

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**DIPLOMOVÁ
PRÁCE**

2020

**JAN
HOSTAŠA**

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV LETADLOVÉ TECHNIKY



DIPLOMOVÁ PRÁCE

ANALÝZA ŠÍŘENÍ TRHLINY V STATOROVÉ LOPATCE
VYSOKOTLAKÉ TURBINY MOTORU AL-25TL

AUTOR: Bc. JAN HOSTAŠA

VEDOUCÍ PRÁCE: prof. Dr. Ing. TOMÁŠ VAMPOLA

PRAHA 2020

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně, a to výhradně s použitím pramenů a literatury v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne:.....

.....

Podpis

Anotace:

Práce se zabývá využitím MKP při modelování šíření trhliny na lopatce vysokotlaké turbíny. Cílem je pro provozní zatížení predikovat chování trhliny a určit zbytkovou životnost lopatky. V práci se nepodařilo prokázat vliv zatížení na únavové šíření trhliny.

Klíčová slova:

MKP, únava, šíření trhliny, údržba, L-39 Albatros, AI25-TL

Annotation:

This work is focused on using the finite element method to simulate a crack propagation on the blade of turbine. The task is to predict the behaviour of the crack for the limit loads and the residual lifetime of the blade. The method used did not prove the influence of the load on the fatigue crack propagation.

Keywords:

FEM, fatigue, crack propagation, maintenance, L-39 Albatros, AI-25TL

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu své práce prof. Dr. Ing Tomáši Vampolovi za čas, který se mnou strávil nad konzultacemi a za ochotu se mi věnovat a za všechny cenné rady a připomínky.

Chtěl bych poděkovat také všem mým blízkým, kteří mě při psaní diplomové práce podporovali.

Obsah

Úvod.....	9
Popis motoru AI-25TL a letounu L-39 (1)	10
L-39 Albatros	10
Historie.....	10
Drak letounu	14
Motor AI-25TL	14
Nízkotlaký kompresor.....	16
Vysokotlaký kompresor	16
Spalovací komora	17
Turbína.....	17
Safír-5	17
Popis generální opravy motoru	18
Údržba.....	18
Generální oprava (3)	19
Základní práce při generální opravě	19
Generální oprava rozváděcí lopatky vysokotlaké turbíny	19
Samotná práce na vnějším plášti lopatky.....	21
Konstrukce rozváděcího ústrojí vysokotlaké turbíny	23
Rozváděcí lopatka vysokotlaké turbíny	26
Získávání dat.....	26
Rozbor zatížení	30
Rozbor.....	30
Aerodynamické síly	30
Teplotní pole	30
Silové působení na lopatce	30
Výpočet síly	30
Teplotní pole	32
Popis reálného poškození.....	33
Nález	33
Příčiny poškození.....	34
Simulace zatížení	35
Příprava výpočtu	35

Model	35
Materiálová data	36
Sít'	37
Příprava výpočtu	39
Teplotní analýza.....	39
Strukturální analýza	39
Únavové šíření trhliny	40
Volba metody řešení	41
SMART.....	41
Výpočet.....	43
Vyhodnocení nálezu a výpočtu.....	45
Nález	45
Výpočet.....	45
Návrh řešení	48
Praktické řešení.....	48
Výpočet.....	48
Vliv geometrie	48
Vliv materiálu	48
Vliv zatížení.....	49
Závěr	50
Seznam obrázků.....	51
Seznam tabulek	51
Seznam rovnic.....	51
Reference	52

Úvod

S rozvojem technologií jsme schopni vyrábět složitější, dokonalejší a větší díly ze stále lepších materiálů. S technologickou náročností takovéto výroby souvisí rostoucí náklady na výrobu těchto částí. Je tedy žádoucí, aby takovéto díly sloužily svému účelu co možná nejdéle.

V této práci se budeme zabývat šířením únavové trhliny na statorové lopatce vysokotlaké turbíny. Pokud budeme schopni přesně, detailně a spolehlivě popsat jakým způsobem se trhlina šíří, budeme schopni za daného zatěžování říci, kdy trhlina dosáhne kritické délky a začne se šířit nekontrolovatelně.

Samotný fakt, že se na součásti nachází trhlina, nemusí nutně znamenat, že díl už není schopen plnit svůj účel. Cílem této práce je tedy určit, jak rychle se trhlina bude šířit, jinými slovy, jak dlouho je možné díl ještě udržovat v provozu.

Jedná se tedy o užitečný výpočet pro výrobce a provozovatele letecké techniky. Díky němu se dá ušetřit náklady na novou součástku, pokud nebude potřeba ji měnit. Případně ušetří čas, pokud náhradní součástku začnou vyrábět už v době, kdy budou mít spočítáno, že doslouží. V krajním případě ušetří lidské životy, pokud součástku, v případě nutnosti, okamžitě vyřadí z provozu.

V práci bude nejprve stručně popsána historie a vývoj letounu L-39 Albatros, dále celý letoun a jeho důležité součásti, především motor. Stěžejní část práce bude věnována výpočtu a simulování šíření trhliny.

Popis motoru AI-25TL a letounu L-39 (1)

L-39 Albatros

Historie

Předchůdcem letounu L-39 Albatros je letoun L-29 Delfín, který byl velkým úspěchem československého letectví. Dokázal se prosadit v programu cvičného letounu v bývalém východním bloku a bylo vyrobeno celkem 3 665 kusů.

První let L-39 proběhl dne 4. listopadu 1968.

Oba letouny vyrábělo Aero Vodochody a vývoj vedl konstruktér Ing. Jan Vlček. L-29 byl oblíbený a dobře hodnocený hlavně díky příjemné pilotáži, jednoduché obsluze a říditelnosti, za svou stabilitu a netečnost vůči chybám žáka, za odolnost vůči nasátí cizích předmětů. L-39 Albatros vylepšil oproti L-29 slabý tah motoru a snížil spotřebu paliva. Zlepšil také navigační systémy a do výbavy zařadil vystřelovací sedadla. (Československo bylo jednou z mála zemí, která vystřelovací sedadla uměla vyrobit.)

Celkem bylo vyrobeno 2 900 kusů cvičného letounu L-39 Albatros. Stroje byly využívány např. v Sovětském svazu, Německé demokratické republice, Iráku či Afghánistánu. (1)

L-39 Albatros slouží v mnoha zemích dodnes. Ve svých armádách jej má Egypt, Sýrie, Alžírsko či Kuba (celkem 45 zemí). Jeho dalšími vývojovými stupni jsou L-159 Alca a L-39NG.

Stroj je určen k základnímu a pokročilému výcviku pilotů. Letoun dovoluje cvičení bojových obrátů, trénování přepadu pozemních i vzdušných cílů, nácvik střelby a bombardování i létání za nulové viditelnosti.

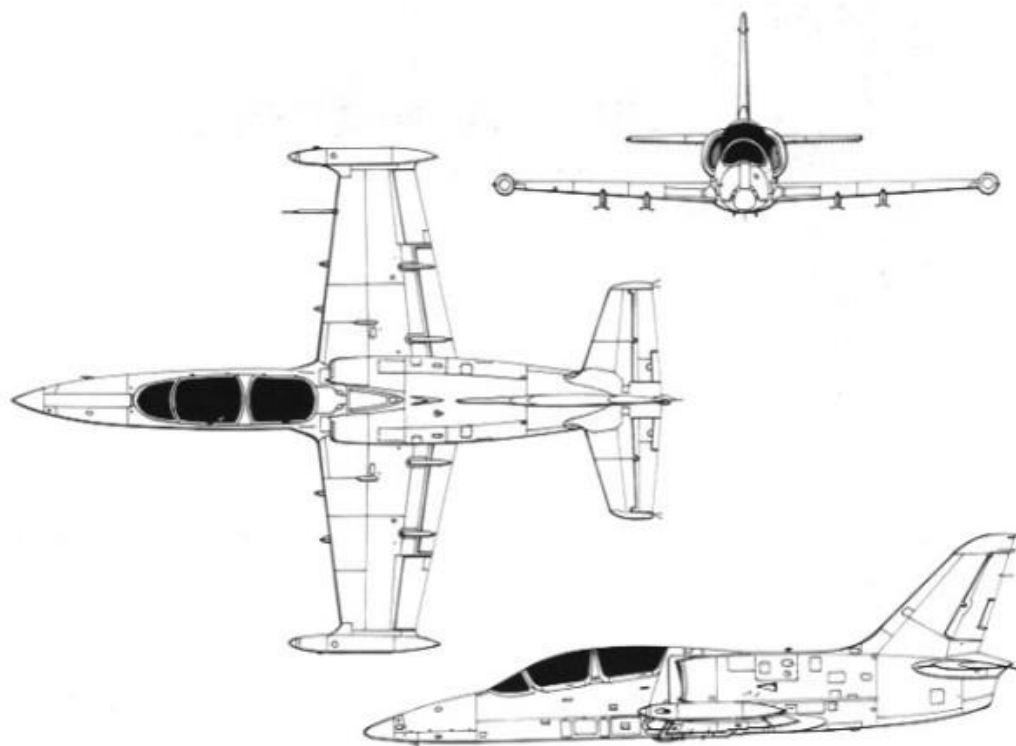
Stroj je zkonstruován jako dolnoplošník s tandemovým uspořádáním posádky celokovové konstrukce. Letoun je vybaven třibodovým zatahovacím podvozkem. Křídlo lichoběžníkového tvaru umožňuje nosit přídatné nádrže na koncích křídla.

Stroje sloužily a dodnes slouží v mnoha zemích světa, jako příklad poslouží zajímavá fotografie letounu L-39 doprovázejícího ruský raketoplán Buran při transportu největším nákladním letounem světa An 225 Mria.



Obrázek 1 Doprovodný L-39 (1)

Tři pohledový výkres letounu L-39:



Obrázek 2 Tři pohledový výkres L-39 (1)

Tabulka základních charakteristik letounu L-39 Albatros

Základní technické údaje		
Rozpětí (včetně palivových nádrží)	9,46	[m]
Délka	12,13	[m]
Výška	4,77	[m]
Hmotnost prázdného stroje	3 540	[kg]
MTOM	4 700	[kg]
Maximální rychlost v 11 000 m	850	[kmhod ⁻¹]
Maximální rychlost v 5 000 m	755	[kmhod ⁻¹]
Maximální rychlost v 0 m	720	[kmhod ⁻¹]
Dolet	1 000	[m]
Dolet s přídatnými nádržemi	1 750	[m]
Dostup	11 500	[m]
Vytrvalost	2h 30min	
Vytrvalost s přídatnými nádržemi	3h 50min	
Objem přídatných nádrží	2 x 420	[l]
Kapacita nádrží	1100	[l]
Motor	AI-25TL	
Tah motoru	16 870	[N]
Maximální povolené přetížení	-4 až +8g	

Tabulka 1 Tabulka základních technických údajů L-39 (2)

Drak letounu

Trup

Trup letounu L-39 je celokovové poloskořepinové konstrukce, se dvěma vzduchovými kanály na stranách nad křídlem. Skládá se z přední a zadní části. Do přední části spadá: špička, hermetovaná část, střední část (motorový a palivový prostor).

Špička je rozdělena na více prostorů, v nichž jsou uloženy kyslíkové tlakové nádoby, radiovybavení, baterie a podvozková šachta.

Hermetovaná část je prostor, ve kterém je vestavěna pilotní kabina.

Střední část je rozdělena na část pro uložení paliva a na část pro motor. Palivové nádrže jsou z pogumovaného textilu. Nádrže jsou zavěšené do kování pomocí zvulkanizovaných šroubů.

Zadní část trupu je odnímatelná tak, aby byl motor dobře přístupný pro montáž a demontáž. Tato část je k přední části trupu připevněna pěti šrouby a dvěma středícími kolíky. V horní sekci je nerozebíratelně spojena s kýlovou plochou.

Křídlo

Jedná se o třínosníkové průběžné křídlo, opatřené dvoušterbinovou klapkou a křidélky. Klapka se vyklápí na 25° nebo 45°.

Motor AI-25TL

Jedná se o dvouproudový dvouhřídelový letecký motor vyvinutý konstrukční kanceláří Ivčenko-Progress. Původně vyvinutý pro třímotorový dopravní Jak-40 (který dodnes slouží v armádě České republiky). Motor nesl označení AI-25. Jeho upravená verze s označením TL byla vyvinuta právě pro Albatros, L v označení odpovídá označení L-39.

Základní technické údaje jsou uvedeny v tabulce:

Základní technické údaje	
Značení	AI-25TL
Typ	Dvouproudový
Smysl otáčení rotorů	Vlevo (při pohledu ze strany trysky)
Kompresor	Axiální – dvanácti stupňový
Stupeň stlačení	9,5
Spalovací komora	Prstencová
Tah	16,8 kN
Maximální výška použití motoru	12 000 m
Spouštěcí systém	vzduchový
Délka	3 350 mm
Váha	400 kg

Tabulka 2 Tabulka základních technických údajů AI-25TL (3)

Motor, jak jej zobrazuje výrobce; viz obrázek:



Obrázek 3 Letecký motor AI-25TL (4)

Nízkotlaký kompresor

Slouží ke stlačení vzduchu postupujícího do druhého proudu a do vysokotlakého kompresoru.

Vstupní usměrňovací těleso je nerozebíratelný svařenec se dvěma přírubami a pláštěm. Na plášti je umístěna sonda celkového tlaku. Vše je vyrobeno z titanových slitin.

Stator se skládá ze skříně s bandážemi a usměrňovacími lopatkami. Přírubami je spojen se vstupním usměrňovacím tělesem, vzadu pak se skříní náhonů. Všechny části jsou z titanové slitiny. Na skříní jsou otvory sloužící k inspekci dílů motoru. Lopatky jsou upevněny ve výřezech bandáží.

Rotor je třístupňový, disk prvního stupně je přírubou spojen s hřídelí. Na obvodě se nachází labyrintové těsnění. Disky druhého a třetího stupně jsou spojeny v jeden celek. Hřídel je ocelová, části rotoru z titanové slitiny. Lopatky jsou pak uchyceny kloubovými zámky.

Torzní hřídel z oceli přenáší kroučící moment od nízkotlaké turbíny.

Vysokotlaký kompresor

Vstupní ústrojí v přední části umožňuje změnu úhlu nastavení lopatek podle režimu motoru.

Stator je přední přírubou připevněn ke skříní náhonů, zadní pak s tělesem spalovací komory.

Rotor je devítistupňový, diskobubnové konstrukce. Skládá se z devíti oběžných kol, šesti nástavců s rozpěrnými pouzdry, přechodového kruhu a dílů předního uložení rotoru nízkotlaké turbíny. Lopatky jsou na kola uchyceny rybinovými zámky a zajištěny plochými pojistkami.

Skříň pohonů se nachází mezi nízkotlakým a vysokotlakým kompresorem, slouží k rozdělení proudu na vnitřní a vnější proud s obtokovým poměrem 2,27. Ve skříní jsou uloženy agregáty a jejich pohony. Skříň je odlita z hořčíkové slitiny.

Centrální náhon převádí pohyb z rotorů vysoko a nízkotlakého kompresoru agregátům umístěným na skříni náhonu. K převodu slouží kuželová a válcová ozubená kola.

Spalovací komora

Slouží k řízenému procesu spalování směsi paliva a vzduchu, přívodu plynů k rozváděcím lopatkám turbíny. Komora je zhotovena z vysokopevnostního plechu a zachycuje dynamické síly plynů, má dvanáct přírub pro palivové trysky. Tryska je jednokanálová, odstředivého typu s neregulovatelnou tryskou.

Turbína

V turbíně dochází k transformaci energie plynů na mechanickou. Skládá se z vysokotlaké a nízkotlaké části.

Vysokotlaká plynová turbína je axiální, jednostupňová a pohání vysokotlaký kompresor. Stator tvoří rozváděcí ústrojí ze svařovaných vnitřních a vnějších částí a rozváděcími lopatkami. Rotor je tvořen diskem a lopatkami, které jsou chlazené.

Nízkotlaká turbína je dvoustupňová a axiální, slouží k pohonu nízkotlakého kompresoru.

Plynová turbína je chlazená. Disky jsou chlazeny pomocí otvorů ve vnitřním tělese, lopatky jsou duté. Chlazení zajišťuje sekundární proud, vzduch pak odchází do proudu plynů.

Safír-5

Je spouštěcím systémem motoru AI-25TL, dodává mu stlačený vzduch potřebný pro start. Jedná se o pomocný autonomní zdroj energie

Popis generální opravy motoru

Údržba

Údržbou rozumíme soubor prací nutných k zachování provozní způsobilosti. Zajistit vlastnosti motoru tak, aby plnit svůj účel po stanovenou dobu spolehlivě a bezpečně při zachování parametrů stanovených k plnění úkolu.

Cílem údržby je tedy vypracovat plán, který zahrnuje, kdy a jak má být která činnost provedena, tak aby nedošlo ke ztrátě způsobilosti. Stanovíme-li tento plán musíme také definovat, jak mají které činnosti probíhat. Tyto informace získáváme z provozní dokumentace.

U nového motoru garantuje jeho výrobce po jistou dobu, že motor bude plnit svůj účel. Po uplynutí této doby je nutné provést zásah údržby a obnovit tak jeho schopnost vykonávat svou práci spolehlivě a bezpečně. Tento interval, než dojde k zásahu údržby, bývá nejdelší (technologické možnosti výrobce bývají na vyšší úrovni). Další intervaly se pak vlivem provozu zkracují tak, aby byly případné defekty odhaleny dříve, než se mohou fatálně projevit.

Intervaly generální opravy motorů AI-25TL sloužících Armádě České republiky jsou 800 letových hodin a mohou být prodlouženy až na 1000 letových hodin.

Součástí údržby není jen generální oprava ale také kontroly, testy, zkoušky atd.

Generální oprava (3)

Cílem generální opravy je obnovit životnost motoru na původní hodnotu. Provádí ji k tomu oprávněná organizace, tzv. MRO (Maintenance Repair Organization)

Základní práce při generální opravě

Prvním krokem po převzetí motoru opravárenskou organizací je rozebrání motoru na jednotlivé díly.

Ty jsou pak odeslány na oddělení, které se zabývá jejich čištěním. Správné a řádné vyčištění dílů je velmi důležité. Čisté díly totiž putují na další oddělení, kde procházejí kontrolou.

Kontrola má za cíl odhalit poškození, opotřebování a trhliny na každém z dílů. Provádí ji kvalifikovaní pracovníci pomocí nedestruktivních metod.

Díly, které projdou kontrolou, pokračují na místo, kde budou zase smontovány v celek. Díly vykazující poškození nebo opotřebení, jež je za hranicí stanovenou výrobcem, jsou buď vyřazeny nebo opraveny.

Následuje opětovné smontování, za použití zkontrolovaných dílů.

Po montáži následují zkoušky, které mají prokázat, že motor opravdu funguje jak má a podává výkony stanovené výrobcem.

Takto zkontrolované motory jsou připraveny na transport k provozovateli. Motory většinou servisuje jiná organizace než ta, která servisuje letouny. Důvodem bývá specializovanost práce a potřeba přípravků.

Generální oprava rozváděcí lopatky vysokotlaké turbíny

Pro účely této práce není žádoucí zabývat se popisem a postupem generální opravy celého motoru. Zabýváme se únavovým šířením trhliny právě na rozváděcí lopatce, a tak se budeme věnovat postupu její opravy.

Samotná práce se skládá z 90 kroků předepsaných výrobcem, v provedení opravárenské organizace mohou vypadat například takto:

SOUPIS OPERACÍ			
Oper.	Profese	Název operace	Poznámka
5	91	Odstranění napálení - op. zlv. důležitosti	
10	89	Kontrola lopatek na přehřátí	
15	92	Odstranění zbytků napálení	
20	92	Začištění	
22	92	Kontrolní složení rozváděcího ústrojí	
25	91	Mytí - op. zlv. důležitosti	

Tabulka 3 Soupis operací generální opravy lopatky

Pokud se na tabulku 3 podíváme, můžeme si všimnout, že má poměrně jednoduchou a jasnou strukturu. Podle číslování operací se jedná o začátek prací.

Druhým políčkem tabulky je profese. V leteckém průmyslu obecně je zapotřebí kvalifikované pracovní síly. Získání této kvalifikace, udržování znalostí na požadované úrovni a jejich prohlubování a rozšiřování je však velmi nákladné – časově i finančně. Proto je důležité rozdělit činnosti podle důležitosti a podle významu tak, aby nebyl vysoce kvalifikovaný pracovník zavalen prací, ke které taková míra kvalifikace není potřeba.

Každá operace je pojmenovaná, podle názvu si pracovník vezme pracovní list, na kterém je jasně popsán postup práce dané operace.

Samotná práce na vnějším plášti lopatky

Z tabulky je patrné, že se začíná odstraněním nečistot, následuje první kontrola lopatek na přehřátí, po této kontrole je zařazeno dočištění. Následuje kontrola první poloviny lopatky, pro tu je opět provedena série mytí a oplachů tak, aby bylo možné provést NDT kontrolu. Samotná kontrola, v tomto případě kapilární, si vyžaduje sama osobě ponoření lopatky do penetrantu, vysušení, aplikaci vývojky, vyhodnocení a následný oplach. Touto metodou je možné odhalit povrchové vady a trhliny.

Po tomto bloku následuje zařazení oprav, pokud je to nutné. Oprava se provádí navařováním. Po navaření první vrstvy dochází k broušení, dalšímu mytí a začištění. Následuje žihání, po kterém je zařazeno další navařování. Dalším krokem je mytí v ultrazvuku.

Stejný postup kontroly a opravy se provede i na druhém povrchu lopatky.

V následujícím kroku dojde ke kontrolnímu složení rozváděcího ústrojí. Dále je zařazena alitace (pokrytí kovu vrstvou hliníku) a další NDT metoda. Následuje opět navařování, broušení a mytí ultrazvukem a další kontrola složením. Následně je zařazeno tryskání korundem a nanesení ochranné vrstvy, další broušení, alitace, NDT kontrola.

Kontrola a výměna vnitřního deflektoru

Tuto operaci zahajuje vyjmutí deflektoru, jeho důkladné umytí a vizuální kontrola, další mytí a sestavení.

Sestavení lopatky

Vložení deflektoru zpět do těla lopatky je zahájena operace sestavování, vnitřní deflektor je přivařen. Po prvotním uchycení – přivaření následuje kontrola průchodu vzduchu. Pakliže je vše v pořádku přivaří se krytka. Svary musí projít kontrolou nejprve vizuální, po začištění i NDT.

Následuje svařování jinou metodou, které je následováno stejným sledem kontrol.

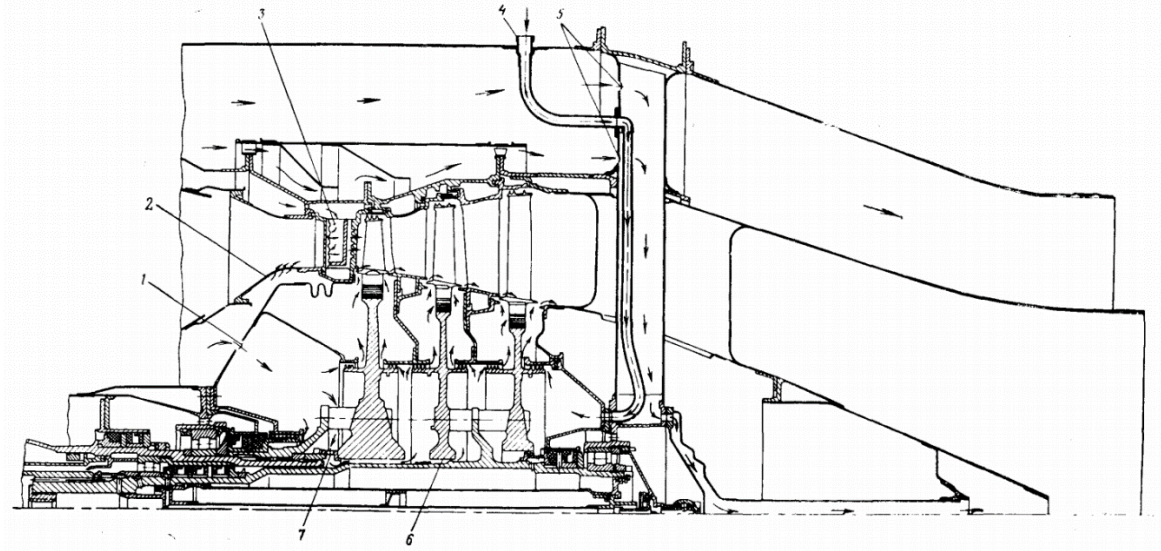
Po přivaření je nutno provést další kontrolu, tak aby při pájení nedošlo k žádným problémům. Samotné pájení, vizuální kontrola pájení. Následuje alitace a označení lopatky.

Kontrola složením a broušením na požadovaný průměr, demontáž a mytí pro nástřik, tryskání pro nástřik a samotný žárový nástřik, protočení žárového nástřiku a kontrola drsnosti. NDT kontrola.

Další důležitou činností je jiskření chladících otvorů následované další alitací a silikonalitací čela lopatky.

Posledním krokem je pak finální kontrola lopatky.

Konstrukce rozváděcího ústrojí vysokotlaké turbíny



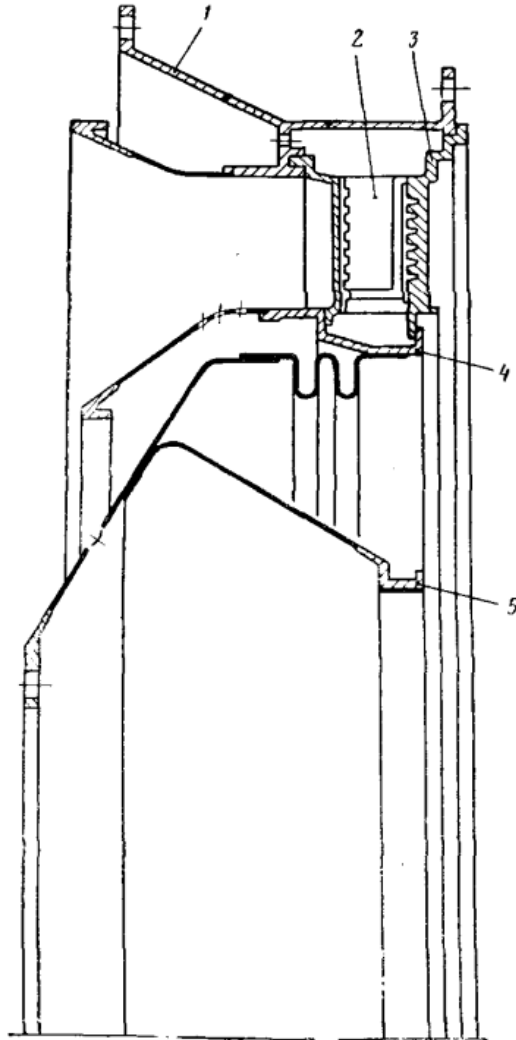
Obrázek 4 Turbína (5)

Vyobrazení vysokotlaké turbíny motoru AI-25TL;

- 1 – Chlazení vnitřního disku sekundárním proudem
- 2 – Rozváděcí ústrojí
- 3 – Rozváděcí lopatka
- 4 – Trubka přívodu oleje
- 5 – Přívod sekundárního proudu
- 6 – Mezera pro přívod chladicího vzduchu do dutiny mezi disky druhého a třetího stupně vysokotlaké turbíny
- 7 – Otvor pro přívod chladicího vzduchu za disk vysokotlaké turbíny

Obrázek 4 zobrazuje celou turbínu, je zde zařazen pro přehlednost a úplnost.

Pro účely práce je podstatnější obrázek 5, který zobrazuje rozváděcí ústrojí turbíny. Můžeme vidět, že je tvořeno plechovým svařencem z titanových slitin sloužícímu k usměrnění proudu plynů za spalovací komorou na rozváděcí lopatky.



Obrázek 5 Rozváděcí ústrojí vysokotlaké turbíny motoru (5)

Obrázek 5 znázorňuje rozváděcí ústrojí vysokotlaké turbíny;

1 – Vnější těleso

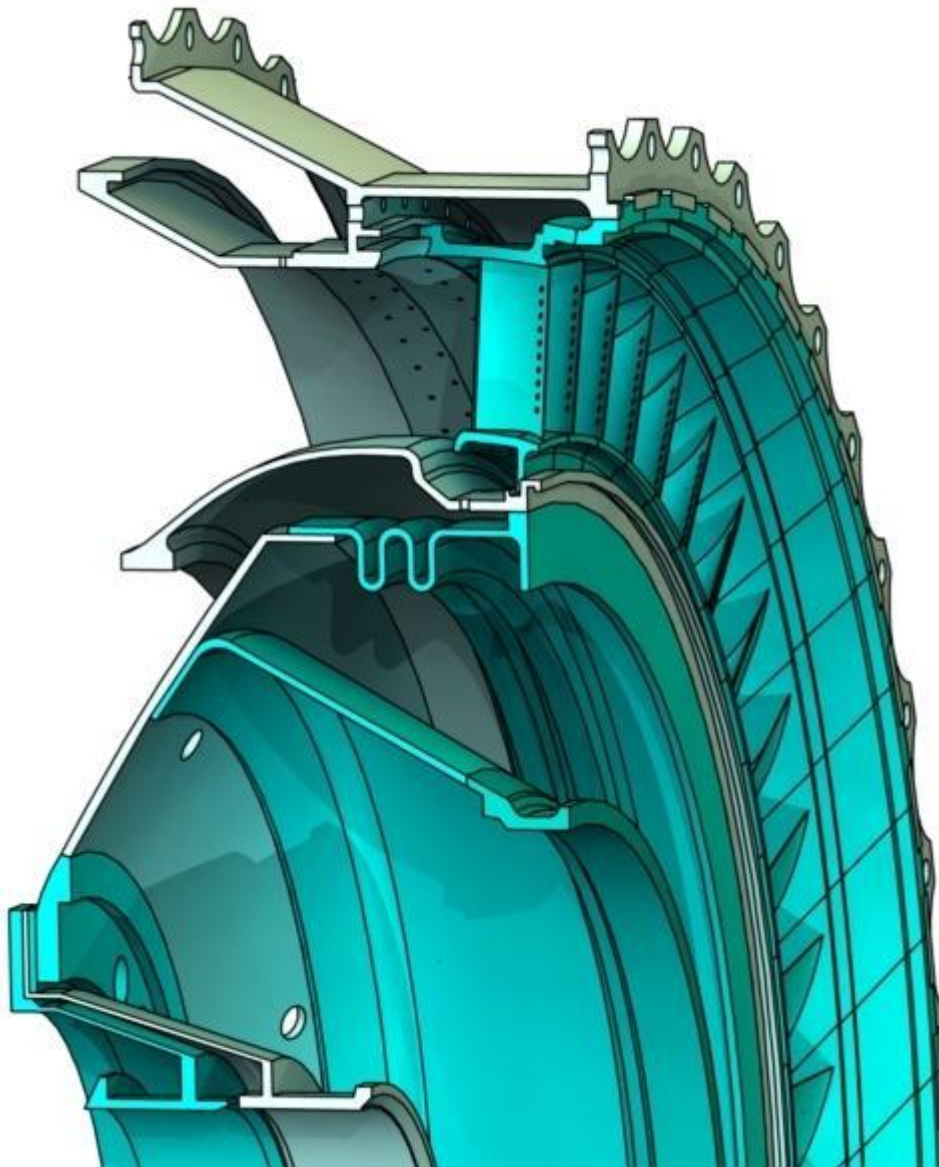
2 – Deflektor

3 – Rozváděcí lopatka

4 – Vnitřní těleso

5 – Těsnící kroužek

Pro přehlednost ještě pohled na 3D model rozváděcího ústrojí. Zde je dobře vidět jak rozváděcí lopatky, tak konstrukci rozváděcího ústrojí.



Obrázek 6 3D model rozváděcího ústrojí (6)

Rozváděcí lopatka vysokotlaké turbíny

Geometrie lopatky a její modelování v CADu představuje pro tuto práci první zásadní krok, bez kterého nelze pokračovat v řešení dalších úkolů. Tento krok se ukázal jako velmi složitý úkol, jehož řešení stálo mnoho času a úsilí.

Musíme si uvědomit, že se jedná o lopatku armádního dvouproudového motoru, zabudovaného do armádního stroje, který mimo cvičné úkoly mohl být nasazen i jako lehký bitevník. A to vše za dob studené války. Informace tedy buď úplně chybí nebo nejsou dodnes k dispozici.

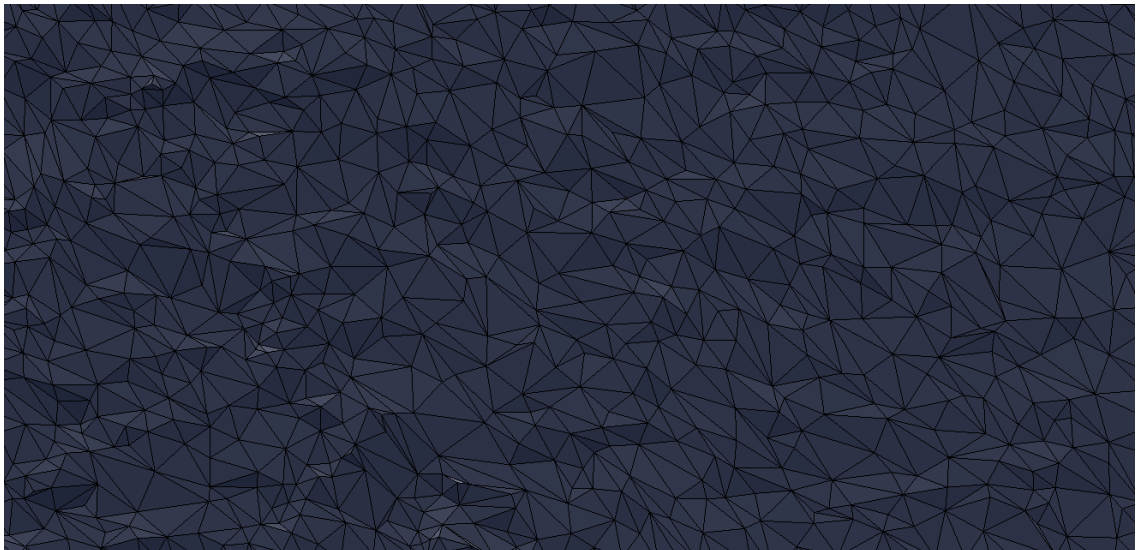
Lopatka samotná nebyla nikdy na našem území vyráběna, vždy byla dovezena ze Sovětského svazu. S tím souvisí absence výrobních výkresů, které by z rekonstrukce a digitalizace lopatky udělaly jednoduchý úkol.

Získávání dat

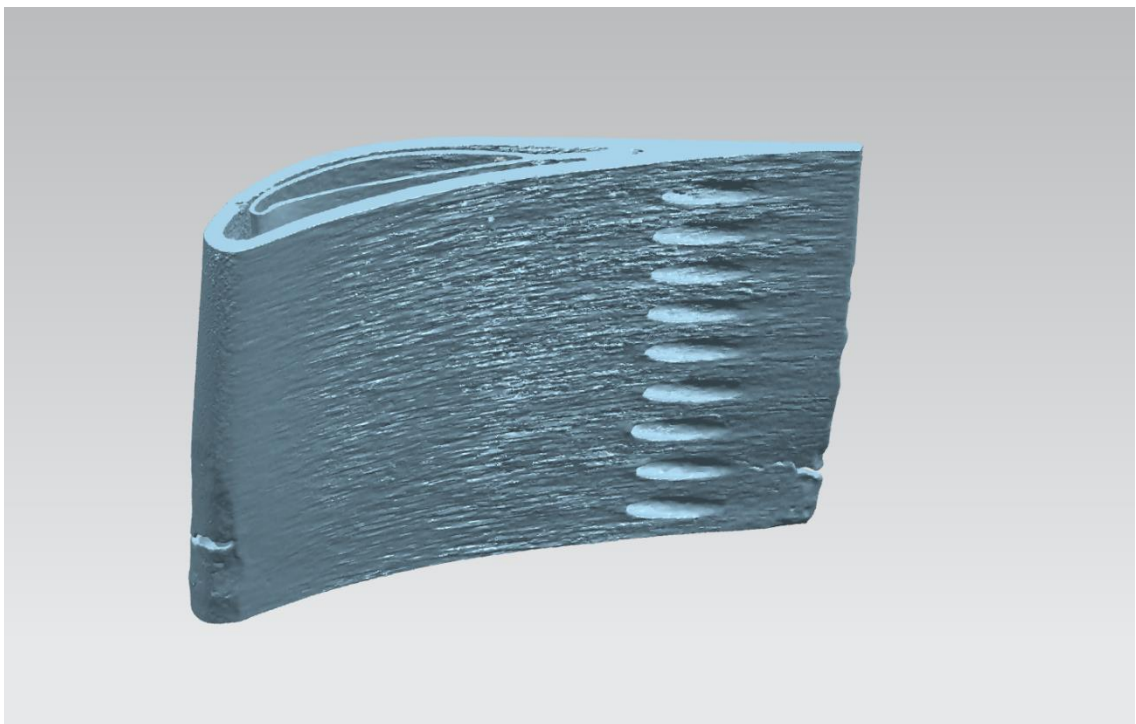
Práce by bez modelu nemohla proběhnout, bylo tedy nutné geometrii určit, primitivní metody měření bodů po povrchu z vyhotoveného překližkového negativu profilu se ukázaly jakožto realitě vzdálené a tedy nepoužitelné.

Sofistikovanějším přístupem bylo provedení měření ultrazvukem v dílnách ČVUT. Takto získaná data se jevila jakožto použitelná pro další zpracování. Model získaný touto metodou byl sice přesný, v MKP řešiči ovšem použitelný nebyl. Důvodem byla jeho struktura, která připomínala konečně prvkovou síť. Tvořena byla jednotlivými body naměřenými ultrazvukem, které spolu jsou provázány.

Takovýto model nebylo možné v MKP řešiči vysítovat, tedy ani použít.



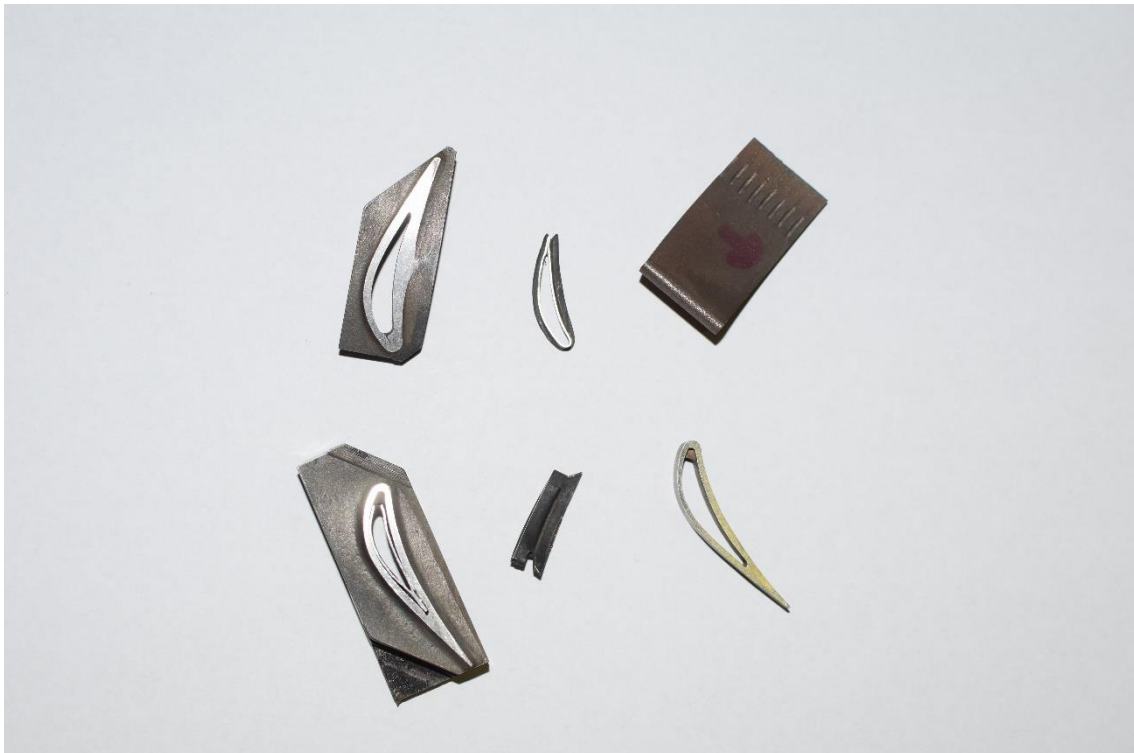
Obrázek 7 Struktura, získána ultrazvukovou metodou



Obrázek 8 Ultrazvukový model

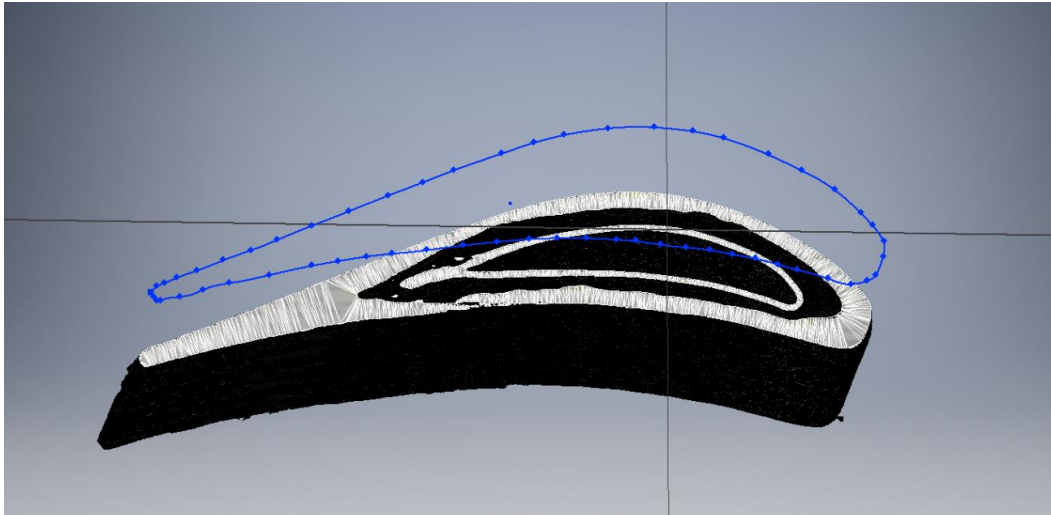
Vzhledem k časové vytiženosti centra pro přesné měření došlo k vyčerpání dostupných nedestruktivních metod reverzního inženýrství a bylo tedy přistoupeno k destruktivním metodám.

Podářilo se obstarat další, již vyřazenou lopatku, která byla v prostorách hal ČVUT rozřezána. Z takto připraveného řezu byla nasnímana data o profilu. Lopatka byla také rozřezána na více místech tak, aby bylo možné pozorovat vnitřní strukturu pouhým okem. Tedy pro představu, o čem práce pojednává.



Obrázek 9 Rozřezaná rozváděcí lopatka

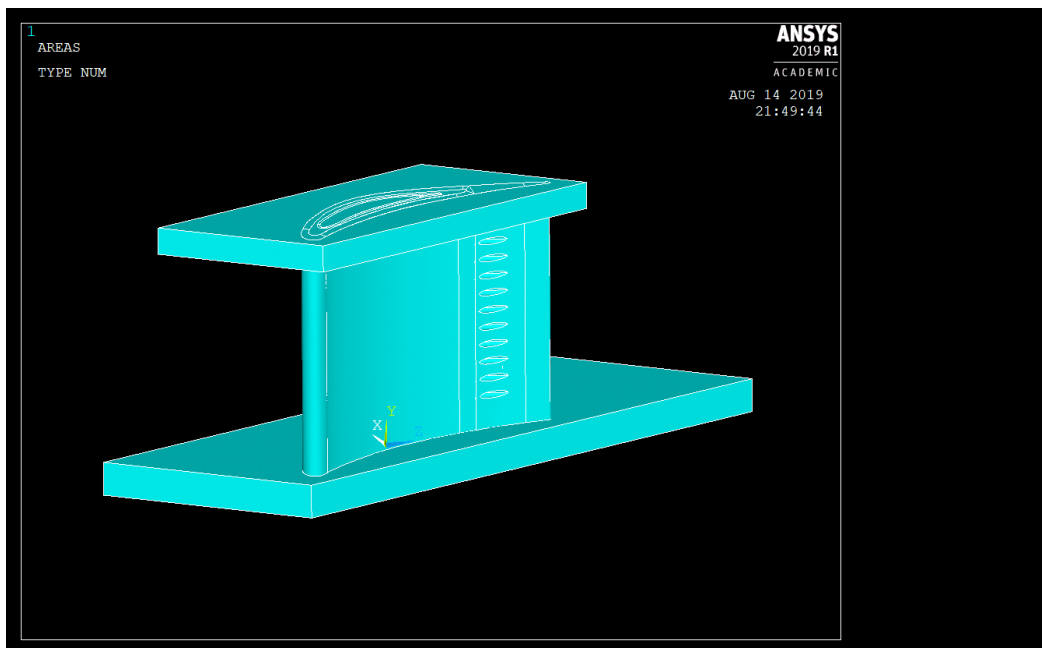
Pro samotnou práci bylo využito nasnímaných dat. V CADu byl pomocí řezu lopatkou a splinu rekonstruován přibližný profil.



Obrázek 10 Profil lopatky

Ten byl následně vysunut. Po zohlednění následného řešení pomocí metod konečných prvků rozdělen na více částí. Toto zdánlivě nelogické rozhodnutí, spíše komplikující práci, se vyplatí v dalším zpracování, kdy umožní MKP řešiči vytvořit jednoduchým způsobem pravidelnou síť. Profil byl rozdělen na náběžnou hranu s velkou křivostí, odtokovou hranu, která se zužuje a pláště. Toto dělení bylo uplatněno jak na vnější plášť, tak na vnitřní těleso chlazení.

Zámky lopatky pak byly vzhledem k MKP výpočtu vymodelovány pouze jako desky. Výsledný model použitý pro MKP analýzu je znázorněn na obrázku 11.



Obrázek 11 Model lopatky

Rozbor zatížení

Rozbor

Aerodynamické síly

Profil v proudu vzduchu generuje sílu. Předmětem této práce není určování aerodynamických účinků a sil. Bylo přistoupeno k zjednodušenému přístupu.

Teplotní pole

Teplota na rozváděcí lopatce je vysoká, lopatka je jejím působení vystavena po celou dobu letu. Rozváděcí lopatka je první překážkou proudu plynu vycházejících ze spalovací komory. Vzhledem k vysokým teplotám se jedná o dominantní namáhání.

Napětí v lopatce vzniká ohříváním a ochlazováním jednotlivých částí. Například odtoková hrana lopatky, která se zužuje a ubývá na ní materiálu, je ohřívána rychleji než zbylá část lopatky. Stejně tak vzniká pnutí při ochlazování, kdy se naopak rychleji ochladí.

Toto pnutí může v kombinaci s vadou materiálu nebo mechanického poškození vést ke vzniku a šíření únavové trhliny

Silové působení na lopatce

Jak bylo uvedeno výše, nebudeme se touto silou zaobírat nikterak dopodrobna, ke stanovení této síly přistoupíme jednoduchým způsobem.

Výpočet síly

Motor AI-25TL má tah 16 800 N z technické dokumentace můžeme vyčíst účinnosti jednotlivých částí motoru:

$$\eta_{vt} = 0,834 \text{ [-]} \quad (3)$$

$$\eta_{nt} = 0,83 \text{ [-]} \quad (3)$$

Kde indexem v_t je označena účinnost vysokotlaké turbíny a indexem n_t nízkotlaké turbíny.

Jednoduchým výpočtem pak můžeme dopočíst tah na nízkotlaké turbíně:

$$T_{nt} = T_m \cdot \eta_{nt}$$

Rovnice 1 Tah nízkotlaké turbíny

$$T_{nt} = 16\,800 \cdot 0,83$$

$$T_{nt} = 20\,240,96\, N$$

Stejným způsobem pak dopočteme tah na vysokotlaké turbíně:

$$T_{vt} = T_{nt} \cdot \eta_{vt}$$

Rovnice 2 Tah vysokotlaké turbíny

$$T_{vt} = 20\,240,96 \cdot 0,834$$

$$T_{vt} = 24\,269,74\, N$$

Odtud pak dopočteme sílu na jedné lopatce podělením T_{vt} počtem rozváděcích lopatek, těch je 55. Jednoduchou matematickou operací tedy dostáváme, že síla působící na lopatce je 441,3 N.

Budeme-li uvažovat rozložení sil takové, že síly se rozdělí na 2/3 na sací stranu a 1/3 na tlakovou stranu, můžeme v tomto poměru sílu rozdělit. Další dělení pak uvažujeme po hloubce profilu, který byl v této práci rozdělen na čtyři sekce. Rozdělení sil a jejich hodnoty znázorňuje tabulka.

Sekce		I.	II.	III.	IV.
Sací strana	%Celkové síly	10	40	40	10
	Síla [N]	29	118	118	29
Tlaková strana	%Celkové síly	10	40	30	20
	Síla [N]	15	59	44	29

Tabulka 4 Rozložení síly

Teplotní pole

Teplotní pole můžeme vzhledem k vzdálenosti spalovací komory od rozváděcích lopatek a tvaru spalovací komory a usměřňovacímu ústrojí považovat za homogenní.

Konkrétní čísla můžeme vyčíst z technické dokumentace motoru. V úrovni rozváděcích lopatek je teplota 1211 K a teplota chladícího sekundárního proudu 600 K.

Popis reálného poškození

Nález

Lopatka vykazuje značnou míru poškození, vedle únavové trhliny, která je předmětem této práce, se na ní nacházejí i další vady. Vzhledem k možnostem bylo rozhodnuto, že ostatní poškození nebude bráno při výpočtu v potaz. Prakticky by se jednalo o předpoklad, který by hrubě zkreslil výsledek simulace, nicméně podstatou této práce je MKP analýza právě šíření trhliny.

Poškození je patrné na první pohled, jak dokumentuje následující obrázek:



Obrázek 12 Stav lopatky

Je zřejmé, že poškození vznikala souběžně a navzájem se ovlivňovala. Komplexní řešení vzniku takto výrazného poškození by však vedlo ke složité mezioborové práci.

Můžeme vidět, že lopatka vykazuje opálení povrchu, místy jeho propálení a na odtokové hraně i vypálení. Výraznou rozevírající se přes 25 mm dlouhou trhlinu a menší trhlinu šířící se z odtokové hrany. Právě poslední zmíněnou se tato práce zabývá.

Naše trhlina je cca 6 mm dlouhá. Šíří se od odtokové hrany lopatky k jednomu z chladících kanálků.

Příčiny poškození

Poškození vzniklo vystavením lopatky vysokým teplotám. V tělese lopatky se nachází další struktura chlazení, ta je také poškozena, při převzetí lopatky v ní ještě byly drobné úlomky materiálu.

O příčinách můžeme jen spekulovat, je možné, že k poškození došlo následkem nedostatečného chlazení. Mohlo jít tedy o vadu vnitřního ústrojí. To mohlo být poškozeno při montáži, vyrobeno s vadou v materiálu, nebo jen při montáži nedokonale vyčištěno.

Další možností je nedokonalost ochranného nástřiku. Nedostatečná tloušťka vrstvy nebo její poškození při montáži.

Poškození cizím tělesem, které by bylo nasáto do motoru, bylo vyloučeno. Při demontáži lopatky nebyly nalezeny žádné cizí předměty, ani nedošlo k poškození předchozích částí motoru.

Simulace zatížení

Pro simulování zatížení a provedení výpočtu byl zvolen program ANSYS.

Příprava výpočtu

Model

Jak již bylo zmíněno, pro potřeby řešení byl vytvořen 3D model lopatky v CADu. MKP řešiče se však od klasických CADů liší, jejich účelem není tvorba modelu a výkresové dokumentace nezbytné pro výrobu, ale analýza součástí. Proto se modely stejného dílu mohou v těchto programech lišit.

Pro výpočty využívá řešič idealizované díly, tedy takové díly, kde jsou zanedbány malé rádiusy a zaoblení. Ty by na věcné řešení vliv neměly, ale mohly by vést k nárůstu počtu prvků, nárokům na výkon výpočetní techniky a času potřebného k řešení.

Náš model byl také upraven, v práci neřešíme rotorovou lopatku a zámky tak nejsou nikterak podstatné pro naše řešení a byly proto zredukovány do podoby desek. Samotné tělo lopatky pak bylo rozděleno pro snazší manipulaci na více objemů. Přejechy mezi deskou a lopatkou byly zanedbány.

Materiálová data

Tato přípravná část byla velmi náročná a obtížná. O samotné slitině, ze které je lopatka vyrobena, toho moc nevíme. Z materiálového listu:

Niklchromová slitina žáruvzdorná na odlitky						ŽS6-K
Chemické složení v %						
C	Mn	Si	Cr	Ni	W	Mo
0,13-0,20	max 0,4	max 0,4	10,5-12,5	základ	4,5-5,5	2,5-3,0
Ti	Al	Co	Fe	B		
2,5-3,5	5,0 - 6,0	4,0-5,0	max 2,0	0,02		
Tepelné zpracování						
Kalení při 1200°C 20,4 hod, ochlazení na vzduchu						
Teplotní závislost modulu pružnosti						
T [K]						
293	1073	1173	1273	1373	1473	
E [GPa]						
200	151	12,7	12	10		

Tabulka 5 Tabulka materiálových hodnot (7)

Pro účely výpočtu však potřebujeme údajů více, nemáme k dispozici údaje o hustotě, tepelné vodivosti a specifické teplotě. Bez teplotních parametrů není možné simulaci provést. Bylo tedy přistoupeno k převzetí hodnot podobných slitin. (8)

Dens	(T1) 8.4e-9	[Mgmm ⁻³]
Specific Heat	(T1) 440; (T2) 640	[mJMgK ⁻¹]
Thermal conductivity	(T1) 15; (T2) 25	[mJMg ⁻¹ K ⁻¹]

Kde T1 je 600 K a T2 1211 K, teploty působící na lopatku.

$$C = 2.29e-10 \quad [\text{m/cyklus}(\text{MPam}^{-0.5})]$$

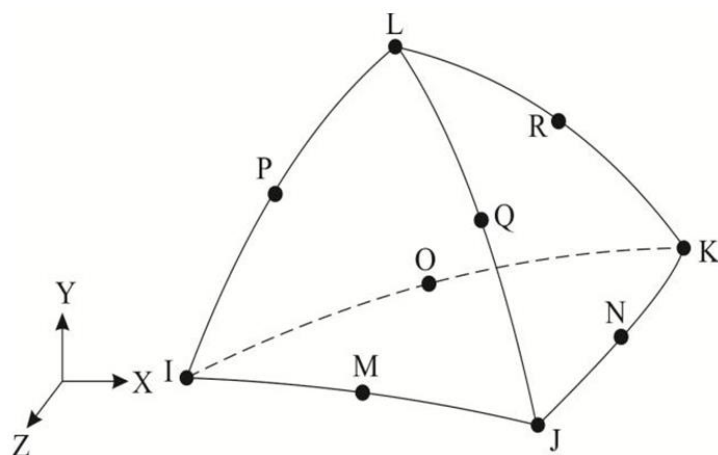
$$m = 2 \quad [-]$$

C a m jsou další materiálové parametry.

Hodnoty jsou uvedeny tak, jak jsou zadávány do ANSYSU včetně jednotek. (Důsledek zvolení mm jako jednotky délky)

Síť

Model je převeden na síť tvořenou elementy a s těmi je teprve počítáno. Pro naši analýzu byl vybrán prvek v Ansysu označen jako: SOLID187.



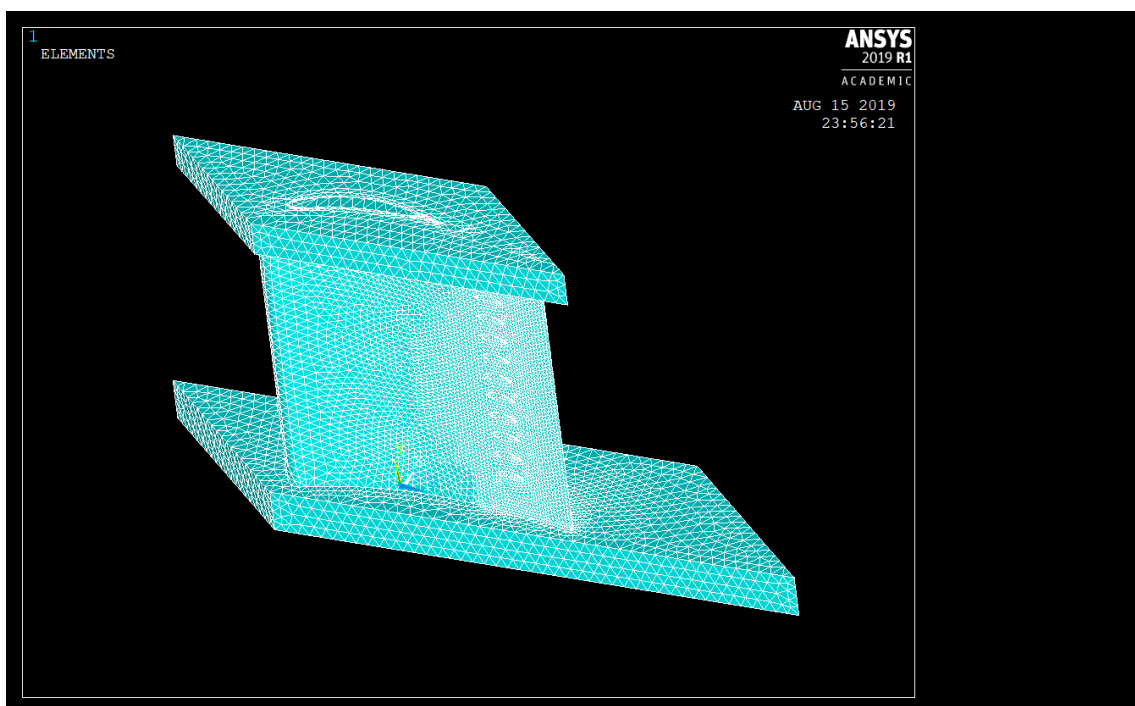
Obrázek 13 Element solid187 (9)

Tento element nebyl zvolen náhodou, vybraná metoda analýzy šíření trhlin, o které bude řeč dále, tento element vyžaduje.

Nejedná se však o jediný použitý element, jde o element strukturální analýzy, v tomto případě je však nutné provést ještě analýzu teplotní.

Oba prvky pak musí být kompatibilní tak, aby mohlo být výsledné teplotní zatížení přeneseno do úlohy strukturální. Onen párový element je označen jako: SOLID87. Jedná se také o deseti nodový tetraedr.

Samotná síť pak byla vyhotovena s ohledem na řešení v místě, kde dochází k propagaci trhliny je hustější. Velikost použitých elementů je 0.5 mm a s rostoucí vzdáleností narůstala i velikost elementů – v tělese lopatky na 1 mm a na deskách 1.5 mm. Takto vypadala kompletní síť:



Obrázek 14 Vysíťovaná lopatka

Příprava výpočtu

Teplotní analýza

V prvním výpočtu je stanoveno napětí v lopatce zanesené teplotním působením. Na vnější plášť je přivedena teplota 1211 K, teplota plynů za spalovací komorou. Na vnitřní plášť pak 600 K, tedy teplota chladicího proudu vzduchu. Rozdíl teplot a jejich vedení materiálem lopatky zavádí napětí do součásti.

Jedná se pouze o mezikrok a hodnoty nebyly vykreslovány.

Strukturální analýza

Zde bylo v první řadě nutné transformovat teplotní prvky na strukturální, v ANSYSU se to řeší příkazem „etchg“ (solid87 → solid187).

Dalším krokem je načtení dat z předešlé teplotní analýzy „Ldread,...“

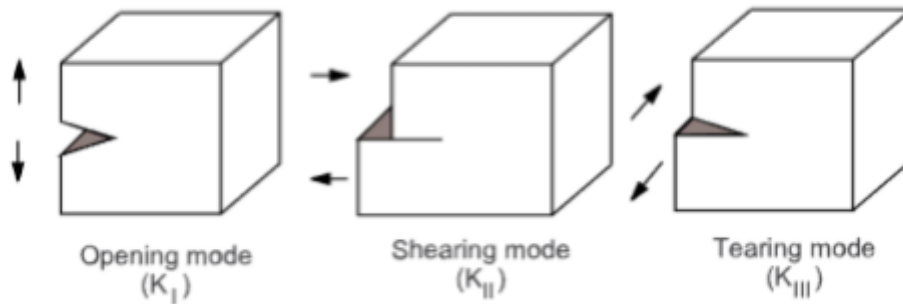
Nyní je možné přistoupit k dalšímu kroku analýzy. Postup je stejný jako u teplotní. Definujeme síly působící na lopatce. V našem případě je zavedeme přes nody. Okrajové podmínky jsou definované na desky lopatky – zjednodušené zámky, z obrázku 6 je patrné že lopatce jsou odebrány všechny stupně volnosti. Na deskách jsou tedy definovány stejné vazby.

Tímto by klasická strukturální analýza končila, následovalo by řešení, které by ukázalo rozložení napětí nebo například deformace.

Únavové šíření trhliny

Pro řešení takovýchto úloh existuje mnoho hledisek a více postupů, v praxi se nejčastěji využívá J-integrál a K-faktor. Pro účely této práce bylo zvoleno řešení pomocí K-faktoru (anglicky SIF – stress intensity factor)

Tento přístup rozděluje šíření trhliny do tří módů zatěžování:



Obrázek 15 Módy zatěžování (10)

Jednotlivé módy pak mají odpovídající K-faktory:

K_I - Tahový mód namáhání, volné povrchy se oddalují při zachování symetrie

K_{II} - Rovinný smykový mód

K_{III} – Antirovinný smykový mód

Výpočet těchto faktorů pro nekonečné tělesa:

$$K_I = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$$

$$K_{II} = \tau \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$$

$$K_{III} = \tau \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$$

Pro reálná tělesa je pak přidána tvarová funkce Y , tato korekční funkce v sobě zahrnuje geometrii, volné okraje, síly – okrajové podmínky

$$K_I = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \cdot Y_I$$

$$K_{II} = \tau \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \cdot Y_{II}$$

$$K_{III} = \tau \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \cdot Y_{III}$$

Tyto módy zatěžování lze svázat pomocí hustoty deformační energie, díky které je možné dopočítat kritické hodnoty K-faktoru a směr šíření trhliny.

K faktor se v této práci počítá jako kritérium šíření trhliny a je schován ve zvolené metodě.

Volba metody řešení

Ansysis nabízí několik přístupů, pro účely této práce byl zvolen postup metodou SMART.

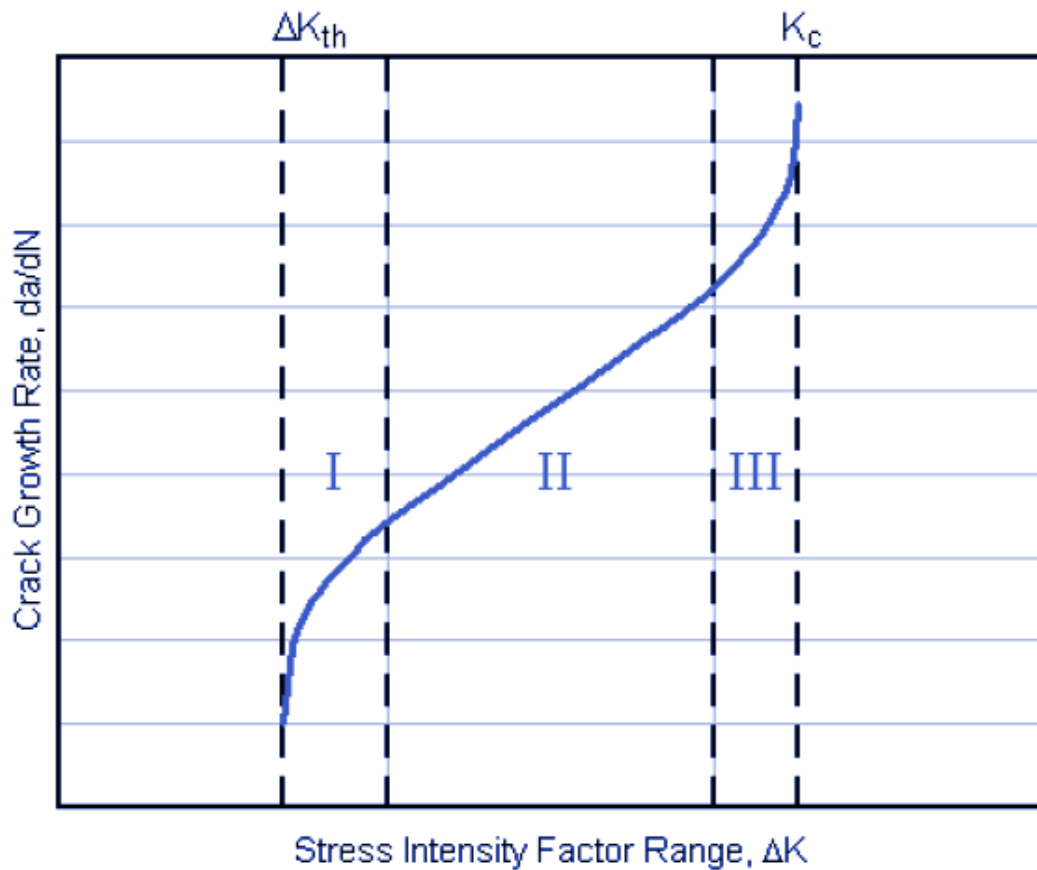
SMART

Separating, Morphing, Adaptive and Remeshing Technology. Metoda, která řeší šíření trhliny na základě vstupních dat, se schopností měnit síť podle měnící se geometrie trhliny automaticky po každém kroku.

Bez této metody by řešení bylo pracné, náročné a zdlouhavé. Představme si manuálně pracný postup, kdy musíme pro počáteční délku trhliny a_0 a zatížení dopočítat přírůstek délky trhliny, ten přidat k původní trhlíně a činnost opakovat. Pro analytické řešení jednoduchého školního příkladu je tento postup možný. Pro komplexní díl a zatěžování je ale nemyslitelný. Měnit po každém kroku geometrii a síť by byl téměř nemožný úkol.

Ve specifikacích této metody se také dočteme, že podporuje pouze elementy typu SOLID187. Těmito elementy byla vysíťována lopatka právě kvůli řešení touto metodou.

Metoda je schopna řešit jak statické, tak únavové úlohy za pomocí výše zmíněného K-faktoru nebo J-integrálu. A to v rámci platnosti Parisova zákona:



Obrázek 16 v-ΔK křivka (11)

Region I a III grafu jsou pro naše řešení nepoužitelné, metoda pracuje v lineární části diagramu. V prvním regionu dochází k iniciaci pozvolnému šíření trhliny (oblast popisuje vzorec podle Lukáše a Klestila), ve III regionu trhlina naopak dosahuje kritických mezí a rychlost šíření roste nade všechny meze. (Formanova oblast)

Lineární oblast popisuje Parisův zákon:

$$v = A \cdot \Delta K^m$$

Kde A a m jsou materiálové konstanty. V Ansysu značené jako C a m.

Výpočet

V Ansysu definujeme nový výpočet. Zadáme, jakou metodou má být počítán, jaký přístup zvolíme (J-integrál / K-faktor). Jestli se jedná o statickou nebo únavovou úlohu.

V našem případě by toto nastavení mohlo vypadat následovně:

C = 2,29e-10

m = 2

tb,cgcr,2,,,paris

tldata,1,c,m

tímto krokem jsme definovali Parisovu oblast výpočtu a její parametry.

Dále je nutno určit geometrii trhliny, tedy její čelo a plochy. Čelo trhliny je v této metodě definováno lokálním souřadnicovým systémem. Ten musí být definován následovně:

Osa X směřuje ve směru předpokládaného šíření trhliny

Osa Y je normálová k tomuto směru

Osa Z pak určuje čelo trhliny

Následně definujeme horní a dolní plochu trhliny.

Po splnění těchto geometrických požadavků definujeme, jakým přístupem má metoda získávat informace o trhlíně. V našem případě, jak bylo uvedeno výše, pomocí K-faktoru.

Cint,new,1

Cint,type,sifs (sif – stress intensity factor = K-faktor)

Cint,ctnc,crack crack takto bylo pojmenováno čelo trhliny

Cint,edir,cs,0,x tento příkaz udává jakým směrem se bude trhlina šířit – lokální souřadnicový systém (cs) ve směru osy x

Cint,norm,0,2 definice normály

Cint,surf zde definice plochy trhliny

Cint,ncont,5 počet kontur

Tímto máme vyřešené vstupy pro samotný výpočet šíření trhliny, tuto funkci zavoláme pomocí příkazu Cgrow.

Cgrow, new,1 vytvoření nového výpočtu

Cgrow, cid,1

Cgrow, method, smart definování metody výpočtu

Cgrow, fcg,meh,LC přístup únavového řešení pomocí cyklů

Cgrow, fcg, damx,0.5 maximální možný přírůstek trhliny za cyklus v mm

Cgrow, fcg, srat, 0 stress ratio = součinitel nesouměrnosti

Cgrow, fcoption,mtab,2 načtení dat pro Parisovu oblast

Vyhodnocení nálezu a výpočtu

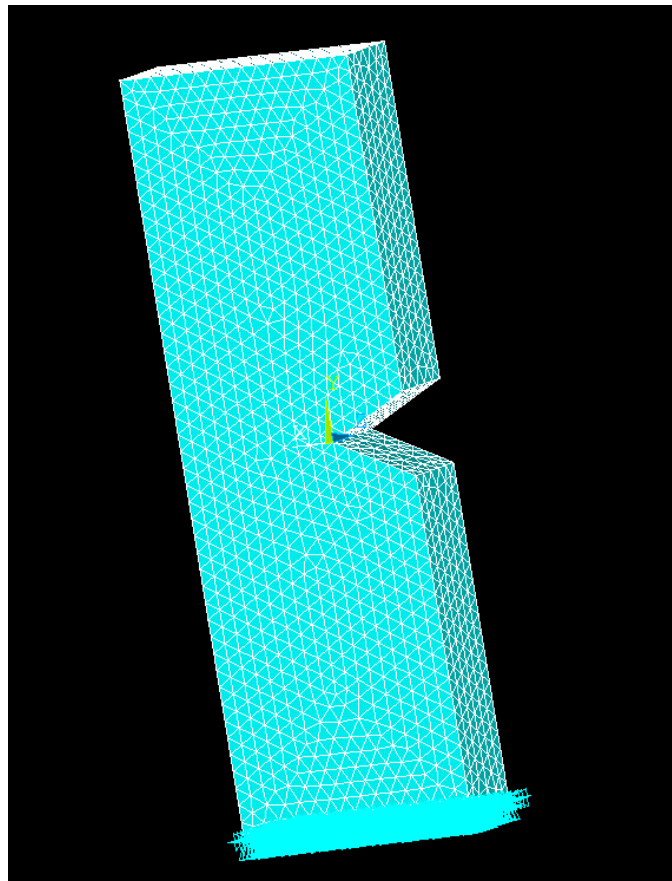
Nález

Z popisu reálného poškození lopatky v předchozí kapitole je jasné, že tato lopatka je neopravitelně poškozena a musí být nahrazena novou.

Výpočet

Výpočet byl odladěn na jednoduchém tělese s vrubem. Nejedná se o součást práce jako takové, úloha sloužila k osvojení a pochopení výpočetní metody. Pro pochopení je jednodušší aplikovat postup na elementární geometrii, projít celé řešení a vypořádat se s nejasnostmi a nedostatky. Tak aby při následném řešení vlastní úlohy veškeré nástrahy podchyceny již ze začátku.

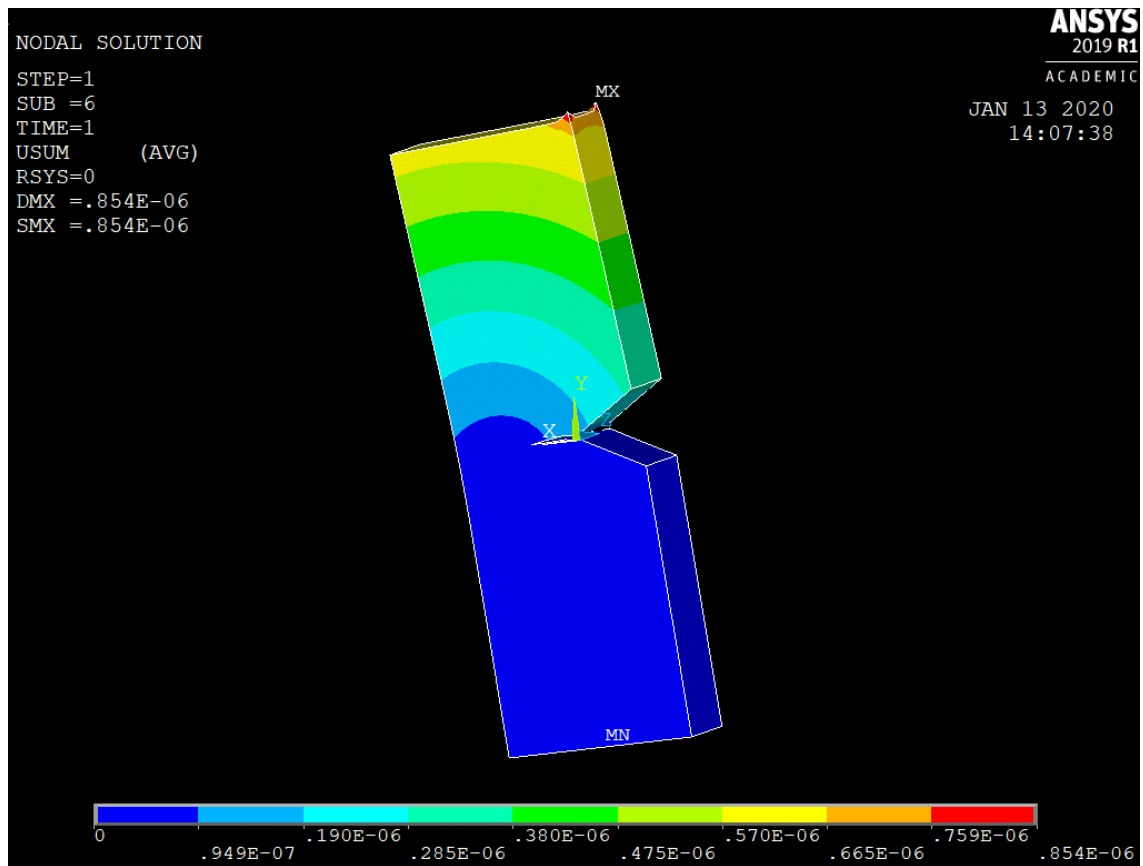
Pro tyto účely byl sepsán script, definující geometrii, počáteční stav trhliny, prvky a síť.



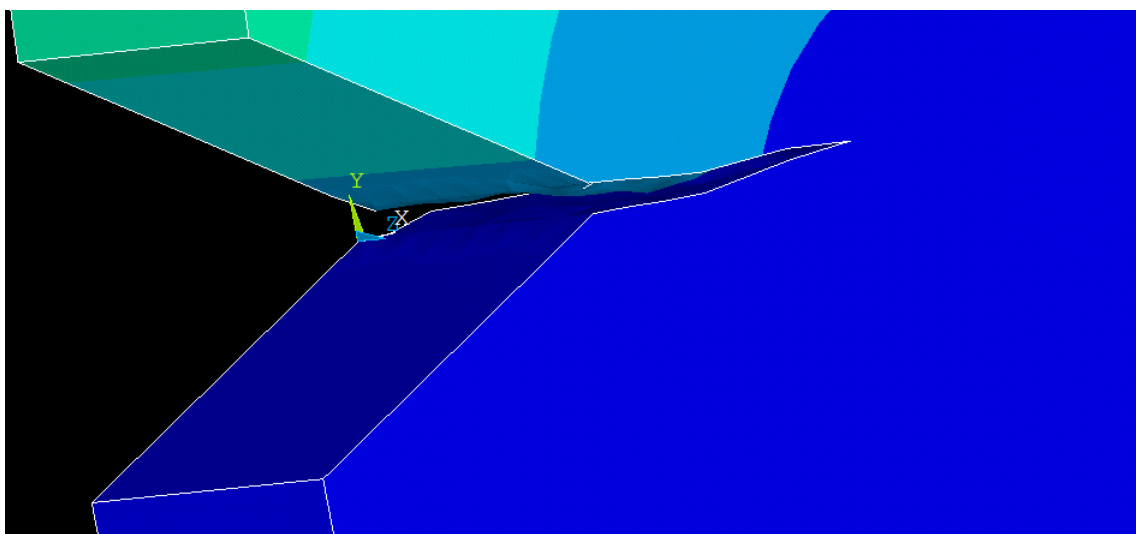
Obrázek 17 Zjednodušená úloha

Takto připravený model byl zatížen silou a doplněn o okrajové podmínky. Síla byla zavedena do modelu bodově. Nejedná se o korektní postup, ale pro ověření funkčnosti plně dostačující.

Dále byla provedena analýza šíření trhliny, její grafický výstup:



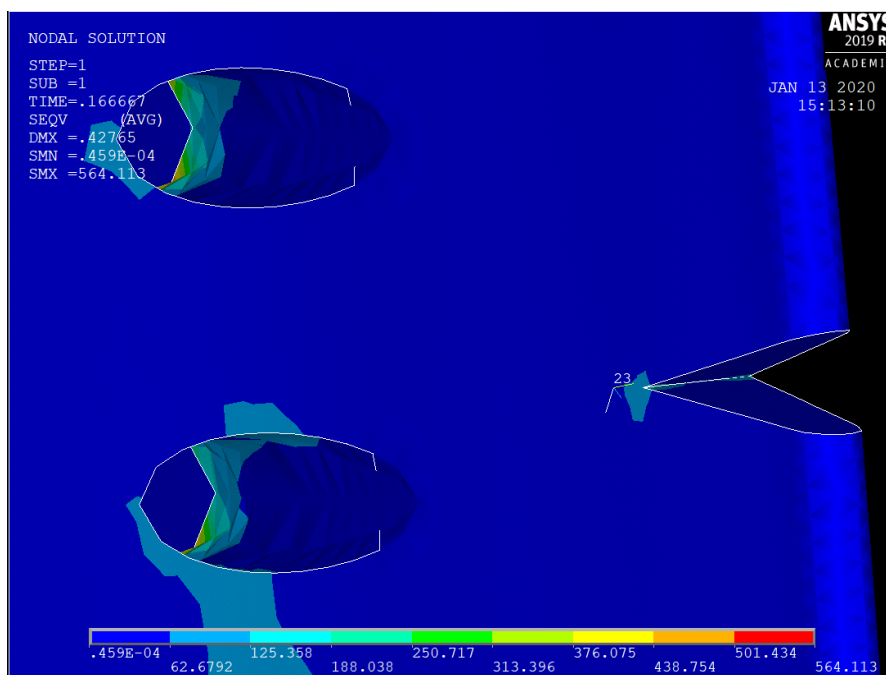
Obrázek 18 Řešení zjednodušené úlohy



Obrázek 19 Detail trhliny

Obrázek 19 znázorňuje trhlinu tak jak se podle analýzy bude propagovat. Očekávaný směr propagace a výsledky z MKP se shodují.

Samotné řešení úlohy bylo provedeno analogicky za použití stejné metody. Analýza (SMART) však neprokázala šíření trhliny. Dá se tedy konstatovat, že při okrajových podmínkách, zajišťující dostatečnou tuhost, nemá na propagaci trhliny vliv síla ani teplotní pole.



Obrázek 20 Čelo trhliny

Obrázek 20 ukazuje hodnoty napjatosti na čelo trhliny, ty nejsou dostatečné pro rozvoj trhliny.

Návrh řešení

Praktické řešení

Při provádění generální opravy jsou takto závažně poškozené díly vyloučeny. Při opětovné montáži motoru jsou pak nahrazeny novými.

Výpočet

Výpočet provedený v této práci je zatížen velkou škálou nejistot. Od začátku práce se naakumulovalo množství ústupků a zjednodušujících předpokladů. Jedná se tedy spíše o parametrický model, který by relevantnější data přinášel po odstranění těchto nedostatků.

Vliv geometrie

Absence výrobních výkresů vede k zavedení odchylek od reálné lopatky už na počátku tvorby modelu. Pro korektní řešení by tedy bylo nutné znát přesnou geometrii. A vytvořit tak realitě věrný model.

Pro účely této práce nebylo možné zjišťovat geometrii na přesných měřicích strojích, ať už z časových nebo finančních důvodů.

Vliv materiálu

Zde je také velký prostor pro zdokonalování. O použité slitině nejsou dostupná přesná data. Ve výpočtu byla použito průměrných hodnot podobných slitin na bázi niklu a chromu.

Získání přesných dat od výrobce motoru je složité, provádět experimenty pak velmi náročné, zdlouhavé a drahé. Navíc by to vyžadovalo více vzorků materiálu, které nemáme k dispozici.

Vliv zatížení

Není známa historie zatěžování rozváděcí lopatky, což je v lomové mechanice a únavě obecně problém. Čím přesnější informace o historii zatěžování máme, tím přesněji jsme schopni počítat rychlost šíření trhliny, a tedy predikovat, kdy dojde k oslabení nosného průřezu natolik, že dojde k destrukci.

Neznalost extrémů zatěžování také není optimální. Na čele trhliny vzniká plastická zóna. Významné odlehčení v zatížení tak může vést k zmenšení této zóny, tedy k zmenšení odporu, který je nutno překonat k šíření trhliny a může dojít ke snížení životnosti takto odlehčené části. Naopak jednorázové přetížení může vést k nárustu této plastické zóny, vzniku záporného zbytkového napětí, které bude trhlinu naopak zpomalovat a povede tedy k nárustu životnosti oproti předpokladu.

Vzhledem k účelu letounu, výcviku armádních letců se nedá očekávat pravidelné zatěžování tak, jako u civilních letadel, které mají stejný charakter zatěžování po celou dobu svého života.

Závěr

Z předchozí kapitoly plyne, že je prostor pro zpřesnění výpočtu. Jednotlivé kroky zmíněné výše by však vydaly samy na rozsáhlou práci a odvedly by pozornost od podstaty této práce – únavového šíření trhliny.

Přes nepřesnosti zanesené do výpočtu, byla provedena analýza, metoda zvolená pro výpočet je ověřená a funkční. Při znalosti přesných vstupů a odbourání zmíněných nedostatků může metoda přinést přesné řešení problému.

Z výsledků lze vyčíst, že se nejedná o únavovými principy vzniklou a šířenou trhlínu. Výpočet neprokázal vliv zatížení na rozvoj trhliny. Poškození s ohledem na nález vzniklo neúměrným teplotním zatížením povrchu lopatky.

Seznam obrázků

OBRÁZEK 1 DOPROVODNÝ L-39 (1)	12
OBRÁZEK 2 TŘÍ POHLEDOVÝ VÝKRES L-39 (1)	12
OBRÁZEK 3 LETECKÝ MOTOR AI-25TL (4)	15
OBRÁZEK 4 TURBÍNA (5)	23
OBRÁZEK 5 ROZVÁDĚCÍ ÚSTROJÍ VYSOKOTLAKÉ TURBÍNY MOTORU (5)	24
OBRÁZEK 6 3D MODEL ROZVÁDĚCÍHO ÚSTROJÍ (6)	25
OBRÁZEK 7 STRUKTURA, ZÍSKÁNA ULTRAZVUKOVOU METODOU	27
OBRÁZEK 8 ULTRAZVUKOVÝ MODEL	27
OBRÁZEK 9 ROZŘEZANÁ ROZVÁDĚCÍ LOPATKA	28
OBRÁZEK 10 PROFIL LOPATKY	29
OBRÁZEK 11 MODEL LOPATKY	29
OBRÁZEK 12 STAV LOPATKY	33
OBRÁZEK 13 ELEMENT SOLID187 (9)	37
OBRÁZEK 14 VYSÍŤOVANÁ LOPATKA	38
OBRÁZEK 15 MÓDY ZATĚŽOVÁNÍ (10)	40
OBRÁZEK 16 V- Δ K KŘIVKA (11)	42
OBRÁZEK 17 ZJEDNODUŠENÁ ÚLOHA	45
OBRÁZEK 18 ŘEŠENÍ ZJEDNODUŠENÉ ÚLOHY	46
OBRÁZEK 19 DETAIL TRHLINY	46
OBRÁZEK 20 ČELO TRHLINY	47

Seznam tabulek

TABULKA 1 TABULKA ZÁKLADNÍCH TECHNICKÝCH ÚDAJŮ L-39 (2)	13
TABULKA 2 TABULKA ZÁKLADNÍCH TECHNICKÝCH ÚDAJŮ AI-25TL (3)	15
TABULKA 3 SOUPIS OPERACÍ GENERÁLNÍ OPRAVY LOPATKY	20
TABULKA 4 ROZLOŽENÍ SÍLY	31

Seznam rovnic

ROVNICE 1 TAH NÍZKOTLAKÉ TURBÍNY	31
ROVNICE 2 TAH VYSOKOTLAKÉ TURBÍNY	31

Reference

1. **Hančar, Miroslav.** l-39. *l-39.cz*. [Online] [Citace: 2. 8 2019.] http://l-39.cz/L-39_historie.html.
2. **Ministerstvo obrany.** *acr.army*. [Online] [Citace: 2. 8 2019.] <http://www.acr.army.cz/technika-a-vyzbroj/letecka/-l-39-albatros-89936/>.
3. **Zadavatel.** L-39 ZA Albatros. *TE-2007*.
4. **Motor Sich JSC.** *motorsich*. [Online] 12. 8 2019. [Citace: 13. 8 2019.] <http://www.motorsich.com/eng/products/aircraft/tde/ai-25tlsh/>.
5. **Letecký dvouproudý turbínový (turboreaktivní) motor.** *Technický popis - I. série*. Moskva : Vydavatelství Strojírnoství, 1971.
6. **Описание конструкции двигателя АИ-25.** <https://ai-25.ucoz.ru>. [Online] 2019. [Citace: 10. 8 2019.] <https://ai-25.ucoz.ru/index/0-37>.
7. **Zadavatel. Materiálový list.**
8. **Special materials.** *specialmaterials.com*. *Specialmaterials*. [Online] [Citace: 10. 8 2019.] <http://www.specialmetals.com/assets/smc/documents/alloys/inconel/inconel-alloy-625.pdf>.
9. **Pavol Lengvarský, Jozef Bocko, Matin Hagara.** *Science and Education Publishing*. *sciepub.com*. [Online] [Citace: 12. 8 2019.] <http://pubs.sciepub.com/ajme/1/7/24/figure/4>.
10. **ANSYS.** *ANSYS_Mechanical_APDL. Fracture analysis guide*. 2019.
11. **engineersedge.** *engineersedge.com*. [Online] [Citace: 13. 1 2020.] https://www.engineersedge.com/material_science/fatigue_crack_growth_analysis_review_10071.htm.