., Schaff, H. (1986) A simple crack closure model for predicting fatigue crack closure model under flight-simulation loading. *Proceeding 13th ICAF Symposium*, Pisa.
- DeKoning, A.U. (1981) A simple crack closure model for prediction of fatigue crack growth model under variable-amplitude loading. *ASTM STP-743*.
- Doubrava, R. (1997) Ověření náhradního tvaru tělesa pro výpočet faktoru intenzity napětí rohové trhliny v křídélku pásnice. *Zpráva VZLÚ R-2903/97*.
- Doubrava, R. (1999) Metodika aplikace multipoint constraint v pevnostních modelech MKP pro řešení charakteristik lomové mechaniky. *Zpráva VZLÚ R-3040/99*.
- Doubrava, R. (2002) Predikce šíření únavové trhliny v tělese konzoly podvozku letounu L-410. *Zpráva VZLÚ R-3469/02*.
- Kafka, V., Doubrava, R. (2002) Únavová zkouška konzoly podvozku L-410 z oceli L-ROL. *Zpráva VZLÚ R-3469/02*.
- Růžek, R. (1998) Dokumentace použitých tvarových funkcí pro stanovení faktoru intenzity napětí ve výpočetním programu „PREDIKCE“. *Zpráva VZLÚ R-2959/98*.
- Růžek, R. (1998) Program PREDIKCE pro výpočet šíření únavových poruch v leteckých konstrukcích při reálném provozním zatížení. *Zpráva VZLÚ R-3998/98*.
- Růžek, R., Doubrava, R. (1997) Predikce šíření únavové trhliny dle požadavků předpisu MIL v pásnici křídla letounu L-59 s využitím MKP a programu PREDIKCE. *Zpráva VZLÚ R-2889/97*.
- Willenborg, J.G., Engle, R.M., Wood, H.A. (1971) A crack growth retardation model using an effective stress concept. *AFDDL-TM-71-1 FBR, Air Force Flight Dynamics Lab*.