

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice PhD Thesis, sv. 677

ISSN 1213-4198

thesis IS

Ing. Miroslav Lošťák

Bezpečnost dopravního letounu
při poškození draku
terroristickým útokem

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
LETECKÝ ÚSTAV

Ing. Miroslav Lošťák

**BEZPEČNOST DOPRAVNÍHO LETOUNU PŘI POŠKOZENÍ
DRAKU TERORISTICKÝM ÚTOKEM**

SAFETY OF A COMMERCIAL AIRCRAFT AFTER DAMAGE TO
AIRFRAME DUE TO TERRORIST ATTACK

ZKRÁCENÁ VERZE Ph.D. THESIS

| | |
|----------------|--|
| OBOR | Konstrukční a procesní inženýrství |
| VEDOUCÍ PRÁCE | doc. Ing. Miloslav Petrásek, CSc. |
| OPONENTI | prof. Mgr. Ing. Jaroslav Salga, CSc. prof. Ing. Jan Kusák, CSc. |
| DATUM OBHAJOBY | 23. 10. 2012 |

Klíčová slova

Teroristický útok, letoun, poškození, raketa, bojová hlavice, střepina, analytická geometrie, střelecký experiment, metoda konečných prvků, únosnost, FMEA/FMECA, fuzzy logika

Key words

Terroristic attack, aircraft, damage, missile, warhead, analytical geometry, shooting experiment, finite element method, load bearing capacity, FMEA/FMECA, fuzzy logic

Místo uložení práce

Oddělení pro vědu a výzkum FSI VUT v Brně

© Miroslav Lošťák, 2012

ISBN 978-80-214-4616-9

ISSN 1213-4198

OBSAH

| | | |
|-------|---|-----------|
| 1 | ÚVOD | 5 |
| 1.1 | Současné nebezpečí a globální geopolitická situace | 5 |
| 1.2 | Případy teroristického útoku na letoun | 5 |
| 1.3 | Současné dopravní letouny, jejich odlišnosti a podobnosti | 5 |
| 1.4 | V současnosti používané ochrany letadel | 6 |
| 2 | CÍLE PRÁCE | 6 |
| 3 | KLASIFIKACE TERORISTICKÝCH ÚTOKŮ | 8 |
| 4 | BOJOVÁ HLAVICE RAKETY | 8 |
| 4.1 | Určení zasažené oblasti letounu tříštivou bojovou hlavicí | 9 |
| 4.1.1 | <i>Rozložení střepin v prostoru</i> | <i>9</i> |
| 4.1.2 | <i>Definování směru přiletu rakety k letounu</i> | <i>9</i> |
| 4.1.3 | <i>Geometrie letounu</i> | <i>10</i> |
| 4.1.4 | <i>Geometrie rozptylu střepin</i> | <i>11</i> |
| 4.1.5 | <i>Výpočet zasažené oblasti</i> | <i>12</i> |
| 5 | EXPERIMENTÁLNÍ URČENÍ POŠKOZENÍ DRAKU STŘEPINAMI | 13 |
| 5.1 | Vzorek | 13 |
| 5.2 | Střepina | 14 |
| 5.3 | Střelecká sestava | 14 |
| 5.4 | Průběh experimentu | 15 |
| 5.5 | Výsledek experimentu | 15 |
| 6 | NUMERICKÉ URČENÍ POŠKOZENÍ DRAKU STŘEPINAMI | 16 |
| 6.1 | Metoda konečných prvků a MSC Dytran | 16 |
| 6.2 | Model konstrukce | 16 |
| 6.3 | Model střepiny | 17 |
| 6.4 | Vypočítané poškození – přímý zásah | 17 |
| 6.5 | Vypočítané poškození – zásah pod úhlem | 18 |
| 6.6 | Vypočítané poškození – spojení dvou plechů | 19 |
| 6.7 | Zhodnocení numerického určení poškození | 19 |
| 7 | VLIV POŠKOZENÝCH PRVKŮ NA ÚNOSNOST KONSTRUKCE | 20 |
| 7.1 | Únosnost poškozené konstrukce | 20 |
| 7.2 | Důsledek poškození prvku pomocí metody FMEA/FMECA | 21 |
| 7.3 | Využití fuzzy logiky při určování stupně poškození konstrukce | 22 |
| 7.3.1 | <i>Významnost prvku</i> | <i>23</i> |
| 7.3.2 | <i>Rozsah poškození prvku</i> | <i>24</i> |
| 7.3.3 | <i>Určení poškození konstrukce pomocí fuzzy logiky</i> | <i>24</i> |
| 8 | ZÁVĚR | 25 |
| 8.1 | Přínos výsledků pro další rozvoj vědy a pro praktické využití | 26 |

| | |
|---------------------------------|----|
| 9 LITERATURA..... | 28 |
| 10 STRUKTUROVANÝ ŽIVOTOPIS..... | 30 |
| 11 ABSTRACT | 31 |

1 ÚVOD

1.1 SOUČASNÉ NEBEZPEČÍ A GLOBÁLNÍ GEOPOLITICKÁ SITUACE

V poslední době dochází ve světě k nárůstu násilí, spojeného jak s politickými či ekonomickými požadavky, tak především s náboženským fundamentalismem. Do popředí se dostal hlavně islámský fundamentalismus. Zvláště v muslimských státech roste vliv skupin podporujících boj proti západní civilizaci. Tyto skupiny disponují značnými finančními prostředky, neboť s arabským světem je spojeno značné nerostné bohatství v podobě ropy. Finanční prostředky ale nestačí na vedení otevřené války se západními armádami a proto se zainteresované skupiny uchylují k útokům teroristickým.

Teroristické útoky jsou útoky vedené proti civilnímu obyvatelstvu nepřítele za účelem zastrášení a destabilizace společnosti. V mnoha případech se jedná o útoky sebevražedné. Proti takovýmto útokům je velmi složitá obrana, která mimo jiné zahrnuje finančně náročnou důslednou kontrolu a monitorování oblastí potenciálního nebezpečí.

Dochází také k útokům na cíle značně zranitelné, tedy na civilní letadla. Jakýkoliv útok na letadlo má většinou tragické důsledky. Dojde-li k pádu zasaženého stroje, dochází ke značným ztrátám na životech.

V současné době se boji proti terorismu věnují velké skupiny pracovníků z nejrůznějších bezpečnostních organizací. Ke snížení škod a katastrofických dopadů však mohou významnou měrou přispět i letecké konstrukční kanceláře, které se budou více orientovat jak na pasivní, tak i na aktivní stránku ochrany letecké techniky. Právě pasivní ochraně letadel je věnována tato práce, neboť je z praxe již mnohokrát prokázáno, že vhodně navržená konstrukce letadla může velmi významně snížit následky plynoucí z teroristického útoku jakéhokoliv typu.

1.2 PŘÍPADY TERORISTICKÉHO ÚTOKU NA LETOUN

Od roku 1970 bylo raketami země-vzduch zasaženo přibližně 40 civilních letadel. Při těchto útocích zemřelo přibližně 400 pasažérů a členů posádky. Jen v minulém desetiletí došlo k nejméně čtyřem útokům vedenými pokročilými technologiemi, jako jsou řízené rakety země-vzduch. Dva z těchto útoků byly provedeny v Iráku, tedy islámské zemi zmítanými značnými nepokoji. Jako názorný příklad teroristického útoku na civilní letoun se dá poukázat na případ civilního nákladního letounu Airbus A300B4-203F přepravní společnosti DHL dne 22. 11. roku 2003 v Iráku [2]. Na tento letoun byl veden útok dvěma raketami země-vzduch. Došlo k poškození křídla, ale letounu se podařilo nouzově přistát.

1.3 SOUČASNÉ DOPRAVNÍ LETOUNY, JEJICH ODLIŠNOSTI A PODOBNOSTI

Jak je již z názvu této práce zřejmé, její zaměření je na dopravní letouny. Hned nyní v úvodu je ale vhodné tyto dopravní letouny definovat. V této práci jsou chápány jako letouny certifikované dle předpisů CS-25 nebo obdobných FAR-25. Tyto typy letounů jsou nejvíce ohroženy teroristickými útoky i když jsou však letouny certifikované podle stejných předpisů, mohou se i

velmi lišit. Tato práce je ale zaměřena na typ letounů vyráběných konsorciem Airbus nebo Boeing, což jsou dva největší výrobci civilních dopravních letounů.

V historii vývoje letadel spatřily světlo světa všechny možné koncepce a tvary letadel. V průběhu druhé poloviny dvacátého století ale postupně dochází ke sbližování tvaru všech komerčních civilních letadel. Koncepce se ustálila na válcovém průřezu trupu letounu, což je nejvhodnější tvar z hlediska přetlakování trupu. I tvar křídla se ustálil dle potřeb rychlostí, kterými se současná letadla pohybují. To samé platí i pro ocasní plochy. Zdá se, že došlo k nalezení jakési ideální konzervativní koncepce.

1.4 V SOUČASNOSTI POUŽÍVANÉ OCHRANY LETADEL

Jednou z možností obrany, která je používána pro snížení rizika vnějšího zásahu letounu, je složité manévrování při startu a přistání. Letadla na přistání prudce klesají z velké výšky. Tím se sníží doba pobytu letounu ve výškách a prostoru, kde mohou být snadno zasaženy střelnými zbraněmi nebo střelami země vzduch.

Obranou převzatou z vojenského sektoru je vybavování letounů výmetnicemi klamných cílů. Jedná se především o klamné cíle proti radarem naváděným střelám a na klamné cíle proti střelám, jejichž senzory pracují v infračervené oblasti spektra. Toto řešení je ale u většiny civilních letadel dosti problematické, takže k jeho širšímu praktickému využití zatím nedošlo.

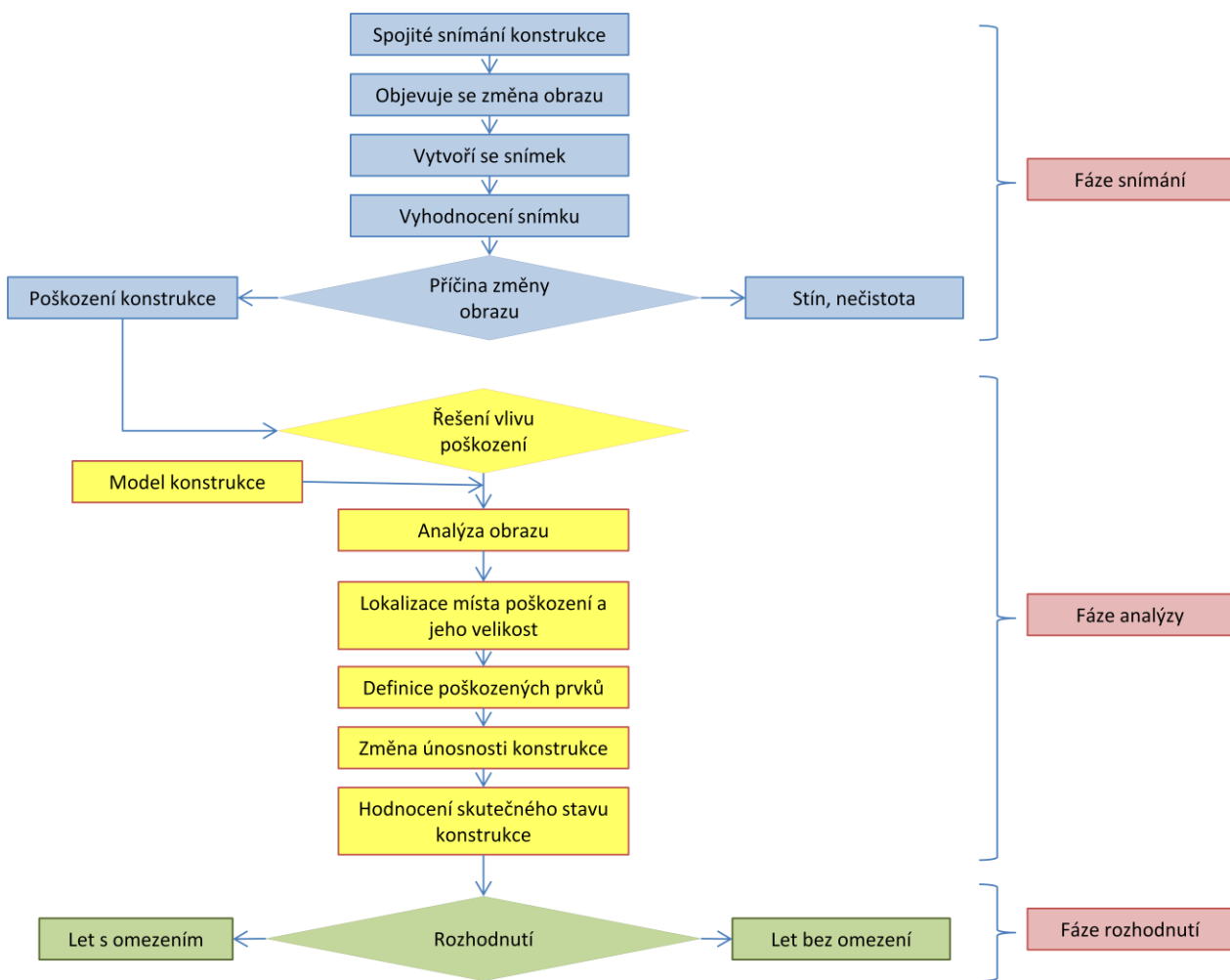
V poslední době se dostávají ke slovu pokročilejší prostředky obrany. Jako příklad takového systému lze uvést systém Northrop Grumman Guardian [3]. Jedná se o pasivní autonomní systém ochrany civilních letounů proti ručně odpalovaným střelám země-vzduch. Pole senzorů u tohoto systému zachytí střelu blížící se k letadlu a předají tuto informaci infračervené sledovací kameře. Po ověření reálnosti hrozby je zaměřen paprsek infračerveného laseru, bezpečného lidským očím, na přilétající objekt. Účelem paprsku je zmatení naváděcího systému rakety, přesvědčení ho o jiném cíli a odvedení střely od letounu. Tento systém je v současné době stále ve zkušebním provozu.

2 CÍLE PRÁCE

Problematika teroristických útoků na civilní letadla je v současné době poměrně závažná záležitost. Proto je nutno se touto oblastí zabývat poměrně podrobně a velmi intenzivně, neboť i relativně drobné poznatky mohou přispět jak ke snížení nebezpečí teroristického útoku, tak k eliminaci nebo alespoň redukci nepříznivých důsledků, které takový útok způsobí.

Obecně je tedy možno jako základní cíl disertační práce uvést zvýšení bezpečnosti civilní letecké přepravy.

Je to ale problematika neobyčejně rozsáhlá, takže její komplexní řešení je samozřejmě mimo možnosti jedné disertační práce a v podstatě i mimo možnosti jednoho řešitele. V současnosti probíhá na Katedře letecké a raketové techniky Univerzity obrany řešení programu, který má za cíl zhodnotit rozsah poškození draku letounu bezprostředně po poškození za letu a umožnit tak pilotovi reagovat, případně omezit zásahy do řízení tak, aby například při prudším pohybu nedošlo ke katastrofické poruše již poškozených částí. Funkční schéma tohoto programu je znázorněno na obrázku 2.1.



Obr.2.1. Funkční diagram programu

V tomto programu jde o navržení systému, který bude spojitě snímat povrch letounu. Při zásahu povrchu letounu dojde ve snímaném obrazu ke změně a tato změna se poté dále vyhodnocuje. Nastupuje porovnání s modelem konstrukce a numerický výpočet skutečného poškození letounu. Na základě tohoto výpočtu je nakonec předán pokyn pilotovi, jestli může pokračovat v letu bez omezení nebo s různými letovými omezeními. Tato práce se stala součástí tohoto programu jako příspěvek do fáze analýzy. V souladu s touto koncepcí a zadáním práce byla stanovena relativně omezená oblast, kterou je:

Pokles únosnosti draku letounu jako důsledek poškození, vzniklého při teroristickém útoku.

V rámci tohoto, úžeji definovaného cíle budou rozpracovány následující dílčí problémy:

- ***analýza typů, pravděpodobností a důsledků teroristických útoků***

- rozvoj teorie k určení polohy poškození, jeho rozsahu a významnosti

- experimentální určení rozsahu poškození

- rozpracování teorie numerického určení rozsahu poškození a jeho porovnání s experimentem

- rámcový návrh metodiky pro hodnocení okamžitého stavu letounu, poškozeného teroristickým útokem.

V této práci budou některá témata řešena z důvodu rozsáhlosti problému pouze okrajově a budou stanoveny podmínky, ze kterých se vychází.

3 KLASIFIKACE TERORISTICKÝCH ÚTOKŮ

V této práci jsou klasifikovány teroristické útoky podle místa, z kterého je útok na letoun veden. Jsou definovány dvě možnosti a to útok na palubě letounu a útok na letoun z vnějšku. Útok na palubě je dále dělen na útok pomocí výbušiny a bez pomoci výbušiny. Jako útoky z vnějšku jsou uvažovány útoky střelnou zbraní nebo raketou.

Při porovnání těchto rozdílných způsobů útoku se jeví jako nejnebezpečnější teroristický útok raketou. Tato raketa může být až do okamžiku odpálení skryta a nevyžaduje složité odpalovací zařízení. Tento útok tedy považuji v dnešní době za nejnebezpečnější a jeho popisem se budu nadále zabývat. Konkrétně útokem raketou s tříštivou bojovou hlavicí.

4 BOJOVÁ HLAVICE RAKETY

Jak bylo uvedeno v předchozí kapitole, pro civilní dopravní letadla je nejnebezpečnější raketa s tříštivou bojovou hlavicí.

Ničivý účinek tohoto typu hlavic spočívá ve vytvoření většího počtu střepin, které svou kinetickou energií poté působí na cíl, v tomto případě letoun. Doprovodným účinkem výbuchu je i vytvoření rázové vlny.

Pro určení účinku bojové hlavice je potřeba určit zasaženou oblast letounu a míru poškození v této oblasti. K tomu je potřeba znát u bojové hlavice následující parametry, charakterizující vlastnosti střepin:

- **Počet střepin** – jedná se o počet střepin, vytvořených po roztržení bojové hlavice
- **Tvar střepiny** – zde závisí na způsobu vytvoření střepin
- **Hmotnost střepiny** – zde budeme uvažovat z důvodu zjednodušení jednotnou střední hmotnost střepin
- **Absolutní rychlost střepiny** – jedná se o rychlost střepiny vůči zemi (pevnému bodu)
- **Relativní rychlost střepiny** – jedná se o rychlost střepiny vůči cíli
- **Kinetická energie střepiny** – tato energie určuje ničivý účinek střepiny v okamžiku dopadu na cíl
- **Hustota střepin** – udává počet střepin v prostoru

4.1 URČENÍ ZASAŽENÉ OBLASTI LETOUNU TŘÍŠTIVOU BOJOVOU HLAVICÍ

V této kapitole je rozpracován základ k vytvoření algoritmu, který bude v rámci řešení úlohy využíván pro stanovení oblasti na povrchu letounu, která bude zasažena rojem střepin, vytvořených při explozi bojové hlavice rakety. V této souvislosti byly definovány tři základní módy zásahu:

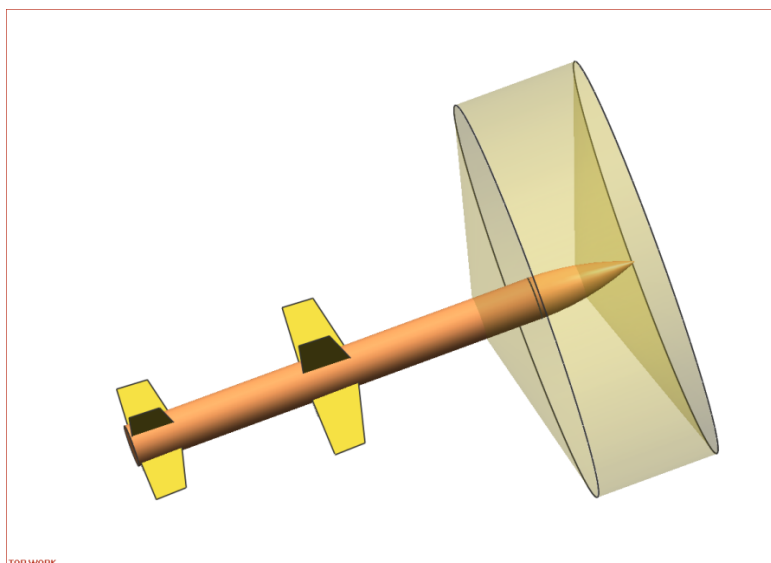
- **Přímý zásah letounu** – předpokládá se takový stupeň poškození, při kterém dochází ke ztrátě letounu.
- **Exploze bojové hlavice ve vzdálenosti menší než je kritická vzdálenost** – vytvoření souvislého poškození, jehož důsledek se dá považovat za shodný s prvním případem.
- **Exploze bojové hlavice ve vzdálenosti větší než je kritická vzdálenost** – nedojde k souvislému poškození, poškozeny jsou jen jednotlivé prvky.

Při klasifikaci tohoto poškození byl použit pojem **kritická vzdálenost**. Jedná se o vzdálenost výbuchu bojové hlavice od letounu, u které vytváří roj střepin ještě souvislou plochu poškození.

4.1.1 Rozložení střepin v prostoru

Při řešení účinnosti střepinového děje je třeba znát počet střepin, které dopadnou do cíle při dané vzájemné poloze bojové hlavice a cíle. To závisí mimo jiného na charakteru rozložení střepin v prostoru.

V této práci je uvažováno zjednodušené rozložení střepin. Použité rozložení střepin je patrné na obr. 4.1.



Obr. 4.1. Použitý tvar rozptylu střepin

4.1.2 Definování směru příletu rakety k letounu

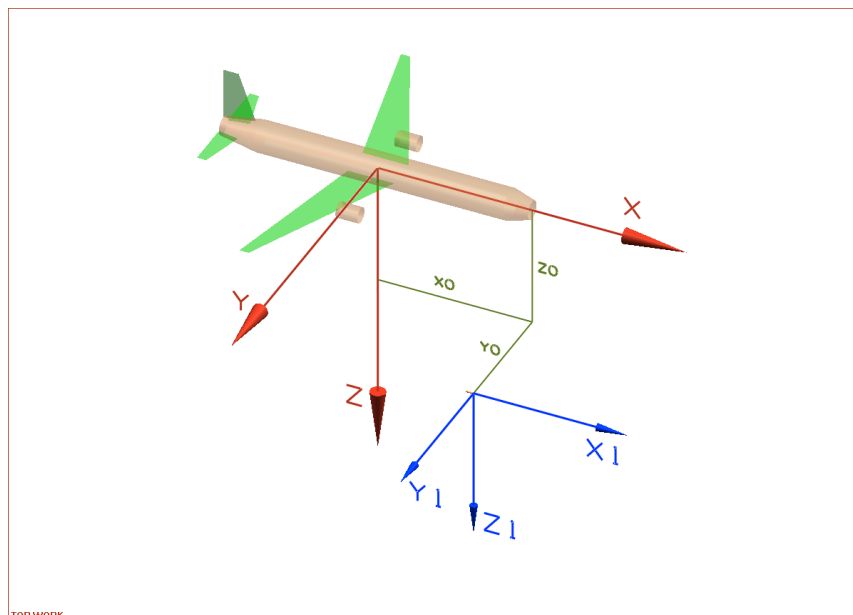
Raketa s bojovou hlavicí může k letounu přiletět z jakéhokoliv směru. Proto je potřeba vytvořit obecný model příletu střepin. Pro případ určení zasažené oblasti na letounu stačí uvažovat s rozptylem střepin až od okamžiku výbuchu. Trajektorie příletu rakety není důležitá, důležitá je pouze poloha vůči letounu v okamžiku výbuchu a okamžitý směr vektoru rychlosti rakety v tomto okamžiku.

Tato práce se tedy bude zabývat raketovým útokem až od okamžiku exploze tříštivé bojové hlavice. Práce je zaměřena na poškození letounu samotného a tento okamžik exploze bojové hlavice je tedy časem nula pro toto určení. Pro stanovení algoritmu určení účinku střepin zde bude popsán obecný postup [26].

Pro popis vzájemné polohy a vzájemného pohybu letounu a střepin bojové hlavice byly zavedeny dva souřadnicové systémy:

- **letounový souřadnicový systém** - pro letoun, označený XYZ
- **raketový souřadnicový systém** - pro střepiny, pro střepiny $X_1Y_1Z_1$

Tyto dva souřadnicové systémy jsou znázorněny na obrázku 4.2. Dále je ještě nutno definovat vzájemné pootočení souřadnicových systémů o úhly. Tímto pootočením se do výpočtu zavede směr, ze kterého raketa přilétá k letounu.



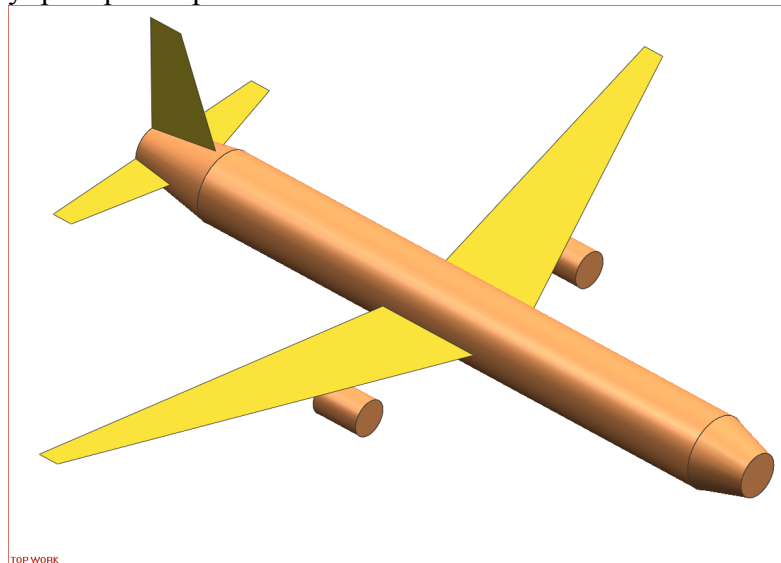
Obr 4.2 Posunutí souřadnicových systémů

4.1.3 Geometrie letounu

Geometrie letounu je rozdělena z důvodu zjednodušení výpočtu do několika celků. Jednotlivé plochy jsou popsány rovnicemi analytické geometrie, které poté vstupují do dalšího výpočtu. Letoun byl rozdělen na následující jednotlivé prvky:

- Trup letounu
- Křídlo
- Motorové gondoly
- Vodorovné ocasní plochy
- Svislé ocasní plochy.

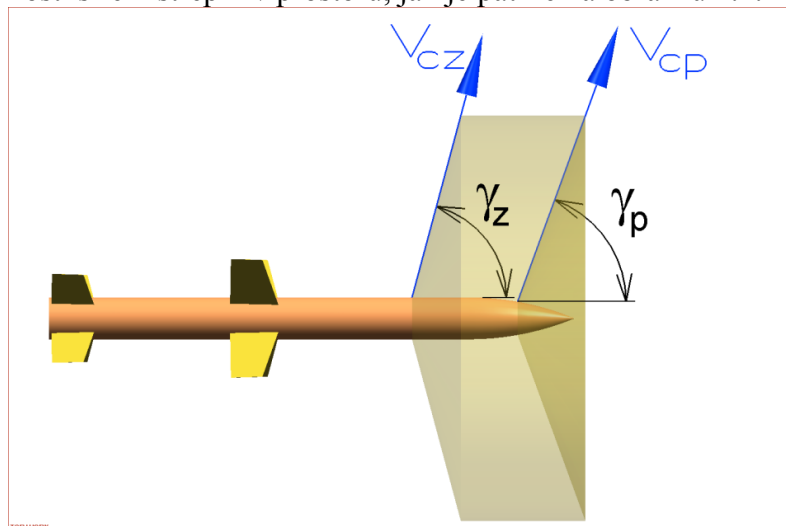
Použitá zjednodušená geometrie letounu je patrná z obr. 4.3. Tato geometrie může být chápána také jako jakási zjednodušující geometrická obálka letounu. Pro určení zasažené oblasti na letounu není ani detailnější popis potřeba. Počet střepin zasahující tuto obálku při uvažování tohoto zjednodušení může být poté použit při určení zásahu reálné konstrukce.



Obr. 4.3. Geometrie letounu

4.1.4 Geometrie rozptylu střepin

Plocha rozptylu střepin v prostoru je ohraničena předním a zadním čelem. Na těchto čelech jsou poté definovány rychlosti šíření střepin v prostoru, jak je patrné na obrázku 4.4.



Obr. 4.4. Směry rychlostí střepin

Pro výpočet těchto rychlostí jsou nejdříve stanoveny pohybové rovnice střepiny. Budeme uvažovat střepinu letící přímočarým pohybem. Úpravou a integrací pohybových rovnic poté získáme vztahy pro určení okamžité rychlosti střepiny na předním nebo zadním čele.

Výpočet je poté prováděn pro jednotlivá čela odděleně. Požadovanou hodnotou je poloha střepin a ta je vlivem pohybu těchto střepin s měnícím se časem proměnná. Proto je do rovnic dosazován časový krok a vypočítá se poloha rozptylu střepin v jednotlivých časových krocích.

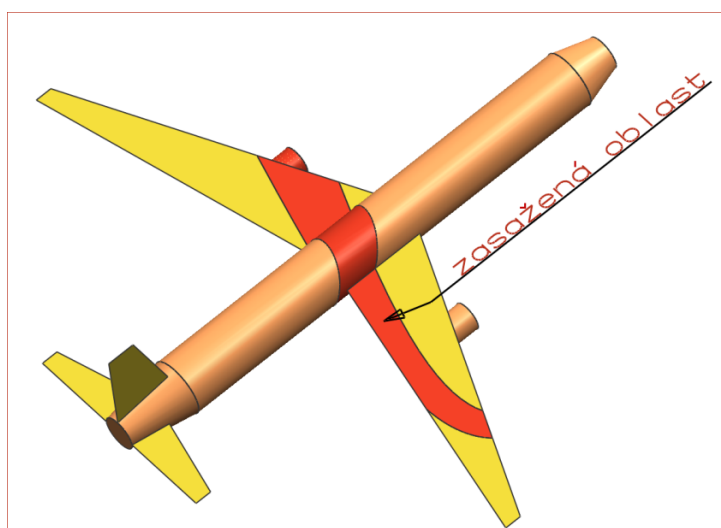
V každém okamžiku vytvářejí střepiny šířící se po obvodu na jednotlivých čelech rozptylu střepin pravidelný geometrický útvar a to kružnici.

4.1.5 Výpočet zasažené oblasti

Výpočet sám se skládá z určení průniku geometrie letounu s geometrií rozptylu střepin. Pro každou část letounu je proveden oddělený výpočet sestávající z určení průniku geometrie letounu s dvojicí kružnic charakterizujících rozptyl střepin. Tento výpočet je proveden pro jednotlivé časy dané definovaným časovým krokem.

Pro nalezení průniku bylo potřeba sestavit soustavu rovnic. V těchto rovnicích se vyskytuje časová proměnná t . Za tuto proměnnou jsou dosazovány postupně hodnoty v rozmezí od 0 až po předem stanovenou maximální hodnotu, kdy je předpokládáno, že střepiny letoun již zasáhly. Tyto hodnoty jsou dosazovány s přírůstkem předem stanoveného časového kroku.

Takto získané hodnoty průniku se pak nejlépe zpracují v libovolném tabulkovém procesoru. Je možné z nich vykreslit zasaženou oblast, jak je patrné na obrázku 4.5.



Obr. 4.5. Zasažená oblast letounu

Jsou tedy získány body popisující okraje zasažené plochy. Ještě je potřeba získat i počet střepin v této oblasti. Vypočítá se z počáteční hustoty střepin. Jedná se o počet střepin v obvodové ploše rozptylu střepin.

Podle hustoty střepin v zasažené oblasti mohou být poté uvažovány dva následující případy poškození draku od střepin bojové hlavičky:

- **Souvislé poškození** – v draku letounu vzniká souvislý otvor. Tento souvislý otvor vzniká při kritické hustotě střepin ρ_k .
- **Částečné poškození** – drak není souvisle poškozen, jsou v něm pouze jednotlivé průstřely. Podle zasažené oblasti se určí prvky konstrukce v této oblasti a podle hustoty střepin se poté určí pravděpodobnost jejich zásahu.

V další práci se soustředíme na částečně poškozenou konstrukci. Souvislé poškození není třeba více rozebírat, všechny prvky konstrukce jsou zničeny a ztrácí schopnost plnit svou funkci. Při částečném poškození však jednotlivé zasažené prvky konstrukce nemusí být zničeny úplně nebo

mohou být zálohovány. Proto je potřeba zjistit míru poškození jednotlivých částí konstrukce způsobených jednotlivými střepinami a jejich vliv na schopnost letounu pokračovat v letu.

5 EXPERIMENTÁLNÍ URČENÍ POŠKOZENÍ DRAKU STŘEPINAMI

Po nalezení zasažené oblasti na letounu je dalším krokem k určení rozsahu poškození stanovení účinku střepin na drak letounu [25]. V dalších kapitolách bude popisováno numerické určení tohoto poškození, ale z důvodu správného odladění matematického modelu je vhodné provést stanovení tohoto poškození nejdříve experimentálně.

5.1 VZOREK

Vzorek byl vyroben s přihlédnutím ke stavbě současných civilních transportních letounů Airbus. Vzorek je tedy část poloskořepinové konstrukce tvořené potahem vyztuženým podélníky a přepážkami.

Jako materiál byl zvolen stále ještě nejpoužívanější materiál v civilním dopravním letectví, tedy duralový plech spojovaný duralovými trhacími nýty s ocelovým trnem.

Pro připravenou část konstrukce bylo ještě potřeba připravit nosnou konstrukci, ve které bude vzorek uchycen při experimentu. Vzorek uchycený do nosné konstrukce je zobrazen na obr. 5.1.



Obr. 5.1. Nosná konstrukce vzorku se vzorkem

5.2 STŘEPINA

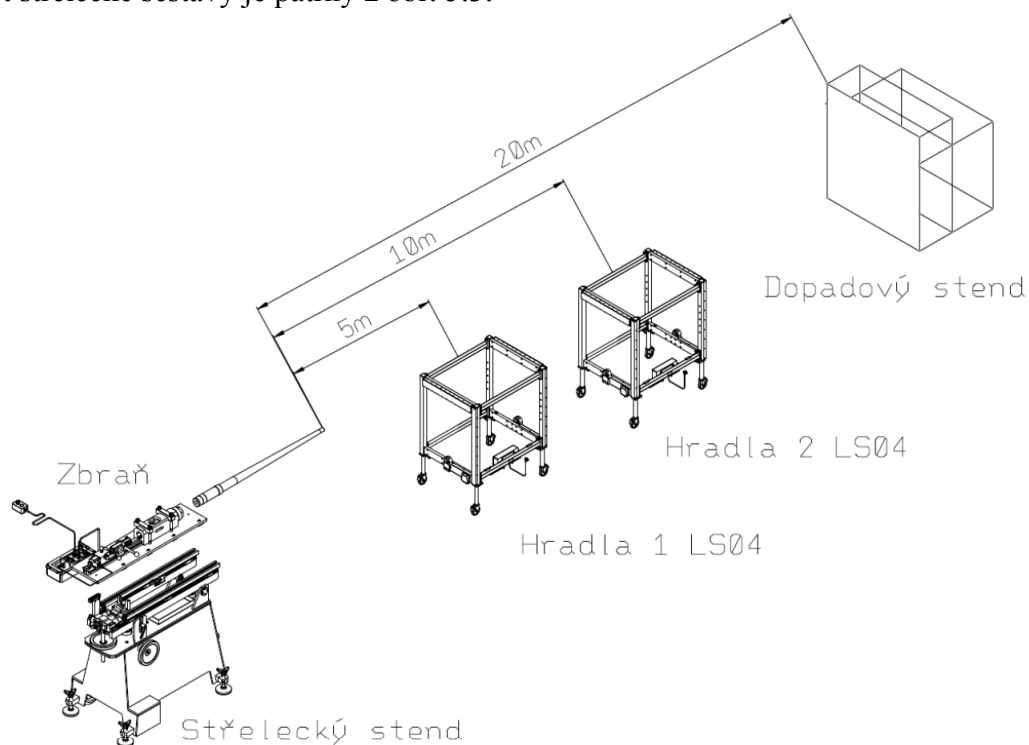
Pro ostřelování vzorku byly použity jednotlivé střepiny. Použita byla ocelová střepina FSP12,7. Přesný tvar je patrný z obr. 5. 2.



Obr. 5.2 Různé pohledy na střepinu

5.3 STŘELECKÁ SESTAVA

Koncept střelecké sestavy je patrný z obr. 5.3.

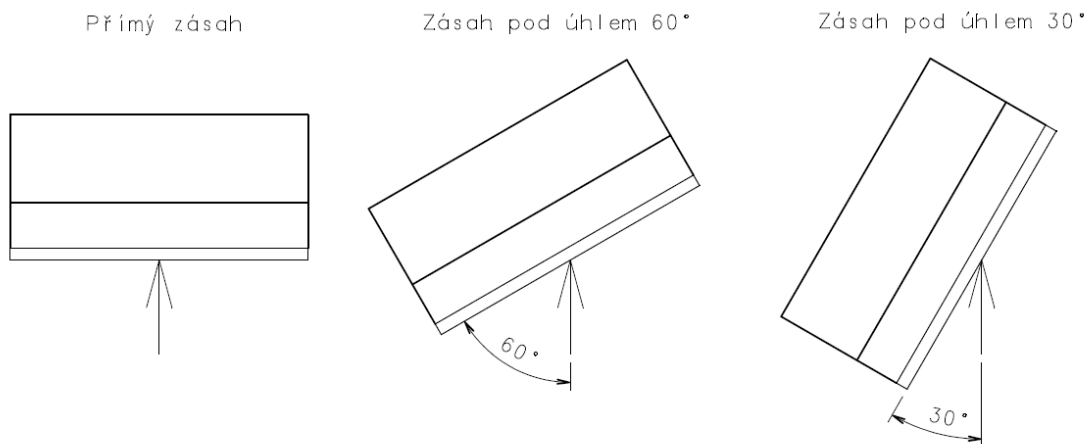


Obr. 5.3. Střelecká sestava

Střelecká sestava se skládá z několika částí. Základem je střelecký stand, na kterém je připevněna zbraň. Na dráze střepiny jsou potom dvoje hradla, kde dochází k měření rychlosti střepiny. Nakonec je již dopadový stand s uchyceným vzorkem.

5.4 PRŮBĚH EXPERIMENTU

Při jednotlivých pokusech docházelo k zásahu vzorků střepinami s různými rychlostmi. Zároveň byla snaha zasáhnout různé kombinace konstrukčních prvků vzorku. Zároveň byl také měněn směr dopadu střepiny na vzorek. Směr dopadu byl použit přímý a pod úhlem 30° a 60°. Tento úhel natočení vzorku je patrný z obr. 5.4.



Obr. 5.4. Použitá natočení vzorku

5.5 VÝSLEDEK EXPERIMENTU

Při jednotlivých střelách bylo jejich rozmístění určováno s přihlédnutím k hodnocení rozdílu poškození jednotlivých konstrukčních prvků při různých rychlostech střepin a různých úhlech dopadu.

Na obrázku 5.5. je jasně patrné poškození při jednom z pokusů.



Obr. 5.5. Poškození konstrukce střepinou

V průběhu experimentu byly zjištěny následující závěry:

- Jednotlivá střepina poškodí pouze prvek, který je přímo zasažen. Nedochozí k většímu ovlivnění okolní struktury
- Rozměr poškození odpovídá rozměru střepiny
- Při průrazu materiálu vznikají druhotné střepiny, které působí náhodné poškození

- Důsledek poškození nezávisí na rychlosti střepiny (v pozorovaném rozsahu rychlostí)
Rozsah, závažnost a způsob poškození určené tímto experimentem posloužily za dobrý podklad pro numerický výpočet, který bude popsán v dalších kapitolách.

6 NUMERICKÉ URČENÍ POŠKOZENÍ DRAKU STŘEPINAMI

Po experimentálním určení účinku střepin na drak letounu je nyní možné na základě zjištěných rozsahů poškození sestavit a odladit numerický model poškození. **Numerické řešení umožňuje mnohé opakování pokusů s minimálními náklady oproti experimentu.**

6.1 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ A MSC DYTRAN

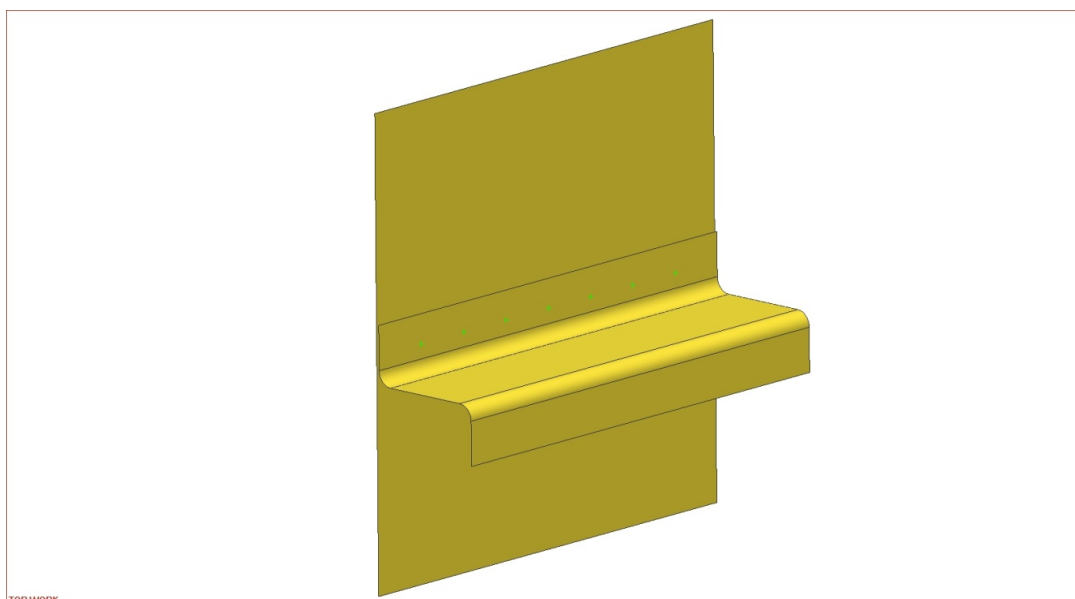
Jako nejvhodnější nástroj na teoretické řešení míry poškození primárního nosného systému letounu byl zvolen výpočet poškození pomocí metody konečných prvků. Tento nástroj je dnes plně využíván v konstrukci a dimenzování takřka ve všech oblastech strojírenství.

Problém, který byl řešen, je průstřel tělesa střepinou, tedy značně dynamický jev. Proto byl jako nejvhodnější řešič zvolen produkt od společnosti MSC a to program DYTRAN. Řešiče od této společnosti jsou hojně používány v leteckém průmyslu. Současně byl použit také pre-processor a post-processor od této společnosti PATRAN.

6.2 MODEL KONSTRUKCE

V experimentu byly jednotlivé střepiny vystřelovány proti vyztuženému potahovému panelu. Takovýto panel poté může být namodelován pomocí CAD systému na počítači a poté v pre-processoru PATRAN může být vytvořena konečnoprvková síť.

Jelikož ale při experimentu bylo použito ostřelování jednotlivými střepinami, není potřeba pro výpočet použít celý model konstrukce. Proto byl vytvořen i model značně jednodušší zobrazující pouze část konstrukce. Zjednodušený model je na obr. 6.1. Tento zjednodušený model zobrazuje část konstrukce, na které je podélník a potah.

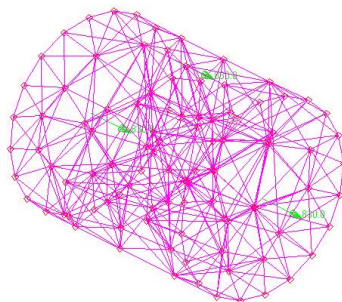


Obr. 6.1. Model části konstrukce

Na základě geometrie z tohoto modelu byl poté v preprocesoru PATRAN vytvořen konečno-prvkový model.

6.3 MODEL STŘEPINY

Střepina byla modelována přímo v programu PATRAN jako válcové objemové těleso. Na toto těleso o rozměrech popsanych v kapitole 5.3 byla poté aplikována síť konečných prvků tvaru čtyřstěňů. Výsledná síť je na obr. 6.2.



Obr. 6.2. Síť aplikovaná na válcovou střepinu

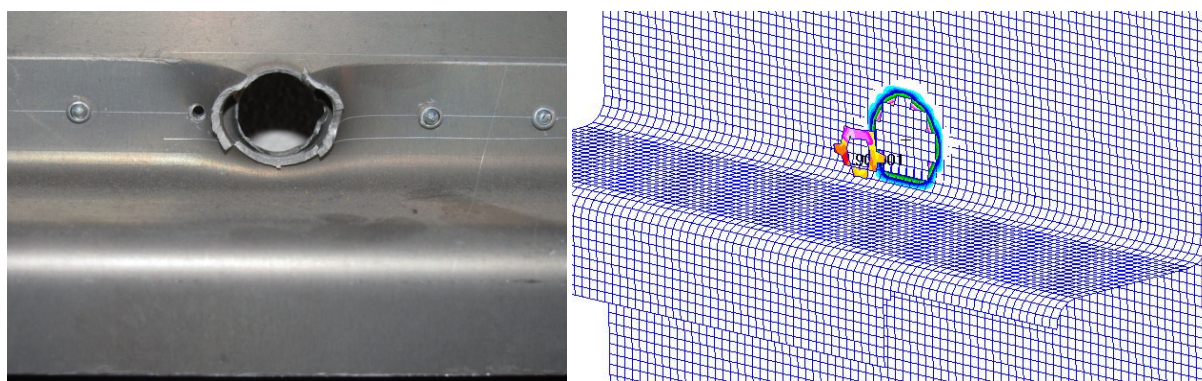
Ke kompletaci soustavy zbývalo pouze doplnit rychlost střepin, kterou se střepiny pohybují vůči konstrukci trupu letounu.

6.4 VYPOČÍTANÉ POŠKOZENÍ – PŘÍMÝ ZÁSAH

Prvním počítaným případem poškození byl přímý zásah podélníku.

Připravený model s počáteční rychlostí střepiny je poté převeden do řešiče DYTRAN. Výpočet je zaměřen na určení deformace konstrukce a to jak elastické tak plastické. Hodnotí se míra poškození konstrukce a velikost poškozené plochy, která již ztratila schopnost přenosu letových zatížení.

Při porovnání tohoto poškození získaným výpočtem s výsledky experimentu je již na první pohled patrná shoda a na základě této shody i správnost nastavení modelu. Toto porovnání je na obrázku 6.3.



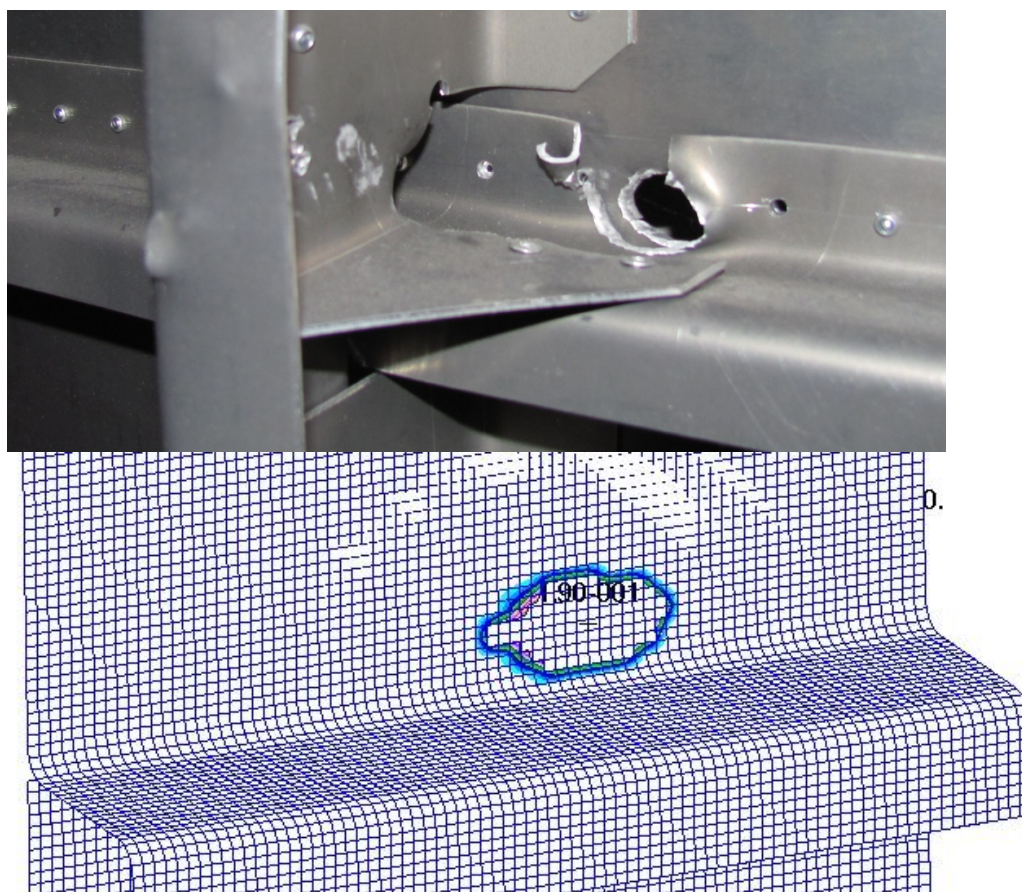
Obr. 6.3. Porovnání experimentu a výpočtu

Z tohoto srovnání je patrná shoda v rozsahu účinku střepiny a míry poškození konstrukce. V obou případech došlo ke vzniku otvoru rozměru odpovídajícím velikosti střepiny a ke vzniku velmi malé oblasti plastické deformace.

6.5 VYPOČÍTANÉ POŠKOZENÍ – ZÁSAH POD ÚHLEM

V tomto případě byl simulován zásah konstrukce pod úhlem. Při experimentu se natočila nosná konstrukce držící vzorek a tímto bylo dosaženo jiného úhlu dopadu. Stejný postup byl použit i v případě numerického modelu. CAD model byl ještě před vložením do pre procesoru PATRAN otočen o požadovaný úhel. V programu PATRAN již poté stačilo nastavit všechny počáteční a okrajové podmínky shodné jako v předešlém případě. Tento přístup je vhodný hlavně kvůli zadávání počáteční rychlosti střepiny. Rychlost se zadává ve vektorovém tvaru, a jestliže se natočí celý vzorek, střepina se může pohybovat ve směru rovnoběžném se souřadným systémem. Do vektoru rychlosti se pak v tomto směru zadá přesná velikost rychlosti a ostatní složky budou nulové.

Při porovnání s experimentem můžeme opět vidět značnou shodu, která ukazuje na správně vytvořený numerický model. Na obrázku 6.4. je porovnání výsledku experimentu a výpočtu.



Obr. 6.4. Porovnání experimentu a výpočtu

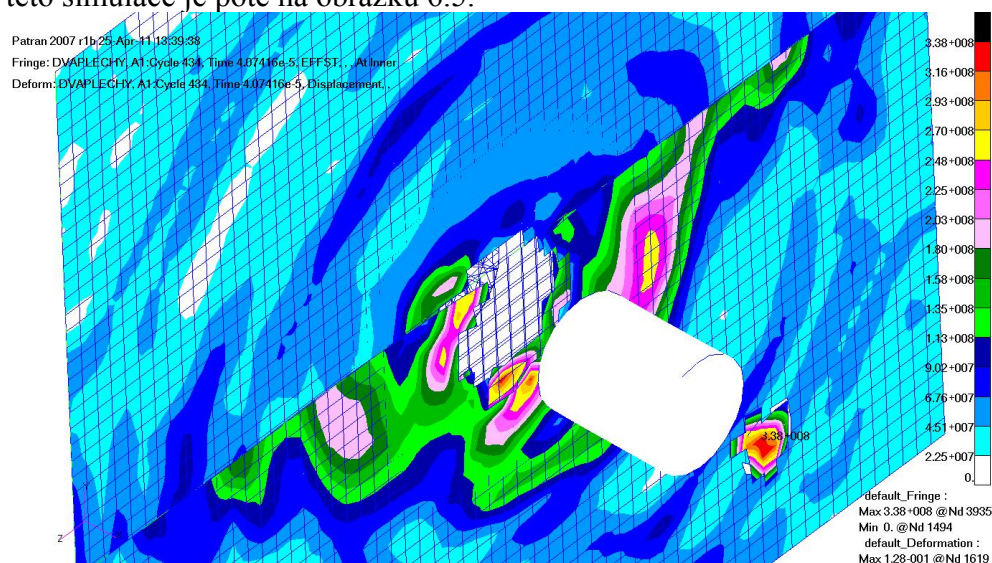
V tomto případě je vidět značná shoda, co se poškození potahu týče. U experimentu došlo ke značné deformaci pásnice podélníku, která není na obrázku patrná. To je způsobeno menším

rozměrem pásnice při porovnání se střepinou. V případě lepeného spoje by se sice vzorek při experimentu choval podobně jako při výpočtu modelu metodou konečných prvků, ale pro ověření správnosti modelů byl proveden ještě jeden výpočet, který je popsán v následující kapitole.

6.6 VYPOČÍTANÉ POŠKOZENÍ – SPOJENÍ DVOU PLECHŮ

Jak bylo v minulé kapitole popsáno, model kdy je uvažováno pevné spojení pásnice podélníku s potahem plně neodpovídá výsledku experimentu. Tato rozdílnost je způsobena zjednodušením v přípravě modelu a u reálné konstrukce by z důvodu podlepení spoje nebyla tak výrazná. Pro ověření vhodnosti použití metody konečných prvků spolu s řešičem DYTRAN byl ale proveden ještě jeden výpočet. Byl sestaven model, který popisuje spojení dvou plechů. Tímto modelem bude simulován vliv přinýtované pásnice podélníku k potahu.

Výsledek této simulace je poté na obrázku 6.5.



Obr. 6.12. Poškození konstrukce a elastická deformace

Na tomto obrázku je vidět větší deformace plechu s volnou jednou stranou, stejně jak bylo pozorováno při experimentu. Metoda konečných prvků je tedy schopna věrně popsat i takto zpřesněný model.

6.7 ZHODNOCENÍ NUMERICKÉHO URČENÍ POŠKOZENÍ

V předchozích kapitolách byla na jednotlivých příkladech dokumentována vhodnost použití metody konečných prvků a její shoda s reálným experimentem. Bylo zkoumáno poškození části konstrukce jednotlivou střepinou. Na základě zkušeností s jednou střepinou je již možno ve výpočtu pokračovat i s více střepinami najednou.

Z jednotlivých výpočtů, které jsou i potvrzeny experimentem, můžeme definovat několik závěrů, co se poškození střepinou týče:

- Střepina způsobí poškození pouze přímo zasažené části konstrukce
- Velikost poškozené oblasti odpovídá přibližně rozměrům střepiny
- Přímou zasaženou část konstrukčního prvku je zničena a ztrácí schopnost přenosu zatížení

- Při zásahu konstrukce více střepinami dostatečně vzdálenými od sebe nedochází k součtu účinků těchto střepin

Z těchto závěrů můžeme nyní vycházet v následujících kapitolách při určování vlivu poškození prvku konstrukce na změnu únosnosti konstrukce jako celku.

7 VLIV POŠKOZENÝCH PRVKŮ NA ÚNOSNOST KONSTRUKCE

Při určování vlivu poškození konstrukce rojem střepin je potřeba nejdříve určit vliv poškození jednotlivých prvků na únosnost konstrukce jako celku. Pro určení významnosti prvků konstrukce bude použita analýza způsobů a důsledků poruchových stavů FMEA popřípadě její rozšíření FMECA. Nakonec bude tento model rozšířen o využití fuzzy logiky.

7.1 ÚNOSNOST POŠKOZENÉ KONSTRUKCE

V předchozích kapitolách byly experimentálně a výpočtově určeny rozsahy poškození, které způsobí střepina. Střepina, která poškodí jeden nebo více prvků konstrukce způsobí snížení únosnosti konstrukce. Jednotlivé poškození nemusí ještě vést ke zhroucení konstrukce a ke katastrofické události. V dnešní době jsou u velkých dopravních letadel používány většinou poloskořepinové konstrukce. Výhodou této koncepce je jistá zálohovanost systému. Zatížení není přenášeno jedním prvkem. Na přenosu zatížení se podílí celá soustava prvků, kdy vyřazení jednoho prvku ze soustavy nemusí zákonitě vést k velkým provozním omezením.

V této kapitole bude opět jako příklad popisován vyztužený potahový panel. Pro zjednodušení, které je ale dostačující pro nastínění postupu při určování změny únosnosti, byl zvolen potah vyztužený třemi nosníky.

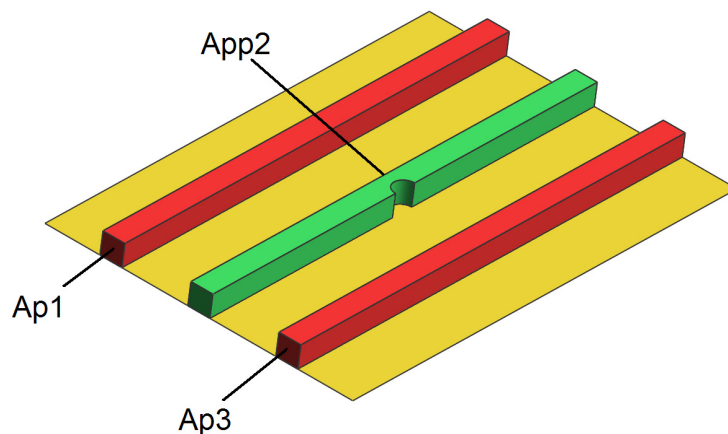
Poškození prvku takovéto konstrukce znamená změnu geometrických charakteristik. Ve výpočtu byly zanedbávány přenosy zatížení v potahu a stojinách nosníků. Jako hlavní nosné prvky tedy jsou pásnice nosníků. Za jejich hlavní geometrickou charakteristiku byla zvolena plocha příčného průřezu pásnice.

Reálné konstrukce jsou zatížené kombinovaným zatížením, v této práci bylo použito zjednodušení zatížení pouze na normálové síly přenášené nosníky.

Únosnost takovéto konstrukce nechť je definována jako maximální dovolené napětí jednotlivých prvků konstrukce, při zjednodušení zde použitých jednotlivých pásnic nosníků. Toto maximálně dovolené napětí je označováno jako kritické napětí. Při tomto napětí dochází k porušení schopnosti pásnic přenášet zatížení.

Rozdíl mezi vypočtenými reálnými napětími a kritickým napětím udává statickou zásobu systému. Tato zásoba nám udává, o kolik se může zvýšit napětí v jednotlivých pásnicích, aniž by došlo k porušení pásnic.

Při zasažení pásnice nosníku střepinou dochází ke změně jejího příčného průřezu. V předchozích kapitolách bylo určeno, že střepina vytváří dosti ohraničenou oblast poškození. Zbývající neporušená část pásnice nosníku může nadále přenášet zatížení bez omezení, když neuvažujeme šíření únavových trhlin. Konstrukce po zásahu střepinou je na obrázku 7.1.



Obr. 7.1. Porušení pásnice střepinou

Střepina porušila jednu pásnici (na obrázku 7.1 zobrazena zeleně) a tím změnila její průřez, který se snížil a podle toho se i snížila síla, kterou tato pásnice přenáší.

Naopak zbylé dvě neporušené pásnice (na obrázku 7.1 zobrazeny červeně) budou zatíženy silou větší. Změna rozložení zatížení samozřejmě vede i ke změně rozložení napětí v jednotlivých pásnicích. Napětí v pásnicích roste.

To ovšem nemusí znamenat zhroucení celého panelu. Jak již bylo popsáno, mezi skutečným napětím konstrukce a kritickým napětím je jistá statická zásoba. Při porušení konstrukce je právě možné z této zásoby čerpat. Při provozu tedy nemusí znamenat snížení průřezu jedné pásnice překročení kritických napětí v celé konstrukci. Kritické napětí konstrukce je ovšem počítáno pro mezní případy zatížení. Běžné provozní zatížení je mnohem menší. Při poruše konstrukce je tedy další možností, která zabrání destrukci soustavy, jednoduše snížit zatížení natolik, aby se nepřekročilo kritické napětí v pásnicích. Znamená to zavedení omezení pro pilota, tedy omezení manévru a podobně.

Za použití stejného přístupu se může přistupovat i k vícenásobnému poškození konstrukce.

7.2 DŮSLEDEK POŠKOZENÍ PRVKU POMOCÍ METODY FMEA/FMECA

V současnosti metoda FMEA/FMECA patří k nejužívanějším metodám prediktivní analýzy spolehlivosti a je využívána v řadě oborů a to nejen pro analýzu technických systémů, ale také pro analýzu procesů (včetně lidské činnosti) a softwaru[20].

V případě určování vlivu poškození prvku střepinou se nejedná o typické určování spolehlivosti. Metody FMEA/FMECA jsou spíše používány pro analýzu systémů. V tomto případě může být ale i vyztužený potahový panel považován za systém skládající se z několika prvků. Termín porucha používaný v metodě FMEA/FMECA bude nahrazen termínem poškození.

Hlavní cíle metody FMEA/FMECA v případě hodnocení vlivu poškození prvku střepinou budou následující:

- Posouzení důsledků poškození jednotlivých prvků
- Hodnocení významnosti nebo kritičnosti poškození prvku

Experiment a numerický výpočet popsané v předešlých kapitolách nastínil, že jednotlivá střepina vždy nepoškodí celý prvek. Celý prvek je poškozen pouze v případě zásahu více střepinami najednou. Pro potřeby FMEA/FMECA je tedy vhodné použít pro hodnocení prvku hodnocení poškození jeho částí:

- Potah
- Pásnice přepážky
- Stojina přepážky
- Pásnice podélníku
- Stojina podélníku

Takovéto jemné dělení již umožňuje detailnější analýzu jednotlivých poškození. Jedná se o prvotní analýzu, díky které se snadno určí kritická místa, na které je potřeba se dále zaměřit.

Pro hodnocení důsledků poškození se může použít standardní dělení metody FMEA/FMECA:

- **Nezávažné (MINOR)** – nezávažné poškození zahrnující například malé snížení rezerv bezpečnosti, malé zvýšení pracovního vytížení posádky.
- **Závažné (MAJOR)** – poškození snižující schopnost letounu nebo posádky zvládat nepříznivé provozní podmínky, dojde k výraznému snížení rezerv bezpečnosti a funkčních schopností.
- **Katastrofické (CATASTROPHIC)** – poškození bránící bezpečnému dokončení letu a přistání.

Nejvhodnější zpracování metody FMEA je do podoby tabulky. V této tabulce se hodnotí vliv poškození prvku a jeho funkce na celkové poškození konstrukce.

Při expertním přístupu hodnocení poškození nebylo shledáno žádné poškození stupně katastrofické (CATASTROPHIC). To je způsobeno předpokladem, že v každé konstrukci je více obdobných prvků, například více přepážek. Tyto další prvky by při destrukci jednoho byly schopny přenést zatížení, které bylo přenášeno tímto prvkem. Zatížení na tyto prvky by bylo zvýšené, jak bylo ukázáno v kapitole 7.1. a byla řešena otázka, jestli zbylá konstrukce toto zatížení ještě bude schopná přenášet nebo dojde ke zhroucení konstrukce jako celku.

Zároveň byl také uvažován předpoklad, že zásah části prvku znamená jeho destrukci. Při experimentu se ale ukázalo, že k destrukci dochází pouze u přímo zasažené části. Prvek, který je zasažen jen částečně tedy nemusí úplně přijít o schopnost plnit svou funkci a přenášet zatížení. Pojem zničený, nezničený je v tomto případě dosti nejasný. Je tedy vhodné určování stupně poškození rozšířit ještě o teorii, která by tuto nejasnost postihovala. Touto teorií je fuzzy logika, která bude popisována v následující kapitole.

7.3 VYUŽITÍ FUZZY LOGIKY PŘI URČOVÁNÍ STUPNĚ POŠKOZENÍ KONSTRUKCE

Hodnocení poškození prvku se nedá jednoduše rozdělit na přiřazení dvou množinám: prvek neporušen, prvek zničen. Prvek konstrukce může být poškozen jen částečně, jeho funkce tím nemusí být vůbec omezena, ale může být snížena jeho životnost z důvodu šíření poruchy a podobně. Je potřeba popsat stupeň poškození prvku pokud možno spojitě, nikoliv diskrétně. V tuto chvíli přichází na řadu fuzzy logika. Fuzzy logika zavádí pojem funkce příslušnosti. Pomocí

této funkce se stanoví, že prvek patří do množiny jen částečně a zároveň definuje i míru, nakolik je prvek součástí dané množiny. To znamená, že je definováno, s jakým stupněm pravděpodobnosti prvek do množiny náleží.

Na Univerzitě obrany v Brně byl vypracován postup na použití fuzzy logiky pro analýzu bojového poškození letadel [24]. Modifikovaný postup zde bude použit.

Výhodou fuzzy logiky je, že je schopna pracovat s neznámými nikoliv pouze v numerických hodnotách, ale i ve slovních vyjádřeních. Základní jednotkou zde použitou je jazyková proměnná, která je stanovena expertním odhadem.

Při aplikaci fuzzy logiky pro určování hodnoty poškození konstrukce se zavádí dvě základní charakteristiky sledovaného prvku:

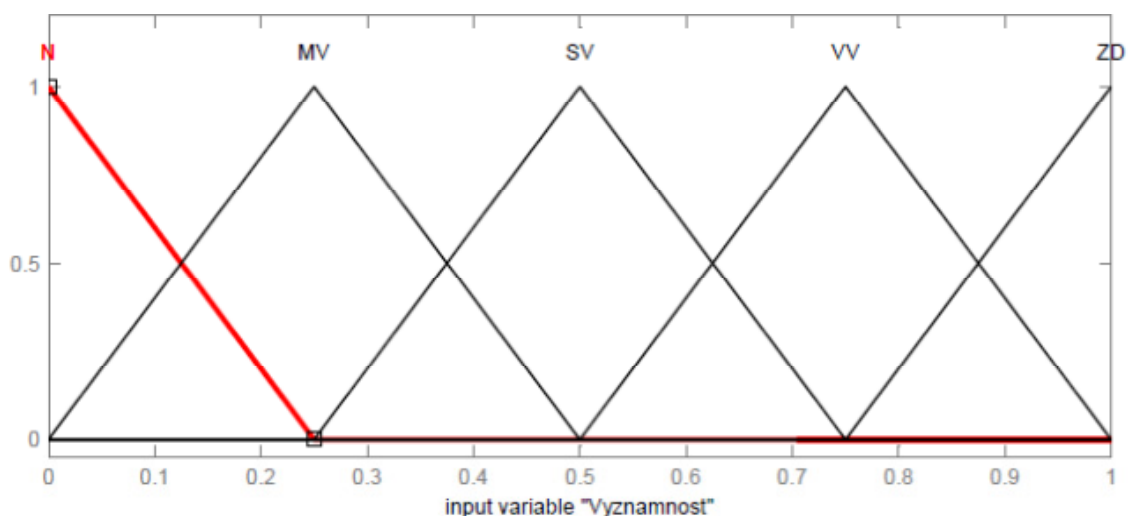
- Významnost prvku
- Rozsah poškození prvku

7.3.1 Významnost prvku

Ačkoliv jsou všechny prvky konstrukce pro provoz letounu a jeho schopnost plnit funkci důležité, významnost jednotlivých prvků je různá. Destrukce například závěsu křídla povede bezpodmínečně k havárii letounu, ale na druhou stranu poškození sekundární struktury nemusí vést k žádným letovým omezením. Například poškození podvozku nemusí vést k žádným komplikacím v letové fázi, ale vede k velkým problémům při přistání, kdy je zvýšena zátěž jak na celý letoun, tak na práci posádky. Jiné prvky konstrukce jsou zase zálohované, takže jejich zničení vede pouze k většímu zatížení okolní konstrukce.

Stanovit vhodně stupnici významnosti závisí na zkušenostech, neboť se jedná o expertní odhad. Pro potřeby této práce bylo zvoleno dělení významnosti prvků do pěti skupin. Jednalo se o prvek nevýznamný až životně důležitý.

Jednotlivým třídám významnosti prvku jsou přiřazeny funkce příslušnosti, které definují, nakolik prvek do dané třídy náleží. Funkce příslušnosti se sestaví pro každou třídu významnosti prvku a tím se získá první vstup do výpočtu s pomocí fuzzy logiky. Funkce příslušnosti pro významnost prvku jako první vstup výpočtu jsou na obrázku 7.2.



Obr. 7.2. Funkce příslušnosti významnosti prvku

7.3.2 Rozsah poškození prvku

Rozsahem poškození jsou chápány geometrické charakteristiky, které střepina způsobí na konstrukci letadla. Při střeleckém experimentu se zjistilo, že střepina vždy nezničí prvek konstrukce kompletně. Dojde ke zničení pouze přímo zasažené části. Opět se dostáváme k neurčitému hodnocení rozsahu poškození prvku. Poškození se dá jednoduše popsat verbálně jako malé, střední, velké, úplné. Proto je toto hodnocení rozsahu poškození popsáno pomocí fuzzy logiky a funkcí příslušnosti.

Schopnost fuzzy logiky spojitě popsat rozsah poškození prvku přímo vede k detailnějšímu popisu rozsahu poškození prvku. Rozsah poškození bylo definováno v pěti případech od bezvýznamného po katastrofické.

7.3.3 Určení poškození konstrukce pomocí fuzzy logiky

Při sestavování fuzzy modelu je nejdříve nutné definovat výstupní charakteristiku. Zde zjišťovaným parametrem je pokles schopnosti konstrukce plnit svou funkci (přenášet zatížení). Stejně jako dvě vstupní charakteristiky byl sestaven jako pětistupňový. Hodnoty schopnosti konstrukce přenášet zatížení byly sestaveny v rozsahu od „bez omezení“ po „neschopnost plnit funkci“.

Pro výstupní charakteristiku jsou sestaveny funkce příslušnosti. Tvar funkcí příslušnosti byl opět zvolen jako trojúhelníkový.

Jsou stanoveny vstupní a výstupní charakteristiky fuzzy systému. Dalším bodem při řešení je sestavení pravidel udávajících závislosti mezi jednotlivými charakteristikami. Při definování těchto pravidel se používají logické operátory „IF“ („když“), „AND“ („a“), „OR“ („nebo“) a „THEN“ („potom“). Sestavení těchto pravidel je závislé na zkušenosti.

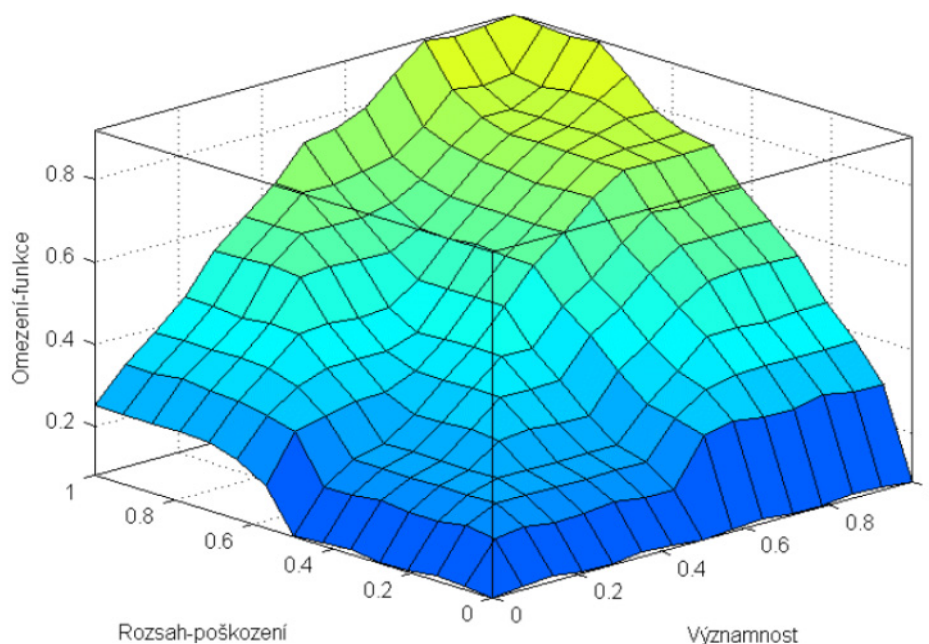
Při stanovení těchto pravidel se vycházelo z jednoduchých předpokladů. Když je prvek bezvýznamný, tak ani velké poškození nevede k omezení funkce celé sestavy prvků. A naopak když je prvek životně důležitý, tak i malé poškození může mít velký vliv na schopnost konstrukce dále plnit svou funkci.

Pravidla jsou potom jen jednoduchým přepisem vět jako například:

„Když je prvek málo významný a utrpí malé poškození, potom konstrukce jako celek dále plní funkci s malým omezením.“

Obdobné výroky byly stanoveny pro všechny kombinace významností prvků a rozsahu poškození prvků, tedy všechny kombinace vstupních charakteristik. K těmto kombinacím poté byla vybrána hodnota schopnosti konstrukce přenášet zatížení. Získáme tak rozsáhlý soubor pravidel. Ten dává předpoklad k hladkému a spojitému řešení fuzzy soustavy.

Výsledný graf popisující vliv významnosti prvku a rozsahu poškození prvku na schopnost konstrukce přenášet zatížení je na obrázku 7.3.



Obr. 7.3. Graf omezení schopnosti konstrukce přenášet zatížení

Na grafu jsou na horizontálních osách hodnoty významnosti prvku a rozsahu poškození prvku a na vertikální ose je hodnota omezení funkce konstrukce.

Graf je zpracován pro celý rozsah významnosti prvků, ale je z něj obtížné přesně odečíst charakteristiku pro jednotlivý prvek. Z tohoto důvodu je vhodné provést řez tímto grafem pro významnost konkrétního prvku. Získá se diagram popisující stupeň poškození konstrukce v závislosti na stupni poškození prvku.

V této kapitole byl pomocí fuzzy logiky řešen vliv poškození jednoho prvku. Aparát fuzzy logiky může být dále rozšířen na hodnocení vlivu poškození většího počtu prvků konstrukce najednou. V této práci tato problematika z důvodu rozsahu již není dále rozebírána.

8 ZÁVĚR

Teroristické útoky patří neoddiskutovatelně k vážným hrozbám pro civilní dopravní letouny. Tato práce si nekladla za cíl komplexně popsat řešení zvýšení bezpečnosti civilní letecké dopravy, ale stala se součástí většího programu řešeného na Katedře letecké a raketové techniky University obrany. V kapitole 2 této práce byly stanoveny následující cíle a tyto cíle byly v dalších kapitolách analyzovány a vyřešeny:

- *analýza typů, pravděpodobností a důsledků teroristických útoků* – v kapitole 3 byly analyzovány jednotlivé možnosti teroristických útoků na letoun. Jako nejnebezpečnější byl stanoven útok tříštivou bojovou hlavicí rakety.

- *rozvoj teorie k určení polohy poškození, jeho rozsahu a významnosti* – v kapitole 4 této práce byl definován algoritmus určení poškozené části letounu v závislosti na místě výbuchu

tříštivé bojové hlavice. Poškození bylo definováno jako souvislé nebo částečné, kdy důležitým faktorem pro klasifikaci tohoto poškození je kritická vzdálenost výbuchu.

- *experimentální určení rozsahu poškození* – byl proveden střelecký experiment, při kterém byl ostřelován vzorek odpovídající vyztuženému potahovému panelu jednotlivými střepinami. Byly provedeny zásahy střepinami o různých rychlostech a úhlech dopadu. Vliv poškození na nosnou konstrukci byl poté analyzován.

- *rozpracování teorie numerického určení rozsahu poškození a jeho porovnání s experimentem* – jako nástroj pro numerické určení rozsahu poškození byla použita metoda konečných prvků. Postup výpočtu je uveden v kapitole 6.

- *rámcový návrh metodiky pro hodnocení okamžitého stavu letounu, poškozeného teroristickým útokem* – poslední, sedmá kapitola této práce se zabývá vlivem poškození prvků na únosnost konstrukce. Jsou analyzovány důsledky poškození prvků metodou FMEA/FMECA a nakonec je za použití fuzzy logiky určení vlivu jednotlivých prvků na schopnost konstrukce přenášet letová zatížení.

Jak již bylo výše uvedeno, tato práce se stává nedílnou součástí programu řešeného na Katedře letecké a raketové techniky University obrany. Tento program se zabývá okamžitým vyhodnocováním bojového poškození letadel. Koncepce tohoto postupu byla uvedena na obr. 2.1.

Podstatou vyhodnocování bojových poškození letadel je snímání již zasaženého místa. Po vyhodnocení by bylo možné pilotům podat informaci o závažnosti poškození. V případě potřeby by byla stanovena letová omezení, s nimiž se může pokračovat v letu a za kterých je možné realizovat přistání. U vojenských letounů je i možnost výsledku analýz okamžité opuštění letounu katapultáží. U dopravních letounů bohužel tato možnost není, proto jedinou alternativou je pokus o přistání.

Příklady z reálných teroristických útoků nám naštěstí ukazují, že při zásahu civilního dopravního letounu tříštivou bojovou hlavicí nemusí dojít ke katastrofickému poškození draku letounu. S letounem bylo většinou teoreticky možné přistát. Poškození systémů, které v mnoha případech vedlo k havárii, není v této práci rozebíráno. U těchto systémů je důležité jejich zálohování. To platí hlavně pro systémy hydraulické. I pro tyto systémy by ale bylo vhodné vytvoření podobného postupu definování letových omezení. Pilot by dostal ucelenou zprávu, jaké systémy mají omezenou funkci a jaká omezení v letu jsou potřebná pro úspěšné přistání.

8.1 PŘÍNOS VÝSLEDKŮ PRO DALŠÍ ROZVOJ VĚDY A PRO PRAKTICKÉ VYUŽITÍ

Byl definován postup, jak určit rozsah poškození, který tato raketa, tedy spíše střepiny vzniklé výbuchem bojové hlavice vytvořené, způsobí na zasaženém letounu. Postup se skládá z následujících bodů:

- Určení zasažené oblasti na letounu
- Určení zasažených prvků konstrukce
- Definice významnosti prvků

- Definice rozsahu poškození prvků
- Vliv poškození prvků na únosnost konstrukce

Numerický výpočet, opřený o experimentální potvrzení vstupních předpokladů a dílčích výsledků, může sloužit pro analýzu zranitelnosti konstrukce draku. V dnešní době se při vývoji dopravních letounů postupuje čistě z hlediska pevnostního, aerodynamického, materiálového a podobně. Stanovují se odolnosti proti nárazům drobných předmětů jako například ptáků. Účinek roje střepin je ale něco jiného. Střepiny přilétají se značně vyšší rychlostí a působí poškození větší části konstrukce. Použitím postupu popsaného v této práci je možné ověřit odolnost konstrukce již ve stádiu návrhu.

Při návrhu konstrukce se určí nejpravděpodobnější místo zásahu. Popíší se jednotlivé prvky v zasažené oblasti a výpočtem se stanoví rozsah poškození jednotlivými střepinami. Pro tento postup je potřeba počítat s vlastnostmi dané bojové hlavice, například s raketami typu „stinger“. Typ rakety je určitelný podle předpokládaného vybavení teroristické skupiny. Po určení rozsahu poškození jednotlivými střepinami následuje analýza vlivu poškození na únosnost konstrukce jako celku. V případě potřeby je možné definovat provozní omezení pro pilota v případě pokračování letu po zásahu raketou. Jestliže se při analýze zjistí, že zásah rojem střepin zničí prvek konstrukce s katastrofickými důsledky pro celý letoun, mohou následovat konstrukční úpravy se záměrem snížit důležitost takového prvku. Možnosti jsou různé, od zálohování až po pancéřování používané u vojenských letadel.

Při použití tohoto postupu již při rané fázi vývoje nového letounu, by se mohl získat letoun, o kterém by se mohlo prohlásit, že je odolný vůči teroristickým útokům z vnějšku, tedy útokům tříštivou bojovou hlavicí rakety. V dnešní konkurenční době může i malý náskok před konkurencí znamenat velké výhody na trhu.

To je ale pouze případ při použití hodnocení bezpečnosti dopravního letounu při teroristickém útoku již ve fázi vývoje. Tento postup byl od začátku koncipován i pro již provozované letouny. Dosažené výsledky této práce budou v plném rozsahu využity v systému vyvíjeném na katedře Letecké a raketové techniky na Univerzitě obrany. Tento systém, který je postaven na počítačovém zpracování obrazu poškozeného místa, je určen k lokalizaci a vyhodnocení rozsahu a závažnosti bojových poškození letadel. Při úpravě tohoto systému je možné jeho nasazení i v civilní dopravě.

Nyní byly uvedeny dva případy využití postupu v této práci popsaném v návrhové fázi životního cyklu letounu a ve fázi provozní. Možností využití je ale i ve fázi po katastrofické události, kdy by letoun byl tříštivou bojovou hlavicí rakety sestřelen. Vyhodnocením poškození a destrukce konstrukce by bylo možné definovat nejslabší místo. Bylo by stanoveno nápravné opatření pro zbývající flotilu letounů. Bylo by navrženo vyztužení konstrukce, zálohování a podle postupu v této práci popsané by bylo možno relativně rychle ověřit důsledek nápravných opatření. Zvýšení odolnosti proti teroristickému útoku by se tedy provedlo pro již provozovaná letadla.

Tato práce si nebrala za cíl úplný popis dané problematiky. V mnoha případech byla použita zjednodušení. Jednalo se spíše o nastínění postupu a celkového algoritmu potřebného pro řešení zadané úlohy. Detailní zkoumání by vyžadovalo celý tým odborníků a hlavně vysoké finanční zdroje zejména pro experimentální část řešení. Naproti tomu všechny nástroje a postupy potřebné pro řešení problému bezpečnosti dopravního letounu při poškození draku teroristickým útokem byly v této práci uvedeny.

9 LITERATURA

- [1] Reálná hrozba - přenosné protiletadlové střely. In: *Věda a technika* [online]. 2007 [cit. 2012-05-08]. Dostupné z:
http://veda-technika.blogspot.com/2007_10_01_archive.html
- [2] 2003 Baghdad DHL attempted shutdown incident. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2012-05-08]. Dostupné z:
http://en.wikipedia.org/wiki/2003_Baghdad_DHL_shutdown_incident
- [3] Northrop Grumman Guardian. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2012-05-08]. Dostupné z:
http://en.wikipedia.org/wiki/Northrop_Grumman_Guardian
- [4] DHL Accident. *Hawker gallery* [online]. 2007 [cit. 2007-08-12]. Dostupné z:
http://hawker.smugmug.com/gallery/58908#2047835_64i9P
- [5] Flare (countermeasure). In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2012-05-08]. Dostupné z:
[http://en.wikipedia.org/wiki/Flare_\(countermeasure\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Flare_(countermeasure))
- [6] Civil Aircraft Missile Protection System. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2012-05-08]. Dostupné z:
<http://en.wikipedia.org/wiki/CAMPS>
- [7] Metoda konečných prvků. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2012-05-08]. Dostupné z:
http://cs.wikipedia.org/wiki/Metoda_kone%C4%8Dn%C3%BDch_prvk%C5%AF
- [8] *Boeing: 787 PublicPres final*, Boeing, 2006
- [9] KOLEKTIV AUTORŮ, *Speciální technika*, 1. díl, Praha, 1976
- [10] KOLEKTIV AUTORŮ, *Speciální technika*, 2. díl, Praha, 1976
- [11] LUDVÍK, F. a KONEČNÝ, P. *Rakety*, Brno: VA Brno, 1998
- [12] *MSC.Dytran User's Guide 2007*, Santa Ana: MSC.Software Corporation, 2007
- [13] BALL, R.E. *The Fundamentals of Aircraft Combat Survivability Analysis and Design*, New York: AIAA, 1985.
- [14] ŠKRÁŠEK, J. a TICHÝ, Z. *Základy aplikované matematiky*, Praha: SNTL, 1983
- [15] RALSTOM, A. *Základy numerické matematiky*, Praha: Academia, 1978
- [16] PETRÁSEK, Miloslav., *Rozvoj metod pro udržení bojeschopnosti letadel při bojovém poškození*, Závěrečná zpráva úkolu MO 50170596302, Brno: VA Brno, 1998

- [17] PETRÁSEK, Miloslav. *Zkoušky účinnosti střel na letoun MiG-23 ML*, Dílčí zpráva pro Prototypa a.s v rámci projektu "Plamen", Brno: VA Brno, 1999.
- [18] PETRÁSEK, Miloslav. *Analýza současného stavu bojové odolnosti lehkého bitevního letounu a základní směry rozvoje*, Dílčí úkol výzkumného záměru 316v07-74p02u, Brno: VA Brno, 2002.
- [19] GREXA, J. *Munice*, Brno: VA Brno, 1988.
- [20] HOLUB,R. – VINTR,Z. *Spolehlivost letadlové techniky*, Brno: VUT v Brně, 2001.
- [21] EUROPEAN AVIATION SAFETY AGENCY, *Certification specification and Acceptable Means of Compliance for Large Aeroplanes CS-25, Amendment 11*,EASA, 2011
- [22] JURA, Pavel. *Základy fuzzy logiky pro řízení a modelování*. Brno: Vutium, 2003. ISBN 80-214-2261-0.
- [23] NOVÁK, Vilém. *Základy fuzzy modelování*. 1. vyd. Praha: BEN, 2000. ISBN 80-7300-009-1.
- [24] PETRÁSEK, Miloslav a TRÍSKA, Václav . The combat aircraft airframe vulnerability assessment by means of fuzzy logic. *Czech aerospace proceedings*. Praha: ALV, 2011, roč. 2011, č. 2. ISSN 1211-877x.
- [25] LOŠŤÁK, Miroslav a PETRÁSEK, Miloslav. Experimental assessment of the fragments effect to the fuselage of the aircraft. *Czech aerospace proceedings*. Praha: ALV, 2011, roč. 2011, č. 1. ISSN 1211-877x.
- [26] LOŠŤÁK, Miroslav. Assessment of impact of the fragmentation warhead to the aircraft. In: *New challenges in the field of military science 2006 - 4th international conference*. Budapešť: Bolyai János Military Technical Faculty of Zrínyi Miklós National Defence University, 2006, s. 109-114.
- [27] LOŠŤÁK, M. a M. PETRÁSEK. Assessment the impact of fragments to the fuselage using FEM. In: *Proceedings of the 9th International Scientific Conference new Trends in Aviation Development*. 1. vyd. Košice: Technická univerzita Košice, 2010. ISBN 978-80-553-0475-5.
- [28] PETRÁSEK, Miloslav. *Bojová odolnost letadel: Skriptum S-10492*. Brno: Univerzita obrany, 2011. ISBN 978-80-7231-843-8.
- [29] HAJDA, Stanislav a PETRÁSEK, Miloslav. Diagnostics of Airframe Combat Damage. In: *Acta Avionica*. Košice: TU Košice, 2008. ISSN 1335-9479.

10 STRUKTUROVANÝ ŽIVOTOPIS

Jméno

Ing. Miroslav Lošťák

Osobní údaje

Datum narození: 1.6.1981
Místo narození: Pardubice
Rodinný stav: svobodný

Vzdělání

2005-2012 Letecký ústav, Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně
Specializace: Konstrukční a procesní inženýrství – doktorské studium
Téma disertační práce: Bezpečnost dopravního letounu při poškození draku teroristickým útokem

2000-2005 Letecký ústav, Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně
Specializace: Stavba letadel – magisterské studium

1994-2000 Gymnázium Pardubice

Zaměstnání

2005-2007 Aero Vodochody a.s., Konstruktor – Projektant

2007-2009 TC Inter-informatics a.s., Vedoucí konstruktor

2009-2011 TC Inter-informatics a.s., Vedoucí skupiny

2011-dosud TC Inter-informatics a.s., Vedoucí projektu

2011-dosud TC Inter-informatics a.s., Verifikační inženýr EASA.21J.361 DO

2008-2009 Airbus Deutschland GmbH, Pracovní pobyt na oddělení SEUCN

2009-2010 Sell GmbH, Pracovní pobyt

Jazykové znalosti

Anglický jazyk – pokročilý; Německý jazyk – středně pokročilý

11 ABSTRACT

Modern-day terrorist attacks present a considerable danger for commercial aircrafts. This thesis analyzes potential methods of such attacks with a critical analysis of the most dangerous type: an attack from the outside of the aircraft via a fragmentation missile warhead. Such missiles cause damage to the airframe of the aircraft through fragments created by the explosion. In this thesis, analytical geometry is used to determine the area of the aircraft affected by the fragmentation. The aircraft's geometry and the fragments' dispersion are calculated by analytical functions, and the effect of the damage is analyzed. A shooting experiment was also carried out, in which fragments were shot at a reinforced skin panel that was manufactured according to the real design of commercial aircraft. The results of the experiment revealed that only directly hit sections of the structure are damaged. Data obtained by the experiment was then used for the creation and improvement of the model used in the simulation by means of the finite element method. This model is used for the numerical calculation of the damage sustained. Further included in the thesis is an analysis of the change in the load-bearing capacity after such an attack. The relationship between the size of the damage and its effect on the load-bearing capacity of the component as well as the entire structure is defined. First, the effect of component damage is analyzed via the FMEA/FMECA methods. This analysis is then extended using fuzzy logic. Fuzzy logic analysis is based on the determination of the size of the damaged component area and the component's importance on the structure's carry loads. Application of the defined approach is described for several parts of an aircraft's life cycle, including development, operation after the terrorist attack, and assessment of causes after a crash caused by a fragmentation missile warhead.