



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**  
**FAKULTA STROJNÍ**

**DENNIS ZDĚNEK STRNAD**

**OPRAVY ODLITKŮ PRO LETECKÝ PRŮMYSL**

**Bakalářská práce**

**2021**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Strnad** Jméno: **Dennis Zděnek** Osobní číslo: **475015**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**  
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**  
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Opravy odlitků pro letecký průmysl**

Název bakalářské práce anglicky:

**The casting repair for aircraft industry**

Pokyny pro vypracování:

1. Úvod do problematiky
2. Odlitky a materiály použité v leteckých motorech
3. Možnosti oprav leteckých motorů - proces homologace
4. Analýza prasklých dílů a realizace oprav
5. Zhodnocení metod a závěr

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**doc. Ing. Aleš Herman, Ph.D., ústav strojírenské technologie FS**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **15.04.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **06.08.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2021**

doc. Ing. Aleš Herman, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.  
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem předloženou bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením pana doc. Ing. Aleše Hermana Ph.D. a použil jsem pouze literaturu uvedenou v seznamu použité literatury.

**V Praze dne .....**

.....

**Dennis Zděnek Strnad**

## **Poděkování**

Na tomto místě bych rád poděkoval především panu doc. Ing. Aleši Hermanovi, Ph.D. za odborné vedení práce a jeho cenné rady ohledně obsahu a struktury tohoto díla. Velký dík patří dále Oldřichu Altmanovi, Romanu Buriánkovi, Jiřímu Podlipskému a Jaroslavu Trojanovi za poskytování odborných informací a výpomoci během praktické části této práce. Miloši Ramertovi za zprostředkování dílů, materiálu a letounu, bez kterých by tato práce nevznikla. Dále bych rád poděkoval Jiřímu Vokurkovi, Ondřeji Klenkovi, Matějovi Zrzavému za pomocnou ruku během provádění opravy a montáže motoru. V neposlední řadě patří poděkování mé rodině a přítelkyni Ing. Kristýně Jupové, především za velikou podporu a pomoc s technickou stránkou této práce.

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA STROJNÍ**

**OPRAVY ODLITKŮ PRO LETECKÝ PRŮMYSL**

**ABSTRAKT**

Cílem této bakalářské práce je provést nestandardní opravu prasklin odlitků klikových skříní leteckých motorů metodami prováděnými za studena. Následně tuto metodu ověřit v praxi.

**ABSTRACT**

The aim of this bachelors thesis is to perform unstandard repairs of castings of cracked aircraft engine blocks with cold performed methods. Secondly perform tests of these repairs.

**KLÍČOVÁ SLOVA**

Motor, Oprava, LOM Praha, M-137, M-337, Zlín, Prasklina, Cold welding, Metal plastic, Letoun

**KEY WORDS**

Engine, Repair, LOM Praha, M-137, M-337, Zlín, Crack, Cold Welding, Metal plastic, Plane

# OBSAH

<b>OBSAH .....</b>	<b>4</b>
<b>SEZNAM ZKRATEK .....</b>	<b>6</b>
<b>1 ÚVOD .....</b>	<b>7</b>
1.1 popis klikové skříně motoru .....	8
<b>2 POPIS PROBLEMATIKY .....</b>	<b>9</b>
<b>3 ODLITKY A MATERIÁLY POUŽITÉ V LETECKÝCH MOTORECH.....</b>	<b>13</b>
3.1 Hliníkové slitiny .....	13
3.2 Hořčíkové slitiny .....	14
3.2.1 Slitina AZ-91 .....	14
3.3 ostatní materiály.....	14
3.4 Příklady použití materiálů na leteckém motoru řady m .....	15
3.4.1 Kliková skříně .....	15
3.4.2 Válce.....	16
3.4.3 Hlavy.....	16
3.4.4 Ojnice .....	16
3.4.5 Kliková a vačková hřídel .....	17
3.4.6 Ventily.....	17
3.4.7 Kotvicí svorníky.....	17
<b>4 MOŽNOSTI OPRAV LETECKÝCH MOTORŮ A PROCES HOMOLOGACE .....</b>	<b>18</b>
4.1 Možnosti oprav prasklin ODLITKŮ leteckých motorů.....	18
4.1.1 Trhlina v materiálu .....	18
4.1.2 Stop drilling .....	21
4.1.3 Svařování.....	22
4.2 Další způsoby oprav prasklin klikových skříní .....	24
4.2.1 Lock and stitch .....	25
4.2.2 Aditivní přísady .....	28
4.2.3 Tmelení (cold welding) .....	28
4.3 Proces homologace – schvalování oprav v letectví .....	30
4.3.1 předpisy opravy.....	30
4.3.2 Oddíl A – technické požadavky .....	31
4.3.3 Shrnutí postupu schvalování pro daný případ Opravy .....	35

<b>5 PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>37</b>
<b>5.1 Historie zkoumané klikové skříně.....</b>	<b>37</b>
<b>5.2 postup Analýzy odlitku klikové skříně.....</b>	<b>38</b>
5.2.1 Očištění odlitku .....	38
5.2.2 Sběr dat .....	38
5.2.3 analýza klikové skříně.....	39
5.2.4 simulace vzniku trhliny .....	44
<b>5.3 Výběr optimální metody opravy pro realizaci opravy zjištěných defektů .....</b>	<b>45</b>
<b>5.4 Oprava prasklin odlitku klikové skříně .....</b>	<b>48</b>
5.4.1 Teoretický postup opravy praskliny .....	48
<b>6 OPRAVA PRASKLIN.....</b>	<b>49</b>
<b>6.1 DEMONTÁŽ SVORNÍKŮ .....</b>	<b>49</b>
<b>6.2 ODSTRANĚNÍ DEFEKTŮ .....</b>	<b>49</b>
<b>6.3 aplikace metal-platic materiálu .....</b>	<b>52</b>
<b>6.4 Sestrojení motoru .....</b>	<b>56</b>
6.4.1 obnovení děr pro svorníky.....	56
<b>6.5 Ověření spolehlivosti opravy odlitku .....</b>	<b>58</b>
6.5.1 Kompletace motoru do provozního stavu .....	58
<b>6.6 Průběh zkoušky motoru .....</b>	<b>59</b>
<b>6.7 hodnocení motorové zátěžové zkoušky .....</b>	<b>61</b>
<b>7 VYHODNOCENÍ OPRAVY PO MOTOROVÉ ZKOUŠCE .....</b>	<b>62</b>
7.1 Závěrečné zhodnocení.....	64
<b>ZDROJE.....</b>	<b>65</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>69</b>

## **SEZNAM ZKRATEK**

LOM Praha – Letecké opravny Malešice Praha

Z-226MS – Zlín 226 MS

Na – Sodík

Ce – Cerium

Co – Kobalt

Pt – Platina

Al – Hliník

Zn – Zinek

Mn – Mangan

FAA – Federal Aviation Authority

EASA – European Union Aviation Safety Agency

MTOW – Maximální vzletová hmotnost letounu

ETSO – Evropský Technický Normalizační Příkaz

DOA – Oprávnění organizace k vývoji a projektování

GAC – Glider Aerobatic Club



# 1 ÚVOD

V této bakalářské práci jsem se rozhodl věnovat tématu opravy praskajících odlitků leteckých motorů, konkrétně klikových skříní motorů řady M. Motivací pro výběr této problematiky je fakt, že množství případů klikových skříní postižených touto vadou přibývá a s tím jsou úzce spojené i podmínky provozování letounů. Tyto motory jsou převážně využívány jako pohonné jednotky výrobců sportovních letounů značek Moravan, Aero, Zlín, Let a Orličan, které tvořily ikonické stroje Československého letectví. Díky této vadě přibývá uzemněných letounů a tím postupně mizí z českých nebes.

V dřívějších dobách se tento defekt řešil tím způsobem, že se vadný motor demontoval z letounu a nahradil se novým, či se provedla provizorní oprava, která prodloužila životnost motoru do nejbližší generální údržby a poté následovala celková výměna klikové skříně. Řešení pomocí výměny nové klikové skříně bylo účinné, ale bohužel tyto skříně jsou v dnešní době již prakticky nedostupné.

Pokusy o opravy této praskliny výrobcem LOM Praha (Letecké opravny Malešice) byly již v minulosti prováděny svařovací metodou. Z důvodu špatného přístupu k místu opravy, rozdílných rozměrů stěn a vysokému tepelnému ovlivnění skříně bylo od této opravy odstoupeno.

Mým cílem v této práci je za pomoci moderních technologií dosáhnout účinné opravy této vady a vad stejného charakteru, následně tuto metodu ověřit v praxi.

Tato bakalářská práce je rozdělena do dvou částí, teoretické a praktické. V části teoretické nejdříve popíši danou problematiku, následně se zmíním o materiálech používaných v leteckých motorech, možnostech oprav odlitků nejen v letectví a postup homologace opravy v letectví.

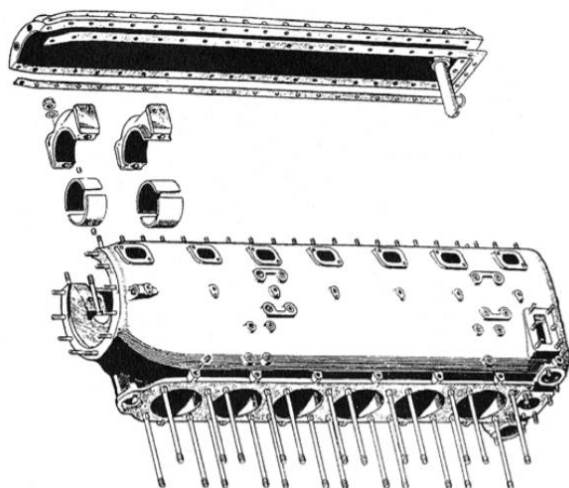
Po části teoretické následuje praktická část, která je rozdělena do dvou úseků, a to Analýza prasklin dílů motoru a realizace vlastní opravy s její praktickou zkouškou. Na konci bakalářské práce zhodnotím metodu použitou pro opravu vadných částí případně průběh zkoušek dílu.

Ve své práci bych rád dosáhl účinné metody opravy defektních klikových skříní a do budoucna se pokusil tuto metodu certifikovat, aby se tak prodloužila životnost ikonických letounů, které by jinak přišly o letovou způsobilost.

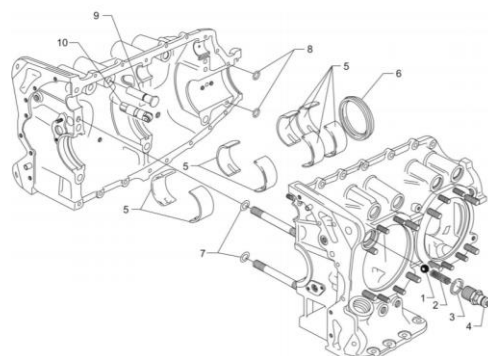
## 1.1 POPIS KLIKOVÉ SKŘÍŇE MOTORU

Jedná se o základní stavební kámen leteckého motoru, jenž musí vyhovovat spoustě požadavkům a jeho bezchybná konstrukce a dobrý návrh je nezbytný pro správné a spolehlivé fungování motoru a celého letounu. [1]

Kliková skříň tvoří tuhý základ pro uložení klikové hřídele a uchycení válců, na které jsou dále navěšeny hlavy motoru a rozvodový mechanismus. Skříň musí přenášet tah od vrtule a nevyvážené složky setrvačných sil klikového mechanismu na drak letounu prostřednictvím motorového lože. Tlak plynů ve válcích působí stejnou silou opačného smyslu na hlavu a klikový hřídel. Proto je kliková skříň značně namáhána v části mezi hlavními ložisky a upevněním válců. Část skříně, na kterou se přenáší namáhání, se nazývá nosná část. Z důvodu usnadnění montáže a údržby motoru jsou klikové skříně složeny z několika částí spojených závrtnými šrouby nebo svorníky. Nosná část klikové skříně řadového motoru (viz. obr. č. 1, 2) je tvořena bočními stěnami, plochami pro upevnění válců a příčnými přepážkami, v nichž jsou hlavní ložiska. [2]



**Obrázek 1: Kliková skříň řadového motoru M-337A [29]**



**Obrázek 2: Kliková skříň ležatého motoru Lycoming [30]**

Motory vyráběné výrobcí Lycoming a Continental využívají ležaté uspořádání válců, lidově nazývané boxery. Tyto motory mají podélně půlenou klikovou skříň, ve které je uložena kliková hřídel a jsou k sobě staženy pomocí šroubů (viz. obr. č. 15). Tento typ uspořádání také využívá závrtné šrouby a svorníky pro zajištění montáže válců ke skříni.

## 2 POPIS PROBLEMATIKY

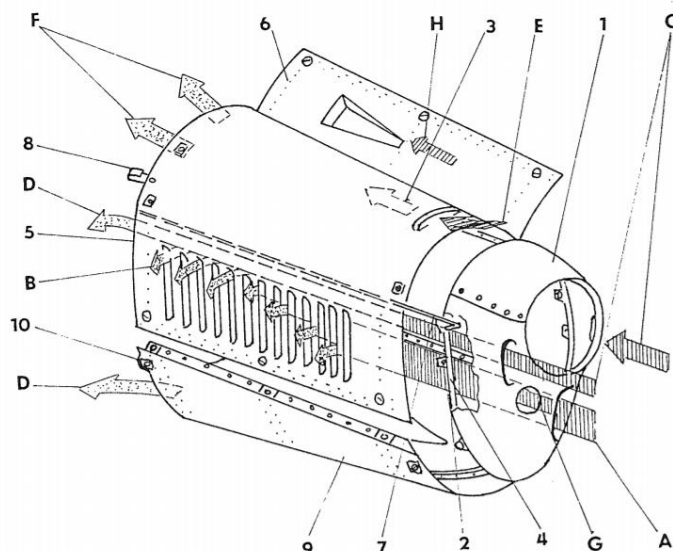
Převážná většina motorů řady „M“ je používána na letounech leteckých výrobců Moravan, Zlín, Aero a Orličan. Jedná se o invertní, řadové, vzduchem chlazené pístové motory ve čtyř (4), nebo šesti (6) válcovém uspořádání. Všechny tyto verze mají klikovou skříň odlitou ze slitiny značení AZ-91. [3]

Tento materiál je slitina hořčíku, hliníku a zinku, vyznačující se vysokou měrnou pevností, výbornými korozními vlastnostmi a dobrou zabýhavitelností během odlévání. Jelikož tento materiál obsahuje hořčík, který je vysoce hořlavý, je nutno samotné lití provádět v ochranné atmosféře ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ) k prevenci vznícení. Tento materiál má také nízkou hustotu, nižší než hliník, a tím se dosahují lehké odlitky, které jsou pro letecké využití klíčové. [4]

Šesti (6) válcové verze těchto motorů se využívají v letounech značení Zlín Z-226, Z-326, Z-526, Z-726, Z-43, Z-142, Z-50. Tyto letouny se během normálního provozu nepotýkají se žádnými vážnými závadami a létají bez problémů již více než 60 let. Avšak některé tyto letouny jsou využívány k akrobatickému a aerovlekovému provozu, kde dochází k výraznému zatížení pohonné jednotky, jak tepelně, tak silami působící na tento poměrně podlouhlý motor.

U letounů, které se používají k těmto účelům byl pozorován zvýšený výskyt trhlin na vnitřní straně klikové skříňe v místech pod kotvícími svorníky na stažení válců, hlav a vačky k bloku motoru. Tato trhlina, pokud není odhalena v čas, může způsobit narušení integrity odlitku motoru, únik oleje, pokles tlaku oleje, a tím ohrozit bezpečnost letu.

Akrobatické letouny a letouny používané pro aerovlekový provoz mají společný charakter zatížení pohonné jednotky, který vede k těmto prasklinám. Jedná se o prudkou změnu teploty motoru spojenou s vibracemi a zatížením od vrtule letounu.



1-dvoudílná maska motoru, 2-uchycení masky, 3-horní odnímací kryt, 4-výztuha čelního krytu, 5-pravý boční odklápěcí kryt s otvory výstupu vzduchu od válců, 6-levý boční odklápěcí kryt, 7- stěžečky bočních krytů, 8-podpěra zajištění zvednutého bočního krytu, 9-spodní kryt s otvory pro výfuky, 10-upevňovací zámky krytů

**Obrázek 3: Prostupový diagram chladícího vzduchu kapotami letounu Z-226MS [31]**

Jelikož jsou tyto motory vzduchem chlazené, je složité udržet konstantní teplotu na celé délce motoru od prvního (předního), po šestý (nejzazší) válec ve směru letu. Schéma toku chladícího vzduchu proudící v kapotáži mezi deflektory můžeme vidět na obrázku č.3.

Snímač ukazatele teploty hlav válců motoru se nachází mezi zapalovací svíčkou a hlavou na čtvrtém válci. Během stoupání mají tyto motory teplotu na hlavách motoru kolem 180 °C, v letních měsících se tyto teploty blíží 200 °C. Jakmile aerovlekový letoun započne klesání po odpojení vlečeného kluzáku, nebo akrobatický letoun po vystoupení do akrobatické výšky započne akrobacii, rychlosti letounů se prudce zvýší ze 120 km/h na 200 km/h. Hodnota ukazatele teploty hlav motoru se rapidně sníží ze 180 – 200 °C na 120 °C během přibližně dvou minut. Jelikož je ukazatel teploty hlav válců motoru na čtvrtém válci a chladící vzduch vstupuje do motoru skrz kapotáž nápořem vzduchu ze přední části motoru, dochází ke chladnutí prvních válců a ohřevu chladícího vzduchu prostupující dále do motoru. Jestliže je na čtvrtém válci teplota 120 °C, na prvním válci bývá o přibližně 20 °C méně a na šestém válci asi o 20 °C více. Tudíž na předním válci je teplota 100 °C a na zadní části má poté motor teplotu 140 °C.

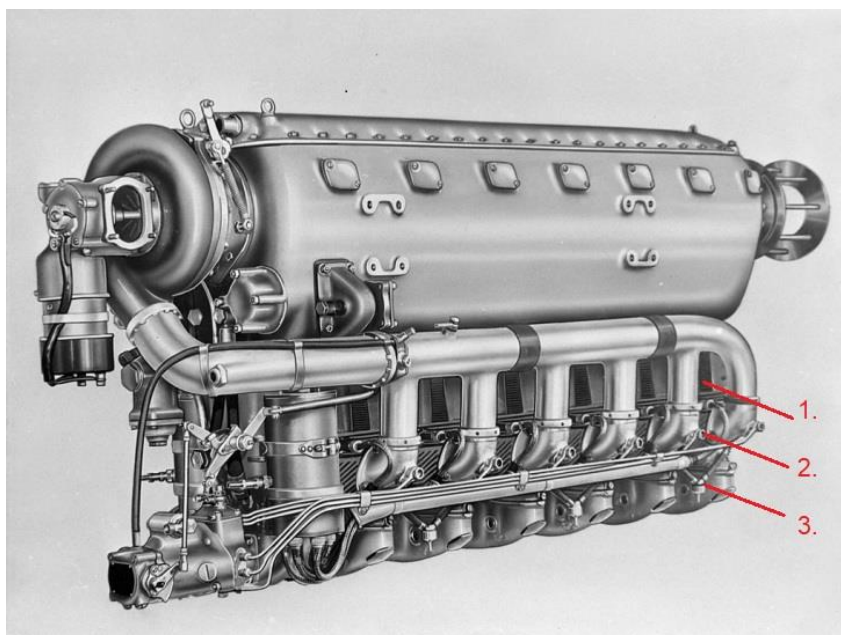
Tento teplotní rozdíl v kombinaci s vibracemi a vysokými gyroskopickými silami působící od vrtule způsobuje trhliny na vnitřní straně klikové skříně v místech pod kotvícími svorníky na stažení válců, hlav a vačky k bloku motoru. Tyto zmíněné trhliny jsou výrazně patrné na obrázcích níže. (obr. č. 6, obr. č. 7)

V počátečních fázích trhliny se motor chová standardně a nevykazuje známky závady. Trhlina má tendenci se šířit horizontálním směrem do obou stran, až se úplná plocha žebra odtrhne. Od této chvíle postupuje vertikálním směrem podél kotvícího svorníku a vyúsťuje stranou klikové skříně. Jakmile se prasklina dostane do této fáze, tak je to na letounu velmi patrné (viz obr. č. 4), že jde o vážnou závadu. Projevuje se výrazným únikem oleje z klikové skříně, který může způsobit další problémy, které na sebe navazují. Únik oleje – pokles tlaku oleje – nedostatečné mazání hlavních ložisek – zvyšující se teploty vlivem tření – zadření motoru.



**Obrázek 4: Únik oleje z motorového prostoru letounu Z-226MS [48]**

Způsob, jak předejít tomu, aby prasklina zašla do těchto extrémních mezí je jediný, a to periodickou vizuální kontrolou ploch vnitřní strany klikové skříně. Ta ale obnáší odstavení letounu na delší dobu a také vysoké náklady na práci technika. Pro tuto kontrolu je nutné sejmutí aerodynamických krytů motoru, vačkové soustavy (3), hlavy (2) a válce (1) (viz. obr. č. 5) Teprve tehdy je dobrý přístup k plochám, kde praskliny vznikají a je možné je vizuálně zhodnotit.

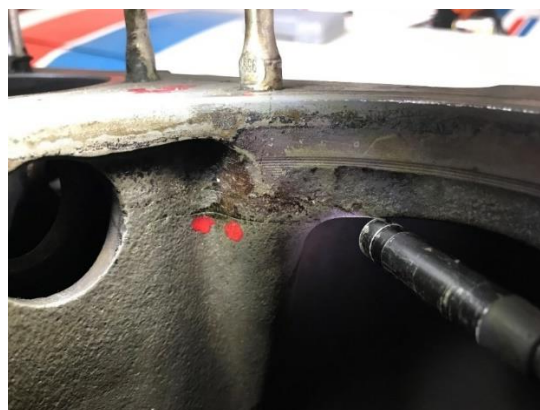


**Obrázek 5: Popis motoru M-337A [32]**

Jakmile je tato závada odhalena, letoun je okamžitě odstaven z provozu. V této době je ovšem náhradních komponentů velmi omezený počet a jsou také spojeny s vysokou cenou, což odrazuje majitele letounů od dalšího provozování. Výsledkem je poté přibývající počet neletuschopných letounů.



**Obrázek 6: Prasklina v odlitku klikové skříně motoru M-137 [48]**



**Obrázek 7: Dvojitá prasklina v odlitku klikové skříně [48]**

### 3 ODLITKY A MATERIÁLY POUŽITÉ V LETECKÝCH MOTORECH

Letecký motor je velké sdružení kompromisů jejichž účelem je udržet letoun ve vzduchu. Musíme si uvědomit, že i ten nejjednodušší letecký motor je složen z nejméně šesti (6) nespočetných typů kovů. Všechny tyto kovy mají různé fyzikální a tepelné vlastnosti, které musí být společně kompatibilní, aby zaručily bezpečnost letu. Problémy spočívají právě v tom, že motory potřebují mít přibližně stejnou teplotu ve všech místech spalovacího prostoru, ve válcích, na hlavách a na ventilech. Jakmile se nedodrží stejné teploty a zatíží se odlišnými hodnotami, různé materiály, vzniká první předpoklad pro to, aby motor za letu vykázal závadu. Závady na pohonných jednotkách letounů jsou nežádoucí. Zejména za letu mohou způsobit katastrofické následky. [5]

Během vývoje leteckých motorů a jejich částí je při výběru vhodnosti materiálu posuzována jeho pevnost, tvrdost, houževnatost, teplotní charakteristiky, vhodnost pro použití a další. Jeden faktor však mají všechny komponenty pohonné jednotky stejné, a to hmotnost. Hmotnost hraje v letectví klíčovou roli ve výkonnostní charakteristice letounu. Ovlivňuje jeho obratnost, dolet, užitečnou hmotnost nákladu či cestujících a jeho celkové oblasti užití. V letectví se proto konstruktéři snaží volit kompromis mezi nízkou hmotností a kritérii, které jsou pro daný komponent nezbytně nutné k zaručení jakosti a spolehlivosti. Vybírají se proto materiály, pokud možno co nejlehčí, ale zároveň s vysokou pevností. Za tímto účelem byly v průběhu vzrůstu leteckého průmyslu vyvíjeny nové druhy materiálů, které jsou právě pro letecké pohonné jednotky v současné době nezbytné, jako jsou hliníkové a hořčíkové slitiny.

#### 3.1 HLINÍKOVÉ SLITINY

Hliník je stříbrolesklý kov široce využívaný v letectví. Jedná se o vysoce tvárný materiál, který je dobře tvářitelný za tepla i za studena. Další výbornou vlastností je nízká hustota a malá teplotní roztažnost. Vzhledem k jeho výhodné kombinaci fyzikálních, mechanických, chemických a technologických vlastností je možné aplikovat hliníkové materiály téměř ve všech oblastech lidské činnosti. Největší procento použitých hliníkových materiálů je právě v leteckém a automobilovém průmyslu. I přes snahu nahrazovat hliník lehčími materiály na bázi hořčíku, uhlíku a kompozity, má stále výsadní postavení, pokud se jedná o silně namáhané komponenty, jako jsou křídla, trup letadla a pohonné jednotky. Je to především kvůli nízkým výrobním a údržbovým nákladům.

Hliník se vyznačuje nízkou měrnou hustotou při poměrně příznivé pevnosti a dále dobrou odolností vůči korozi, zejména v atmosférických podmínkách. Tato korozní vlastnost má ale svá omezení, která při překročení hliník degraduje. Nejvyšší odolnost vůči korozi má čistý hliník. Příměsi Na, Ce, Co, Pt, Ag, Th a další jeho korozní odolnost snižují. [6]

## 3.2 HOŘČÍKOVÉ SLITINY

Přes to že má hliník výborné parametry k uplatnění v letectví, existují materiály, které jsou vhodnější či vykazují příznivější vlastnosti k využití v daných místech pohonné jednotky. Mezi takové materiály spadají slitiny hořčíku. Samotný hořčík nedisponuje vlastnostmi, které by se daly uplatňovat v leteckém průmyslu, a proto byly vyvinuty slitiny s přísadami hliníku, manganu, zinku, popřípadě lithia, které jeho vlastnosti výrazně optimalizují. Jako je například slitina AZ-91. Specifickým slévárenským problémem hořčíku je jeho vysoká hořlavost v roztaveném stavu. Taveniny se proto musí chránit ochrannou atmosférou nebo struskou. Plynové atmosféry se většinou využívají ve směsi vzduch, oxid uhličitý a hexafluorid síry. Tento fakt vede k výraznému prodražení výroby a zpracování odlitků. [7]

### 3.2.1 SLITINA AZ-91

Vyznačuje se vysokou pevností, houževnatostí, zabíhavostí při lití i korozní odolností v atmosférických podmínkách. Také disponuje příznivou vlastností poměrně dobrého tlumení vibrací, které jsou u motorů žádoucí. Obsahuje obvykle 3–9 % Al, 0,2 – 1,5 % Zn a 0,15 – 0,5 % Mn. V litém stavu je mikrostruktura značně heterogenní, vedle základního tuhého roztoku přísad v hořčíku obsahuje intermetalické fáze na bázi  $Mg_{17}Al_{12}$  s proměnným obsahem hliníku, příp. zinku. Uvedené fáze se vyskytují ve dvou základních morfologiích: jako hrubší kompaktní částice – součást eutektika a jako jemný precipitát v destičkovité příp. jehličkovité formě, vznikající zřejmě při pomalejším ochlazování pod teplotou 400 °C. [8]

Díky výborným vlastnostem se tato slitina stala vhodným základem pro veškeré odlitky používané v leteckých pohonných jednotkách.

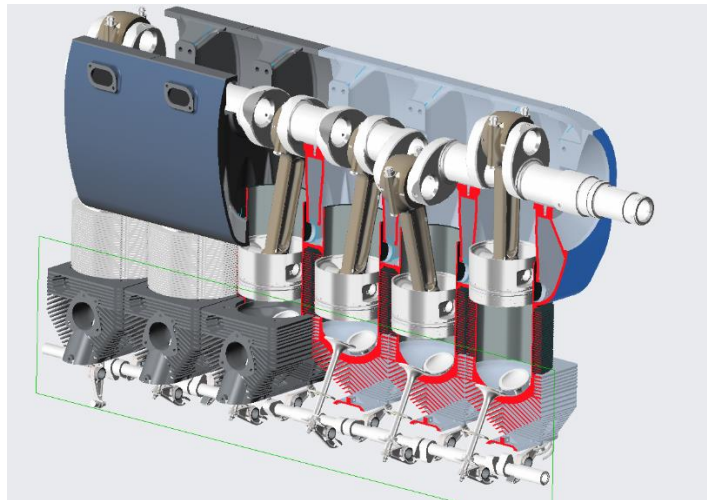
## 3.3 OSTATNÍ MATERIÁLY

Lehké slitiny na bázi hořčíku a hliníku se ale bohužel nedají využít na všech částech leteckých motorů jako jsou klikový mechanismus, vačkový mechanismus, válce, ventily či ozubená kola v rozvodové skříni.

Na tyto části působí vysoké namáhání a vysoké teploty a nelze se zde spoléhat na slitiny. Je tedy za potřebí využít odolnější materiály jako je např. ocel. [9]



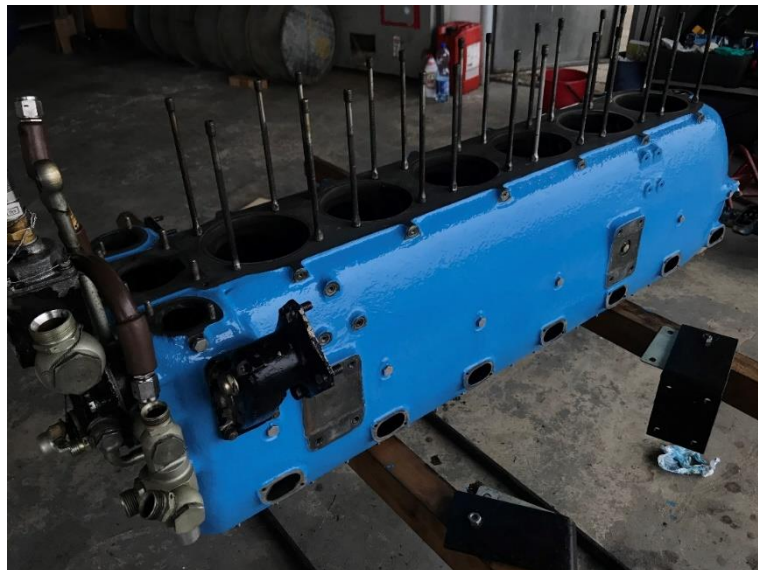
### 3.4 PŘÍKLADY POUŽITÍ MATERIÁLŮ NA LETECKÉM MOTORU ŘADY M



Obrázek 8: Podrobný přehled motoru M-137, snímek z 3D modelu [48]

#### 3.4.1 KLIKOVÁ SKŘÍŇ

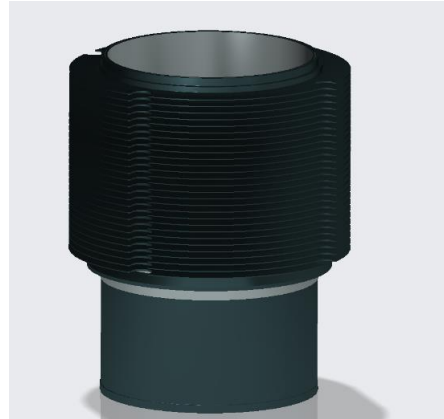
Odlita do pískové formy z hořčíkové slitiny AZ-91.



Obrázek 9: Odlitek klikové skříně motoru M-137 [48]

### 3.4.2 VÁLCE

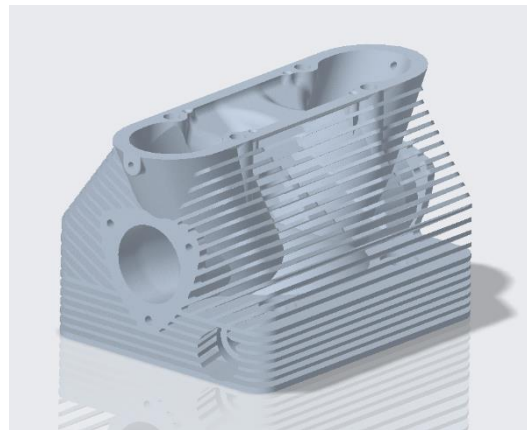
- Nitridační ocel se soustruženým žebrováním



**Obrázek 10: Válec motoru M-137, snímek z 3D modelu [48]**

### 3.4.3 HLAVY

- Hliníková slitina



**Obrázek 11: Hlava motoru M-137, snímek z modelu [48]**

### 3.4.4 OJNICE

- Kovaná hliníková slitina s leštěným povrchem
- Svorné ocelové šrouby
- Ocelové ojnicí pánve vylité olovnatým bronzem



**Obrázek 12: Ojnice motoru M-137, snímek z 3D modelu [48]**

### 3.4.5 KLIKOVÁ A VAČKOVÁ HŘÍDEL

- Speciální nitridační ocel



Obrázek 13: Kliková a vačková hřídel motoru M-137, snímek z 3D modelu [48]

### 3.4.6 VENTILY

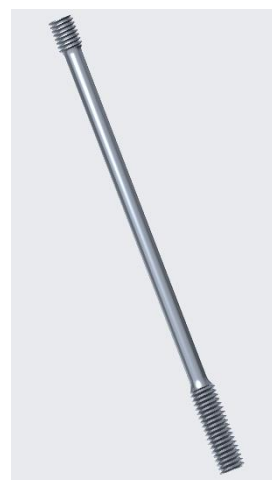
- Speciální žárupevná ocel



Obrázek 14: Ventily motoru M-137, snímek z 3D modelu [48]

### 3.4.7 KOTVÍCÍ SVORNÍKY

- Ocel



Obrázek 15: Svorník motoru M-137, snímek z 3D modelu [48]

## 4 MOŽNOSTI OPRAV LETECKÝCH MOTORŮ A PROCES HOMOLOGACE

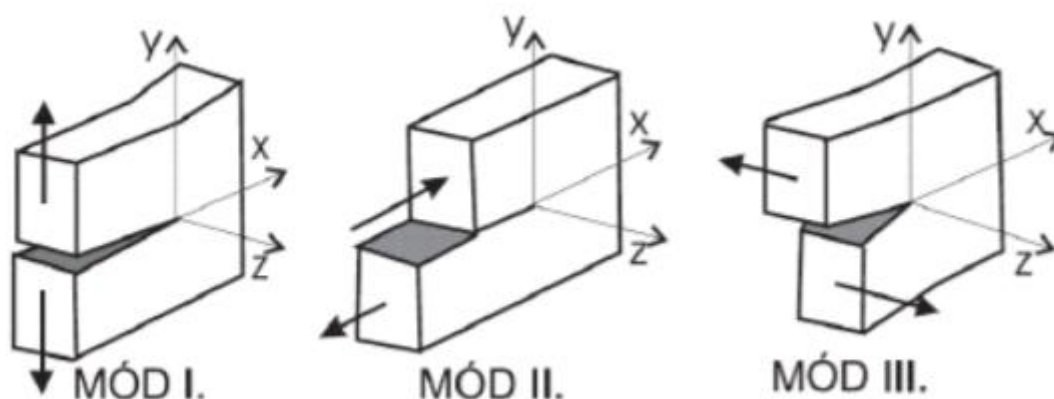
### 4.1 MOŽNOSTI OPRAV PRASKLIN ODLITKŮ LETECKÝCH MOTORŮ

#### 4.1.1 TRHLINA V MATERIÁLU

Ať už se jedná o trhlinu v klikové skříni motoru, nebo trhlinu v plexiskle či dalších materiálech, vždy se jedná o frakci, při které dochází k dělení materiálu na dva a více částí vlivem napětí. Trhlinu se v různých typech materiálu chová jiným způsobem. U tvárných materiálů trhlinu pomalu propaguje skrze materiál a je doprovázena plastickou deformací, pokud nedodáváme více napětí, trhlinu neroste. U křehkých materiálů se trhlinu šíří poměrně rychle bez doprovázené plastické deformace. Jakmile se v křehkém materiálu objeví prasklina, pokračuje nadále v růstu, než vyústí na konci materiálu. [10]

Protože se jedná o letecký motor, kde dochází k dynamickému zatížení, uvažovaný mechanismus růstu trhliny se projeví v každém cyklu. Přírůstek délky je ale velmi malý, řádově  $10^{-7}$  až  $10^{-3}$  milimetru. Pokud je počet zatěžovaných cyklů roven řádově  $10^4$  až  $10^8$  může trhlinu dorůst délky až několika milimetrů. Opakované otupování a zaostřování čela trhliny vlivem cyklů způsobuje tento nárůst. [11]

Existují 3 typy růstu prasklin. (obr. č. 16)



Obrázek 16: Přehled typů růstu prasklin [12]

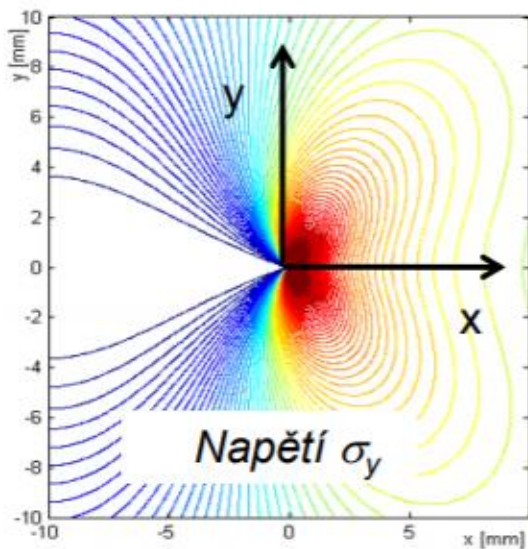
MOD I – Tahový, MOD II – Smykový, MOD III – Střih

MOD I se vyskytuje v praxi nejčastěji. V tomto případě lze oblast čela trhliny popsat vztahem:

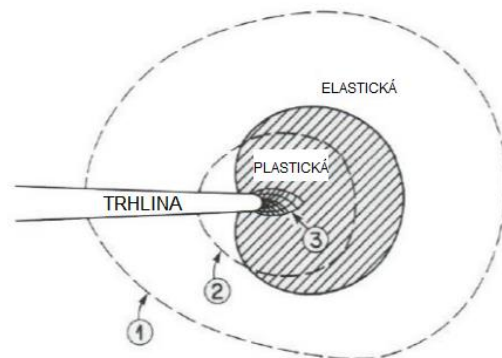
$$\sigma_{yy} = \sigma_0 = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}}$$

[12]

Hodnota součinitele intenzity K zde definuje podmínky napjatosti na špičce trhliny. Pokud známe hodnotu K, lze určit jednotlivé složky napětí. Z teorie elasticity vyplývá, že jakmile se poloměr zakřivení čela trhliny blíží k nule, je napětí v kořeni nekonečně velké, což v reálném světě nelze uskutečnit. U čela trhliny tedy vzniká plastická zóna, kde je napětí největší a kolem ní je oblast elastická. [12]



**Obrázek 17: Pole napětí v blízkosti trhlín [33]**



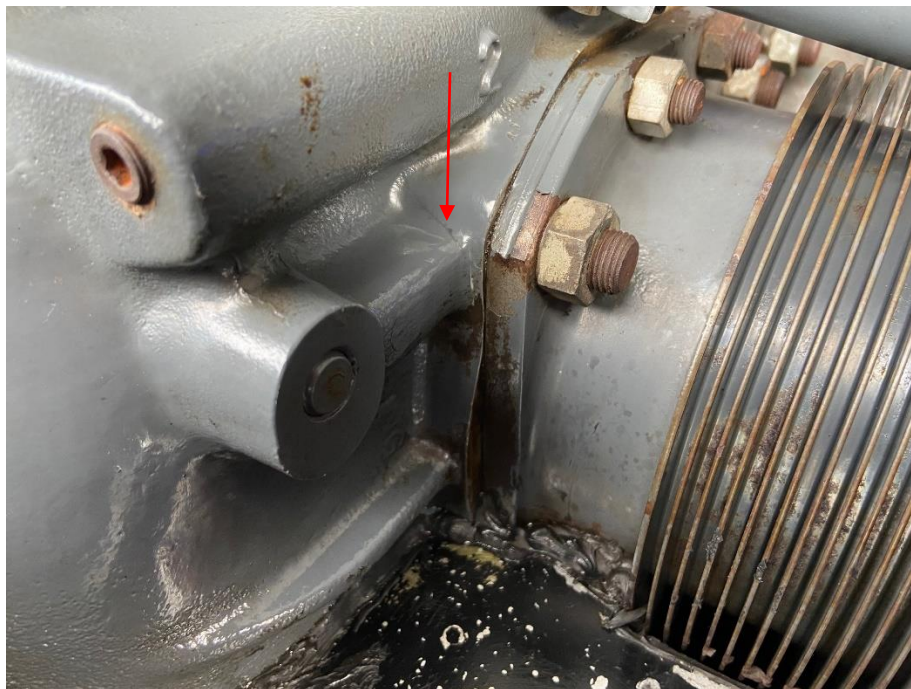
**Obrázek 18: Pole plastické a elastické zóny v blízkosti trhlín [10]**

Praskliny leteckých motorů se vyskytují převážně na klikové skříni motoru v místech mezi hlavními ložisky uložení klikové skříně a kotvícími svorníky válců motoru. Zde vyúsťuje zatížení od tlaku plynů ve válcích, které působí stejnou silou opačného smyslu na hlavu a klikový hřídel. Toto zatížení spojené s chvěním a náhlými rozdíly teplot způsobuje praskání klikové skříně v oblastech kotvících svorníků.

Toto praskání kolem kotvících bodů válců je pozorováno na pohonných jednotkách českého výrobce LOM Praha, na motorech řady M a také u motorů amerických výrobců Lycoming a Continental.

V České republice v této době neexistují žádné letecké opravy, či servisní organizace, které by tyto praskliny opravovaly. Ve Spojených státech jsou však firmy, které se zabývají pouze touto problematikou. Jedná se o společnosti „Crankcase Services Inc.“ a „DivCo“.

Zabývají se opravami praskajících klikových skříní motorů výrobců Continental a Lycoming, které jsou nejrozšířenějšími leteckými pístovými motory na světě. DivCo a Crankcase services Inc. řeší praskající skříňe metodou svařování.



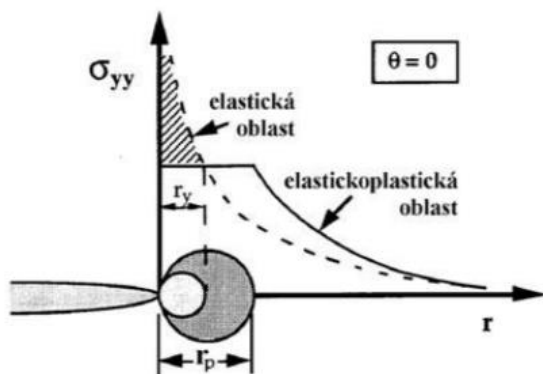
**Obrázek 19: Prasklina klikové skříně motoru typu Lycoming [34]**



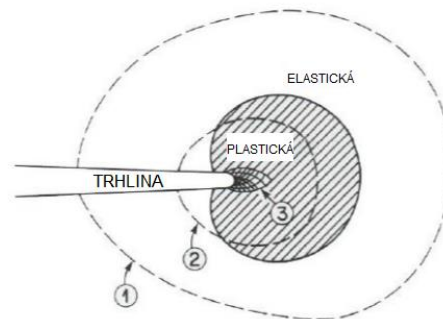
#### 4.1.2 STOP DRILLING

Z počátku, kdy se praskliny začaly objevovat na motorech Lycoming a Continental, jejich výrobci na to reagovali vystavením servisního bulletinu pro provozovatele těchto motorů. V tomto bulletinu byla popsána stručná a jednoduchá oprava prasklin metodou „Stop Drilling“. Tato metoda je široce známá a využívána na opravu plechových potahů či překrytů kabin z plexiskla. [13]

Jedná se o odvrtání plastické oblasti na konci trhliny, kde je nahromaděno největší napětí (viz. obr. č. 18, 20) Zvětšením rádiusu z nulové hodnoty (konce trhliny) na rádius odpovídající vyvrtanému otvoru způsobí vybití napětí do otvoru a zamezení šíření trhliny.



**Obrázek 20: Oblasti plastické a elastické v blízkosti trhliny [12]**



**Obrázek 18: Pole plastické a elastické zóny v blízkosti trhlín [10]**

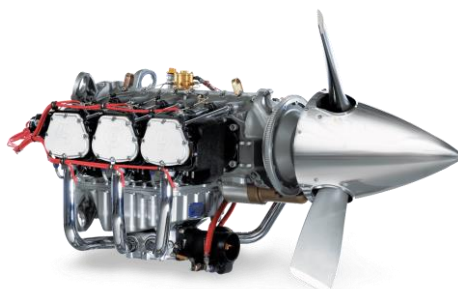
### 4.1.3 SVAŘOVÁNÍ

Svařováním vznikají za působení tepla, tlaku a za použití přídavného materiálu obdobného složení, jako má základní materiál, nerozebíratelná spojení strojních částí i celých konstrukcí. Jedná se o spojení dvou částí i celých konstrukcí ze součástí jednoduchých tvarů, které jsou většinou z tvářených hutních polotovarů, výkovek nebo odlitků. [14] Obecným požadavkem na proces svařování je vytvoření takových termodynamických podmínek, při kterých je umožněn vznik nových meziatomárních vazeb. Jelikož je velice obtížné vytvořit spojení na úrovni meziatomových vazeb za okolních podmínek, kdy je termodynamický stav materiálu stabilní, je nutno tento stav změnit. Toho lze dosáhnout buďto vnesením velkého množství tepla, působením tlaku, nebo kombinací obou faktorů. Svařovat lze kovové i nekovové materiály, materiály podobných i rozdílných vlastností. Pro různé typy spojů a materiálů jsou vhodné jiné způsoby svařování. [15]

#### Svařování hliníku a jeho slitin

Svařitelnost hliníku a jeho slitin je obecně brána za dobrou, musí se však během procesu dbát na využití ochranných atmosfér k zabránění vzniku pórů vlivem působení vodíku. Zdrojem vodíku ve spojovaných materiálech je vrstva oxidu hlinitého na povrchu, který je vysoce hydrofobický a vzniká v důsledku velké afinity hliníku ke kyslíku. Nežádoucí účinky vodíku nastávají během krystalizace svarového kovu. Protože hliník rychle chladne, veškerý vodík se nestačí včas vydifundovat a začíná se vylučovat až pod teplotou solidu. Jakmile je hliníkový svar v plastickém stavu, dochází k vylučování vodíku a vzniku nežádoucím pórům a bublin. Oprava prasklin svařováním je v této chvíli jedinou metodou, která je používána a uznávána americkým leteckým úřadem FAA na odlitcích motorů. V Evropské Unii tato metoda není certifikována, tudíž zde nelze pomocí svařování opravovat letecké motory.

Firmy DivCo a Crankcase services Inc. tuto metodu využívají k opravě praskajících klikových skříní motorů Lycoming a Continental. Jedná se o motory ležatého uspořádání tzv. boxery (viz. obr. č. 21), které jako české motory řady M praskají u kotvicích svorníků a v dalších méně významných místech.



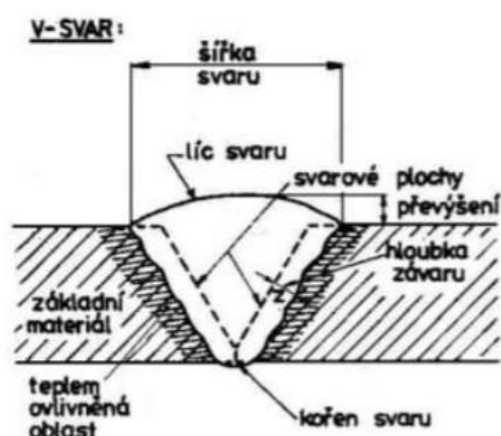
Obrázek 21: Motor Lycoming thunderbolt [35]



Svařovací metoda je na těchto typech klikových skříních adekvátním způsobem opravy, protože je v místech defektu dobrý přístup k prasklině a tloušťky stěn jsou konstantní.

Před každým kvalitním svarem je nutná důkladná příprava svařovaného dílu. Nejprve je nutno samotnou prasklinu a místa v bezprostřední blízkosti praskliny důkladně očistit od nečistot, mastnot, cizích předmětů a barev. Následně je za potřeby prasklinu na jejím počátku a jejím konci přerušit pomocí metody Stop drilling.

Kdyby byl proces svařování zahájen bez odvrtní počátku a konce praskliny, vlivem vneseného tepla do materiálu by se začala prasklina otevírat a pokračovala by dále ve svém růstu. Poté je potřeba vytvořit prostor pro svar vybroušením „V“ drážky po celé délce praskliny (viz. obr. č. 22).

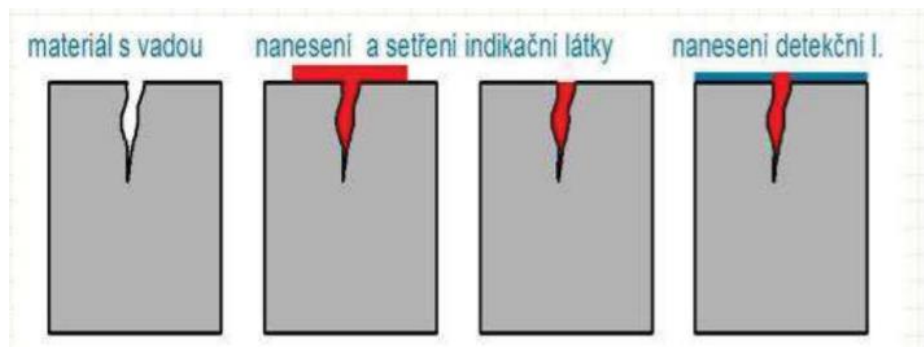


Obrázek 22: Průřez svarem typu „V“ [36]

Velký důraz je brán na kompletní odstranění praskliny v kořeni svaru, kde broušením musíme dosáhnout mezery mezi svařovanými plochami. Pokud by se ponechala v kořeni svaru původní prasklina, nedošlo by ke kvalitnímu průvaru materiálu. Svar by se sice podařilo uskutečnit, ale následně by se v těchto místech tvořila nová prasklina podél vytvořeného svaru a bylo by za potřeby v budoucnu operaci opakovat. Jelikož se během svařování uvolňuje místně velké množství tepla, je žádoucí svařovaný kus předehřát na takovou teplotu po takovou dobu, aby se snížil vliv vneseného tepla do okolního materiálu a zamezilo se tím kroucení díky tepelné roztažnosti. Důraz je brán také po finalizaci svaru, kdy materiál chladne. Toto je prováděno v peci, kde materiál pomalu a rovnoměrně chladne. [16]

Jakmile je svar dokončen a skříň vychladnuta je za potřeby se ujistit, zda při procesu svařování nedošlo k nežádoucím vadám. Pro tuto kontrolu se využívá kapilární kontrola svaru. Ta je prováděna pomocí kapilárního zkoušení (penetrační zkouška). Je to jedna z nejrozšířenějších metod zkoušení materiálu nedestruktivní zkouškou defektoskopie. Pomocí této zkoušky je možno odhalit nedostatky svaru typu trhlin, prasklin, pórů, vměstků, přeložek, zavalenin apod. Kapilární kontrola využívá kapilárních vlastností, kee nízké povrchové napětí tekutiny proniká

do nespojitostí materiálu. Tato fluorescenční tekutina po nanesení na zkoušený suchý a očištěný povrch pronikne i do vad, které nejsou okem viditelné. Po odstranění přebytku penetrantu se na povrch nanese vývojka poskytující kontrastní pozadí pro barevnou nebo fluorescenční indikaci penetrantu vztlínajícího z vad sváru (viz. obr. č. 23). [17] Detekční kapalina se používá taková, která má malé povrchové napětí např. petrolej nebo terpentýn, a tedy dobře smáčí povrch. [18]



**Obrázek 23: Postup provedení kapilární zkoušky [37]**



**Obrázek 24: Kapilární zkouška provedená na klikové skříni motoru Lycoming [38]**

## 4.2 DALŠÍ ZPŮSOBY OPRAV PRASKLIN KLIKOVÝCH SKŘÍNÍ

Jak již bylo zmíněno výše, svařovací metoda opravy praskajících klikových skříní je v této době jedinou možnou certifikovanou metodou uznávanou americkým leteckým úřadem. Evropský letecký úřad v této době neschvaluje ani tuto metodu. Praskliny tohoto charakteru se ale nevyskytují jen na leteckých motorech, ale také hojně v automobilovém průmyslu, kde není potřeba certifikace procesu opravy. U motorů vozidel a pozemní techniky, kde je konstrukční uspořádání závěsů válců a hlav stejné, jako u leteckých motorů, dochází k identickým závadám tohoto charakteru.

Jelikož nejsou potřebné certifikace pro opravy prasklin klikových skříní pozemních vozů, existuje také více metod pro opravy.

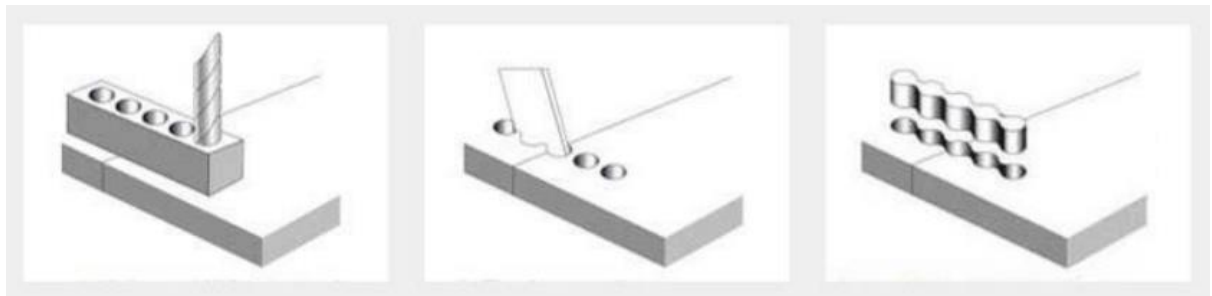
Nejčastěji používanou opravou je již zmíněné svařování. Dále tedy:

- Lock and stitch
- Aditivní přísady
- Tmelení

#### 4.2.1 LOCK AND STITCH

- **Metal Lock**

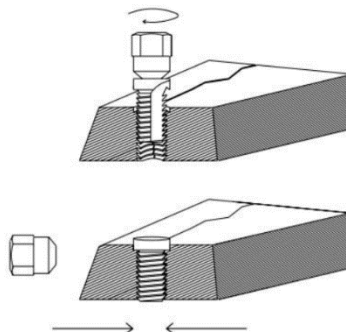
Proces patentovaný v roce 1937 ve Spojených státech, kdy se praskliny a další závady opravují pomocí vyvrtání sérií otvorů s určitým tvarem, které jsou následně vyplněny krimpovacími vložkami, které praskliny a vady stahují k sobě.



Obrázek 25: Proces Metal lock [19]

- **Metal Stitch**

V 80. letech se na trhu objevila nová metoda založená na stejném principu s názvem Metal Stitch. Jedná se o proces, který používá ke stažení prasklin speciálně vyrobených vrutů neboli pinů. Tyto piny mají charakteristický závit s trhací hlavou. Při aplikaci závit stahuje materiál k sobě a jakmile dojde k dotažení pinu, trhací hlava se utrhne a tím je prasklina uzamčena v poloze. Tento proces se provádí po celé délce praskliny s tím, že se jednotlivé piny odvrstávají s přesahem do sebe.



Obrázek 26: Proces metal stitch [19]

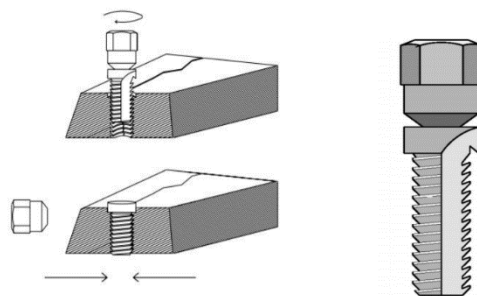
- **LOCK AND STITCH**

Společnost Lock and Stitch se ve Spojených státech zabývá opravou klikových skříní automobilů a těžké stavební techniky za studena, pomocí kombinace těchto dvou metod.

Jedná se nejprve o odvrtání praskliny po celé délce s následnou aplikací vrutů či pinů s trhacími hlavami. Tyto piny přes sebe přesahují obdobně jako v procesu Metal Stitching. Pro tetu část procesu se používají buďto piny typu C, nebo piny typu L přesně vyrobené na CNC strojích z materiálů, které odpovídají materiálu klikové skříně pro zajištění kompatibility a minimalizaci pnutí vlivem teplotní roztažnosti.

- **Pin typu C**

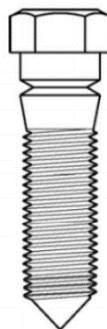
Piny typu C se využívají na takových místech, kde je za potřebí prasklinu stahovat k sobě. Za tímto účelem je na pinu použit speciální závit, zajišťující stahování materiálů k sobě. Pin je vybaven trhací hlavou, která se během utahování vždy oddělí při stejném utahovacím momentu.



**Obrázek 27: Pin typu C [19]**

- **Pin typu L**

Piny typu L se využívají v takových místech oprav, kde je za potřebí materiály od sebe v místě praskliny oddělovat. Během utahování pin vyvolává opačný efekt pinu C a materiály od sebe odpuzuje, tudíž prasklinu „otevívá“. Tento pin je také vybaven trhací hlavou, která zajišťuje oddělení hlavy od pinu vždy ve stejný utahovací moment.



**Obrázek 28: Pin typu L [19]**

- **Zámky**

Jakmile je prasklina po celé délce vymezena piny, následuje aplikace zámků. Zámky se používají k získání tuhosti a stability praskliny a zamezení možnosti pohybu materiálů v opravovaném místě. Drážky odpovídající tvaru zámků jsou vyfrézovány do klikové skříně pod úhlem 90° přes opravovanou prasklinu. Hloubka drážky pro zámek odpovídá 80% tloušťky stěny klikové skříně. [19]

Finální podoba celkové opravy má tvar připomínající stehy (viz. obr. č. 29)



**Obrázek 29: Aplikace metody Lock and stitch [39]**

Výhodou této metody je její aplikace za studena. Nedochozí zde k tepelnému ovlivnění klikové skříně, tudíž délkové rozměry nejsou napadeny a není za potřebí provádět opětovné usazování klikového mechanismu, jako u procesu svařování.

Jedná se o osvědčenou metodu, se kterou společnost Lock n Stitch pracuje již desítky let. Své produkty, zákaznickou podporu a opravné sady mají k dispozici celosvětově a jsou využívány jak na automobilech a pozemní technice, tak i na velkých, těžkých motorech lodního průmyslu.

## 4.2.2 ADITIVNÍ PŘÍSADY

Jedná se o méně populární opravu praskající klikové skříně a hlav motorů v automobilním a zemědělském průmyslu, kde se využívá tekutých přísad do chladicí kapaliny a oleje motoru.

Zacelení praskliny se provádí pomocí přísady do olejové či chladicí náplně motoru. Tato přísada obsahuje malé částice, které se vlivem zvýšené teploty v okolí praskliny rozpínají a prasklinu postupně zacelí.

Výhodou této metody je její jednoduchá aplikace, která spočívá jen v přimíchání náplně obalu (obr. č. 30) buďto do chladicího oběhu, nebo do mazacího oběhu motoru. Další výhodou je cenová dostupnost.

Nevýhodou této opravy je její nízká životnost a fakt, že samotnou prasklinu tekutina nijak neovlivní, ani nezpomalí v jejím růstu. Také může dojít k ucpávání hlavního oběhu chladicí a mazací soustavy vlivem usazenin částic z aditiva na místech, kde jim není určeno. [20]



Obrázek 30: Produkt FiberLock [20]

## 4.2.3 TMELENÍ (COLD WELDING)

Tmelení je běžně používaná metoda pro opravy automobilních, lodních a industriálních motorů a dílů. Nejedná se o běžné tmely na karosářské účely, ale právě o speciální tmely vyvinuté k tomuto účelu. Tmelů pro tyto opravy je celá řada, lišící se primárně dle základního materiálu opravovaného dílu a také fyzikálními a chemickými vlastnostmi, které musí tmel splňovat pro bezproblémovou kompatibilitu se základním materiálem. Cílem výroby těchto tmelů je dosáhnout materiálu, který po vytvrzení vykazuje identické vlastnosti jako opravovaný materiál. Z toho důvodu se výrobci snaží eliminovat přidávání nesourodých přísad a využívají

jen takové, které jsou pro proces přípravy a vytvrzení tmelu nezbytně nutné. Díky tomu tmely obsahují až 98 % kovu a 2 % tvoří pojiva a přísady. Jsou dodávány převážně v balení obsahující dvě nádoby, v jedné je kovový prášek a v druhé tvrdidlo. Způsob přípravy tmelu před použitím nevyžaduje žádné stroje či speciální nástroje, jedná se pouze o namíchání přesného množství kovového prášku a tvrdidla a s jeho následným sjednocením pomocí promíchání. Tyto tmely jsou na trhu dostupné již několik let, ale v průběhu času se pomocí nově vyvinutých technologií stále zdokonalují a díky tomu dokážeme dosáhnout takových výsledků opravy, které by bylo za použití standardně používaných metod nemyslitelné. Hlavní výhodou těchto tmelů je jeho aplikace za studena, kdy se do opravovaného dílu nevnáší vnější teplo a nedochází zde k rozměrovým anomáliím, deformaci a vnitřnímu prnutí vlivem teplotní roztažnosti. To znamená že po vytvrzení tmelu není dále nutno opracovávat díl v jeho přesně obráběných místech, jako je například po procesu svařování u kluzných ložisek uložení klikového hřídele či dosedací plochy hlavy motoru. Z pohledu přípravy a procesu opravy je tmelení oproti svařovací metodě poměrně jednoduché, není zde za potřebí používat speciální přípravky a stroje k provedení vlastní opravy. [21] [22]

Hlavními výrobci těchto tmelů je DIAMANT metallplastic GmbH a Belzona. Tyto výrobci se pohybují na trhu více než 50 let a jsou světovou špičkou pro dodávání těchto opravárenských materiálů. Kromě oprav vad motorů jsou široce využívány ve všech odvětvích průmyslu. Ve slévárnictví se tyto tmely využívají na složitých odlitcích, kde je možný výskyt zmetkových odlitků vlivem nedotečení, zborcení stěn formy atd. Proto aby se tyto zmetkové odlitky, které jsou finančně nákladné na výrobu nemusely vyřazovat, jsou vady opravovány pomocí tmelů, kdy se nahradí chybějící se materiál tmelem, který je materiálově a vlastnostmi identický materiálu odlitku. (obr. č. 31)



**Obrázek 31: Postup opravy zmetkového odlitku [21]**

V lodním průmyslu je používán tento tmel například na lodních šroubech, které jsou poškozovány vlivem kavitace. (1) Kavítace je jev odpařování nebo varu vody z důvodu radiálního snížení tlaku na zadní části listu lodního šroubu. Mnoho lodních šroubů částečně tvoří dutiny za normálních podmínek, avšak nadměrná tvorba dutin může být důsledkem



fyzického poškození povrchu listu lodního šroubu z důvodu imploze mikroskopických bublinek na listu. (viz. obr. č. 32.) [23]

Tento jev tedy porušuje materiál lodního šroubu a náklady na výrobu či koupi nového šroubu jsou v porovnání s opravou značně rozdílné. Volí se proto metoda opravy, kdy se jako u předchozího případu ve slévárnictví vyplňuje poškozená oblast tmelem.



**Obrázek 32: Oprava poškozeného lodního šroubu vlivem kavitace**

V industriálním průmyslu jsou tyto tmely v používání několik let a jsou schvalovány výrobci těžkých strojů jako je Caterpillar nejen k opravám poškození motorů, ale i k netěsnostem nádrží, praskajícím rámcům vozidel atd. Oblasti užití tmelů v automobilním průmyslu je obdobná jako v industriálním. Převážně své uplatnění nachází v oblasti praskajících hlav a klikových skříní motorů. Velké množství uživatelů tvoří restaurátoři historických automobilů a motocyklů, kde není možné vadné díly vyměnit z důvodu nedostatku náhradních dílů.

### **4.3 PROCES HOMOLOGACE – SCHVALOVÁNÍ OPRAV V LETECTVÍ**

#### **4.3.1 PŘEDPISY OPRAVY**

Jak je obecně známo, veškeré aktivity v letectví se řídí přísnými pravidly, které je nutno dodržovat, aby byla zachována bezpečnost posádky, cestujících, ale i lidí na zemi. Letouny a letecký personál obsluhující tyto stroje jsou podrobeny paragrafům, směrnicím, pravidlům a nařízením pro zachování nejvyššího stupně bezpečnosti a minimalizaci nehod. Tyto pravidla a nařízení vydává Evropská agentura pro bezpečnost letectví – EASA. Dne 15. července 2002 bylo nařízením Evropského parlamentu č. 1592/2002 založena organizace EASA (European Union Aviation Safety Agency) pro sjednocení pravidel civilního letectví a leteckých zařízení. EASA pokrývá veškeré oblasti letectví, zpracovává společné standardy pro její členy, dohlíží na jejich jednotnou aplikaci v EU a prosazuje je na celosvětové úrovni. Dále vydává požadavky, které jsou publikovány ve formě Nařízení, které obsahují pravidla vycházející z předpisů JAR, způsoby jejich plnění, poradní materiály a certifikační specifikace.



Předpisy pro opravy spadají pod pravidla stanovená v **Nařízení Komise (EU) č. 748/2012** ze dne 3. srpna 2012, vycházející z Nařízení (ES) č. 1702/2003 kterým se stanovují prováděcí pravidla pro certifikaci letové způsobilosti letadel a souvisejících výrobků, letadlových částí, zařízení a certifikaci ochrany životního prostředí, jakož i pro certifikaci projekčních a výrobních organizací. [24] Toto nařízení má tři přílohy, které obsahují prováděcí pravidla jako společné technické požadavky a administrativní postupy.

Příloha I – ČÁST 21 – Certifikace letadel a souvisejících výrobků, letadlových částí a zařízení a projekčních a výrobních organizací.

Příloha II – Zrušené nařízení a změny v nařízeních

Příloha III – Srovnávací tabulky

V následující kapitole se seznámíme se stručným obsahem první přílohy, ČÁST 21, ODDÍL A, jakož s předpisy souvisejícími s procesem schvalování oprav a blíže se zaměříme na HLAVU M, která se týká vlastních oprav a certifikaci oprav v letectví. Zbýlý ODDÍL B se věnuje postupům pro příslušné úřady a dvě následující přílohy obsahují změny v nařízeních, které se v průběhu let odehrály a jejich porovnání s aktuálně platným nařízením. [24]

#### **4.3.2 ODDÍL A – TECHNICKÉ POŽADAVKY**

##### **HLAVA A – OBECNÉ USTANOVENÍ**

Tento oddíl se zabývá a stanovuje obecná ustanovení určující práva a povinnosti držitele a žadatele o osvědčení, které bylo nebo má být vydáno v souladu s tímto oddílem.

##### **HLAVA B – TYPOVÁ OSVĚDČENÍ A TYPOVÁ OSVĚDČENÍ PRO ZVLÁŠTNÍ ÚČELY**

Tato hlava obsahuje postup pro vydávání typových osvědčení výrobků a typových osvědčení letadel pro zvláštní účely a stanovuje práva a povinnosti žadatelů a držitelů těchto osvědčení.

##### **HLAVA D – ZMĚNY TYPOVÝCH OSVĚDČENÍ A TYPOVÝCH OSVĚDČENÍ PRO ZVLÁŠTNÍ ÚČELY.**

Tato hlava se zabývá postupům pro schvalování změn typových návrhů a typových osvědčení a stanovuje práva a povinnosti žadatelů a držitelů těchto schválení. Definují se zde rovněž standardní změny, které nepodléhají procesu schvalování podle této hlavy. Odkazy na typové osvědčení v této hlavě zahrnují jak typová osvědčení, tak typová osvědčení pro zvláštní účely.

##### **HLAVA E – DOPLŇKOVÁ TYPOVÁ OSVĚDČENÍ**

Tato hlava stanovuje postup pro schvalování významných změn typových návrhů podle postupů pro doplňková typová osvědčení a stanovuje práva a povinnosti žadatelů a držitelů těchto osvědčení.

## **HLAVA F – VÝROBA BEZ OPRÁVNĚNÍ ORGANIZACE K VÝROBĚ**

- a) Tato hlava stanovuje postup prokazování shody výrobku, letadlové části a zařízení s použitelnými konstrukčními údaji, určených k výrobě bez oprávnění organizace k výrobě podle hlavy G.
- b) Tato hlava stanovuje pravidla určující povinnosti výrobce výrobku, letadlové části a zařízení, vyráběných podle této hlavy.

## **HLAVA G – OPRÁVNĚNÍ ORGANIZACE K VÝROBĚ**

Tato hlava stanovuje:

- a) postup vydávání oprávnění organizace k výrobě výrobní organizaci prokazující shodu výrobků, letadlových částí a zařízení s použitelnými konstrukčními údaji.
- b) pravidla určující práva a povinnosti držitelů a žadatelů o tato oprávnění.

## **HLAVA H – OSVĚDČENÍ LETOVÉ ZPŮSOBILOSTI A OSVĚDČENÍ LETOVÍ ZPŮSOBILOSTI PRO ZVLÁŠTNÍ ÚČELY**

Hlava H se zabývá postupem pro vydávání letové způsobilosti.

## **HLAVA I – OSVĚDČENÍ O HLUKOVÉ ZPŮSOBILOSTI**

Hlava I se zabývá postupem pro vydávání hlukové způsobilosti.

## **HLAVY J – OPRÁVNĚNÍ ORGANIZACE K PROJEKTOVÁNÍ**

Zde se stanovuje postup opravňování projekčních organizací a pravidla určující práva a povinnosti držitelů o tato oprávnění.

## **HLAVA K – LETADLOVÉ ČÁSTI A ZAŘÍZENÍ**

Tato část se věnuje postupům týkající se schvalování letadlových částí a zařízení.

## **HLAVA M – OPRAVY**

- a) Tato hlava stanovuje postup schvalování návrhů oprav a stanovuje práva a povinnosti držitelů a žadatelů o tato schválení.
- b) Tato hlava definuje standardní opravy, které nepodléhají procesu schvalování podle této hlavy.
- c) „Opravou“ se rozumí odstranění poškození nebo obnova stavu letové způsobilosti kteréhokoliv výrobku, letadlové části nebo zařízení následně po prvním uvolnění do provozu výrobcem.

d) Odstranění poškození výměnou letadlových částí nebo zařízení bez nutnosti projekční činnosti musí být považována za úkon údržby, a proto nevyžaduje schválení podle této přílohy I (části 21).

#### *DĚLENÍ OPRAV*

Opravy se podle závažnosti dělí na standardní a nestandardní. Mezi *standardní opravy* spadají opravy prováděné na zařízeních:

A) Letounů s maximální vzletovou hmotností (MTOW) rovnou 5 700 kg nebo menší.

B) Rotorových letadel s MTOW rovnou 3 175 kg nebo menší.

C) Kluzáků nebo motorových kluzáků, balonů a vzducholodí definovaných v ELA1 nebo ELA2

D) Jež se řídí konstrukčními údaji, které jsou součástí certifikačních specifikací vydaných agenturou, obsahujících přijatelné metody, techniky a postupy provádění a označování standardních oprav, včetně souvisejících instrukcí pro zachování letové způsobilosti.

E) Jež nejsou v rozporu s údaji držitelů typového osvědčení.

Ve zbylých případech zařízení se jedná o provádění *nestandardních oprav*.

#### *PROKAZOVÁNÍ ZPŮSOBILOSTI*

Schvalovat *významnou opravu* může fyzická nebo právnická osoba jenž je držitelem platného oprávnění organizace k projektování vydaného agenturou v souladu s hlavou J. Alternativně smí tuto opravu schvalovat agentura za požití postupů vymezujících konkrétní postupy projektování, zdroje a posloupnost činností nezbytných k vyhovění hlavě M. Nebo lze prokázání způsobilosti opravovaného dílu nechat schválit agenturou, předložením certifikačního programu, v jenž podrobně se podrobně uvádí způsoby průkazu vyhovění požadavkům pro doplňkové typové osvědčení u letadla, motoru a vrtule definovaných v nařízení v bodě 21 A14. písm. c)

#### *KLASIFIKACE OPRAV*

Oprava může být významná či nevýznamná. Klasifikace musí být provedena v souladu s následujícími požadavky:

Opravy jsou řazeny jako změny v typovém návrhu a jsou klasifikovány jako nevýznamné nebo významné. Nevýznamná změna je taková změna, která nemá podstatný vliv na hmotnost, polohu těžiště, pevnost konstrukce, spolehlivost, provozní charakteristiky, hluk, únik paliva a oleje, výfukové emise nebo jiné charakteristiky ovlivňující letovou způsobilost výrobku. Aniž

by byli dotčeny požadavky na změny vyžadující nové typové osvědčení, jsou všechny ostatní změny podle této hlavy zařazeny jako významné změny.

Opravy musí být tedy klasifikovány jako *významné* nebo *nevýznamné* podle odstavce výše a klasifikují se následovně:

**A)** Agenturou nebo

**B)** Odpovídajícím způsobem oprávněnou projekční organizací podle postupu dohodnutého s agenturou

#### *VÝROBA ČÁSTÍ PRO OPRAVY*

Veškeré letadlové části a zařízení, které mají být použity pro realizaci vlastní opravy musí být vyrobeny v souladu s výrobními údaji, založenými na nezbytných konstrukčních údajích, poskytnutých držitelem schválení návrhu opravy a to podle:

**A)** Hlavy F nebo

**B)** Organizací odpovídající způsobem oprávněnou v souladu s hlavou G nebo

**C)** Odpovídajícím způsobem oprávněnou organizací údržby.

#### *PROVEDENÍ OPRAVY*

Oprava musí být provedena s souladu s touto hlavou, nebo případně částí 145, nebo odpovídajícím způsobem oprávněnou výrobní organizací dle Hlavy G a to ve smyslu, že udržuje letoun, který vyrobil a vystavit mu v souvislosti s touto údržbou osvědčení o uvolnění do provozu – (formulář 53 EASA). Projekční organizace je povinna předat organizaci provádějící opravu všechny nezbytné instrukce pro zástavbu letadlové části a zařízení.

#### *OMEZENÍ*

Jestliže jsou v souvislosti s opravou spojena omezení provozu letadlové části nebo zařízení, je oprava podle těchto podmínek schvalována a tyto omezení a instrukce musí být obsaženy v návrhu opravy. Držitel schválení návrhu opravy je povinen tyto instrukce a omezení předat provozovateli v souladu s postupem dohodnutým s agenturou.

#### *INSTRUKCE PRO ZACHOVÁNÍ LETOVÉ ZPŮSOBILOSTI*

A) Držitel schválení návrhu opravy je povinen vybavit každého provozovatele letadla, na němž byla oprava provedena, nejméně jednou kompletní sadou těch změn instrukcí pro zachování letové způsobilosti, které vyplývají z návrhu opravy a obsahují popisné údaje a prováděcí pokyny zpracované v souladu s použitelnými požadavky. Opravený výrobek, letadlová část nebo zařízení smí být uvolněny do provozu před dokončením změn těchto instrukcí, ale je

povinnost tak učinit na omezenou dobu provozu a po dohodě s agenturou. Dále je povinen poskytnout na vyžádání tyto změny instrukcí každé další osobě, od níž se požaduje, aby vyhověla libovolným podmínkám těchto změn instrukcí. Dostupnost některé příručky nebo části změn instrukcí pro zachování letové způsobilosti, která řeší generální opravu nebo jiné formy rozsáhlé údržby, smí být odložena až za dobu, kdy je zahájen provoz výrobku, avšak musí být k dispozici předtím, než kterýkoliv z výrobků dosáhne daného stáří nebo letových hodin/cyklů.

B) Jestliže jsou aktualizace těchto změn instrukcí pro zachování letové způsobilosti vydány držitelem schválení návrhu opravy poté, co byla oprava prvně schválena, je držitel schválení návrhu opravy povinen těmito aktualizacemi vybavit každého provozovatele a na vyžádání je zpřístupnit každé další osobě, od níž se požaduje, aby vyhověla libovolným podmínkám těchto změn instrukcí. Agentuře musí být předložen program distribuce aktualizací změn instrukcí pro zachování letové způsobilosti.

#### **HLAVY O, P, Q**

Zbývající hlavy O, P a Q tohoto oddílu se zabývají oprávněním ETSO, podmínkami pro udělení povolení k letu a označování výrobků letadlových částí a zařízení. Jelikož jsou tyto hlavy pro účel schválení opravy nesouvisející, nebude je zde zmiňovat. [25]

#### **4.3.3 SHRNUTÍ POSTUPU SCHVALOVÁNÍ PRO DANÝ PŘÍPAD OPRAVY**



*Obrázek 33: Logo LOM Praha*

Návrh opravy musí být klasifikován jako „významný“, nebo jako „nevýznamný“ v souladu s kritérii pro změnu typového osvědčení stanovenými v bodu 21.A.91. Návrh opravy musí být klasifikován a schválen agenturou, nebo oprávněnou projekční organizací v rámci jejích práv stanovených v odstavci 1, 2 a 5 bodu 21.A 263 písmene c), jak byla zaznamenána v podmínkách oprávnění. Příslušný držitel oprávnění DOA musí mít ve svých podmínkách oprávnění schváleno právo pro klasifikaci a schvalování oprav v souladu s body 21.A.263, odstavce c), bod 1. (klasifikace oprav – významné x nevýznamné), bod 2. (schvalování návrhu nevýznamné změny), nebo bod 5. (schvalování určitých návrhů významných oprav). V případě, že držitel DOA chce provést kvalifikaci nebo schválení opravy, ale nemá ho ve svých „podmínkách oprávnění“, musí to za něj udělat EASA. V praktické části této bakalářské

práce se oprava koná na motoru M137 výrobce LOM Praha, tudíž tento výrobce musí splňovat výše uvedené podmínky pro schválení a kvalifikaci této opravy na těchto typech motorů.

Jelikož se jedná o návrh nové technologie opravy, který nebyl dosud v letectví používán, bylo by také možné schvalovat samotnou technologii opravy obecně, nikoli jejího fyzického provedení na konkrétním výrobku a následovného uvolnění do provozu konkrétního výrobku.

[26]

## 5 PRAKTICKÁ ČÁST

### 5.1 HISTORIE ZKOUMANÉ KLIKOVÉ SKŘÍŇĚ

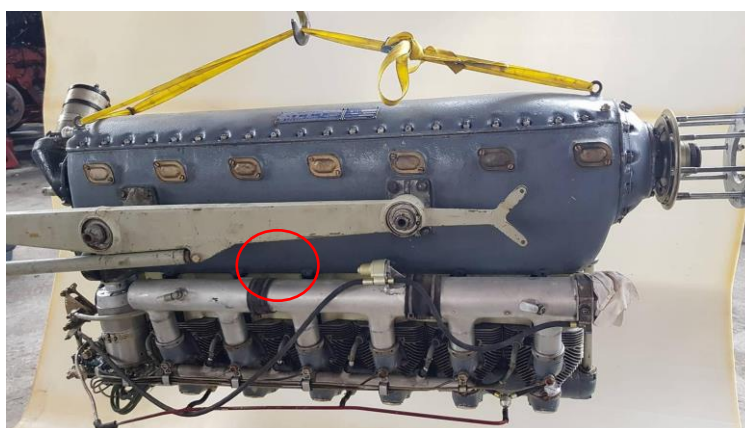


Obrázek 34: Kliková skříň motoru M-337 [48]



Obrázek 35: Letoun Z-226MS [48]

Zkoumaná kliková skříň (viz. obr. č. 34) motoru typu M-137 výrobce LOM Praha pochází z letounu typu Z-226MS (viz. obr. č. 35), využívaného primárně k aerovlekovým provozům, jenž způsobují těžkou zátěž motoru (průběh letu těchto letounů je popsán v úvodu této práce). Jelikož tento motor vykazoval značné úniky a pokles tlaku oleje, byl letoun odstaven. Následovala inspekce motoru, která spočívala v odstrojení aerodynamických krytů motoru na letounu a veškerých deflektorů chladícího vzduchu motoru. Pro zajištění příznivých podmínek pro vizuální kontrolu motoru. Dalším krokem bylo nastartování motoru a vizuální zaměření počátečního místa úniku oleje pověřeným technikem. Vizuální kontrolou bylo zjištěno, že únik oleje má počátek ve stěně odlitku klikové skříňe v místě mezi válci číslo 4 a 5 (číslování od vrtule směrem k ocasu letounu), na pravé straně motoru ve směru letu (viz. obr. č. 36).



Obrázek 36: Poloha defektu motoru M-137 [40]

V návaznosti na toto zjištění byl tento motor demontován z letounu a vyřazen z provozu.

## 5.2 POSTUP ANALÝZY ODLITKU KLIKOVÉ SKŘÍNĚ

Tento odlitek klikové skříně byl vybrán pro praktickou část práce z toho důvodu, že na něm již byl potvrzen výskyt minimálně jednoho defektu nebo praskliny. Tím byl vyřazen z provozu a nemohl sloužit k dalším účelům.

### 5.2.1 OČIŠTĚNÍ ODLITKU

Před započítím analýzy bylo za potřebí odlitek nejprve důkladně očistit od karbonu, mastnot, usazenin a cizích předmětů. Tento proces spočíval ve výplachu klikové skříně za použití technického benzínu. Činnost se musela opakovat několikrát kvůli postupnému rozpouštění usazenin a karbonu. Další problémy při výplachu způsoboval složitý tvar odlitku, převážně v místech dutin pod můstky hlavních ložisek uložení klikové hřídele. Usazeniny z těchto míst byly odstraněny tlakovým rozprašovačem technického benzínu a zárohovým kartáčem.

Po zaschnutí klikové skříně od technického benzínu byly zbytkové volné částice odstraněny vyfoukáním stlačeným vzduchem a tím byla zajištěna čistota odlitku od nečistot a cizích předmětů před zkoumáním defektů a prasklin.

### 5.2.2 SBĚR DAT

Předcházejícím krokem před vyhledáváním vlastních defektů na klikové skříně byl také sběr dat a informací od zkušených konstruktérů a techniků, kteří jsou s těmito motory v kontaktu na denním pořádku. S těmito lidmi znalými v oboru byly primárně konzultovány místa, kde se defekty mohou vyskytovat, která místa se během generální údržbě kontrolují a také jakým způsobem defekty vyhledávat.

Problematická místa se vyskytují na koncích kotvících svorníků, které jsou řešeny jako závrtné šrouby v odlitku klikové skříně, a to na úrovni nejvzdálenější části svorníku v odlitku. Také je praxí potvrzeno, že největší koncentrace trhlin na klikové skříně bývá od čtvrtého válce dozadu, tedy mezi válci č. 4 a č. 6. Tyto místa se kontrolují na výskyt trhlin, a to tím způsobem, že se odstrojená a očištěná kliková skříně otočí o 180° (svorníky směrem nahoru). Následně se přes otvor na válec vizuálně pozoruje místo klikové skříně, na úrovni konce zkoumaného svorníku a pro odhalení trhliny se ručně sevře zkoumaný svorník s nejbližším svorníkem sousedícího válce. Opakované svírání a povelování těchto svorníků odhalí otevírající se a zavírající se trhlínu. Tento efekt lze zvýraznit nanesením kapaliny (například technického benzínu) a následně vlivem sevření a povelování svorníků je ve filmu kapaliny vidět vytlačení malých bublinek či zbytků oleje, který během provozu do trhliny zatekl. [27]



### 5.2.3 ANALÝZA KLIKOVÉ SKŘÍNĚ

Dle postupů a rad znalců probíhala také příprava pomůcek pro kontrolu zkoumaného odlitku. Pro zajištění nejlepšího možného přístupu pro vizuální kontrolu prostorů v klikové skříni pod svorníky, kde je častý výskyt trhlin, byl odlitek otočen o 180° a uložen na ponk (viz. obr. č. 37). Pro vizuální kontrolu byla použita ruční světelná lampa (viz. obr. č. 38) a boroskopická kamera Voltcraft video boroscope BS-20 (viz. obr. č. 39) společně s inspekčním zrcátkem, kvůli kontrolám v těžce přístupných záhybech, dutinách a k následovnému mapování průběhu prasklin.



**Obrázek 37:**  
**Boroskopická kamera [41]**

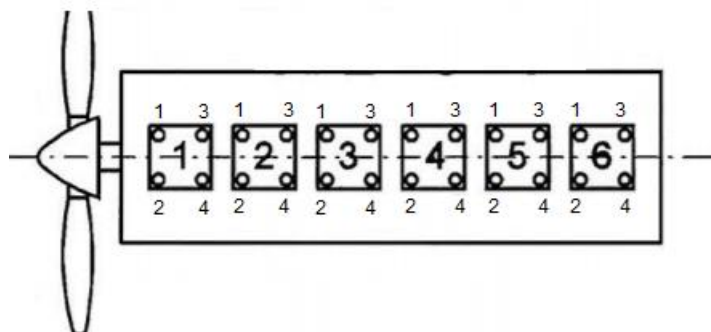


**Obrázek 38:** Ruční svítilna  
[42]



**Obrázek 39:** Inspekční  
zrcátko [43]

Pro zjednodušení kontroly odlitku, byl postup kontroly dle tohoto diagramu (v kontrolní poloze, svorníky směřující nahoru) (viz. obr. č. 34), který bude také dále v práci zajišťovat přehledné mapování vad na klikové skříni. Postup kontroly tedy začínal na válci č. 1, svorníkem č. 1, následně svorník č. 2, č. 3 a č. 4. Poté byl stejný postup aplikován na válci č. 2 a tímto způsobem až k válci č. 6.



**Obrázek 40:** Číslování postupu během analýzy klikové skříně [44]

### 5.2.3.1 VÁLEC Č. 1, Č. 2 a Č. 3

Na těchto válcích byla provedena kontrola dle postupu výše, nejprve tedy vizuální kontrolu pomocí ručního svírání svorníků. Následně za použití inspekčního zrcátka se provedla kontrola stavu odlitku v záhybech olejových kanálků. Na konec zbývala kontrola stavu odlitku v dutinách. Tato kontrola se prováděla boroskopickou kamerou.

První, druhý a třetí válec nevykazoval žádné vady jakéhokoliv charakteru na všech čtyřech svornících každého z těchto válců. Tento výsledek u těchto válců byl očekáván, jelikož přítomnost vady, zjištěna z provozu tohoto motoru, má polohu mezi válci č. 4 a č. 5 a charakter praskliny naznačoval počátek od svorníku č. 4, válce č. 4. Také k tomuto výsledku přispívá tvrzení odborníků o výskytu trhlin od čtvrtého válce dozadu. Nezbyvalo než pokračovat dále na čtvrtý, pátý a šestý válec.

### 5.2.3.2 VÁLEC Č.4

Na tomto válci byl aplikován stejný postup kontroly jako u prvních tří válců. Svorník č. 1 a č. 2 nevykazovaly žádné závady.

#### **Svorník č. 3**

Na svorníku č. 3 již ale pouhým okem byla viditelná prasklina, která přeměřením hloubky od styčné plochy válec/kliková skříň pomocí posuvného měřítka odpovídala vzdálenosti konce závrtné části svorníku. Na plochu, na které se prasklina vyskytuje, byl aplikován technický benzín a opakovaným svíráním svorníku se sousedícím svorníkem bylo docíleno zatečení technického benzínu do prostoru praskliny. Následně byla plocha usušena čistým hadříkem a dalšími svírajícími pohyby dvou svorníků bylo docíleno vytlačení kapaliny z praskliny a tím i jasně viditelný průběh defektu (viz. obr. č. 42).



**Obrázek 41: Svírání svorníků za účelem odhalení defektů [48]**



**Obrázek 42: Odhalená prasklina klikové skříně [48]**



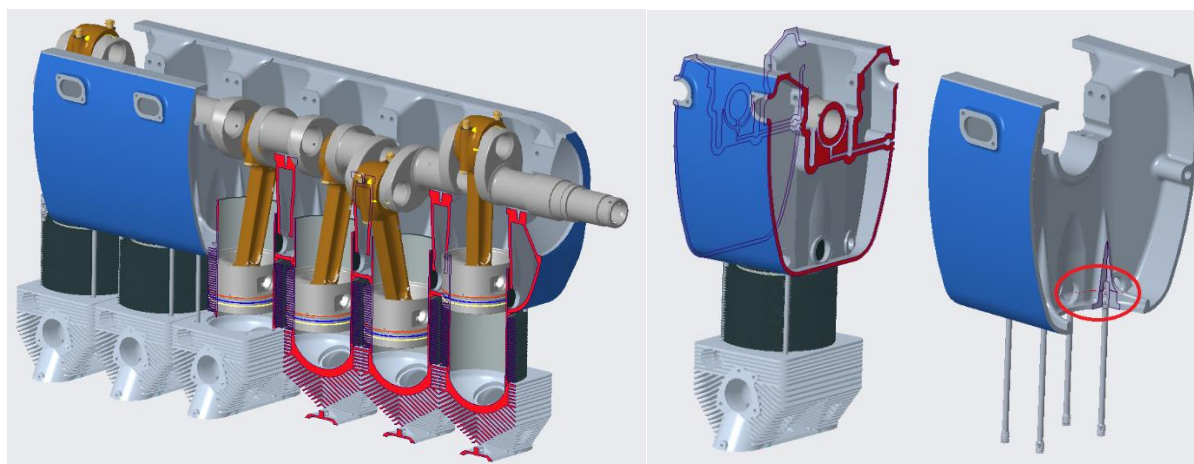
**Obrázek 43: Prasklina v dutině klikové skříně [48]**



**Obrázek 44: Průběh inspekce pomocí boroskopu [48]**

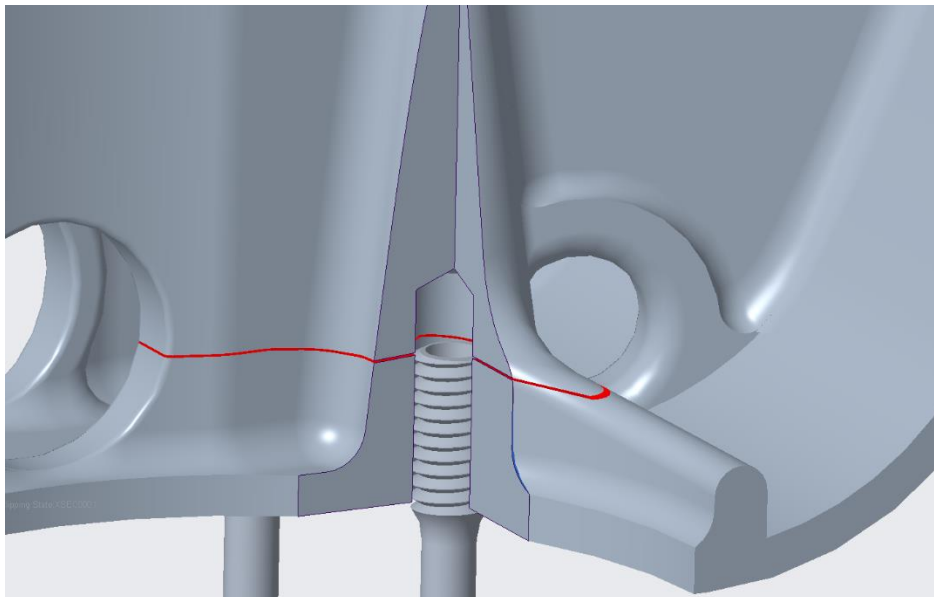
Pro lepší chápání průběhu praskliny bylo pomocí inspekčního zrcátka a boroskopické kamery zjišťováno, jaký má prasklina průběh v složitě dostupných dutinách. Kvůli úzkým otvorům a stěnám dutin bylo mapování praskliny pomocí boroskopické kamery poměrně obtížné.

Díky boroskopické kameře se podařilo prasklinu poměrně přesně zmapovat a určit její průběh a postup skrze materiál. Charakter praskliny má lineární průběh skrze materiál až do prostor dutiny. Pro upřesnění polohy a lepší pochopení průběhu praskliny byly výsledky pozorování zaneseny do 3D modelu segmentu klikové skříně (viz. obr. č. 45). Sestrojení přesného modelu klikové skříně bylo umožněno díky benevolentnímu přístupu konstruktérů LOM Praha, kteří zprostředkovali potřebnou technickou dokumentaci k tomuto odlitku.



**Obrázek 45: Lokalita praskliny znázorněna v rozkladu motoru ve třech bodech, snímek z 3D modelu motoru M-337 [48]**

Na snímcích je znázorněn rozklad motoru a přesné umístění defektu na odlitku klikové skříně. Prasklina je na obrázcích znázorněna červenou barvou. Její průběh je zobrazen na obrázku níže a prostupuje konstantně plošně skrze stěnu materiálu až do dutiny klikové skříně, do úplného oddělení celé „trojúhelníkové“ plochy. Toto oddělení celé plochy bude velice zřetelně viditelné během popisu opravy na čtvrtém svorníku čtvrtého válce.



**Obrázek 46: Detailní pohled místa výskytu praskliny s 90° řezem, snímek z 3D modelu motoru M-337 [48]**

#### **Svorník č. 4**

Po detailnímu mapování praskliny na svorníku č. 3 čtvrtého válce, bylo pokračováno dále v kontrole klikové skříně na výskyt dalších defektů. Při prvním pohledu na stěnu odlitku pod svorníkem č. 4 byla zřetelně viditelná prasklina v pokročilém stádiu.



**Obrázek 47: Detailní pohled dvojité praskliny válce č. 3, svorníku č. 4 [48]**



Z míst tohoto svorníku také pocházel značný únik oleje během provozu tohoto motoru, kvůli kterému byla pohonná jednotka vyřazena z provozu. Při bližším pohledu na defekt je patrné, že se nejedná o jednu, ale o dvě praskliny nad sebou. (viz. obr. č. 47)

S touto zajímavostí byli dále kontaktováni technici a konstruktéři. Ti ale tuto dvojitou prasklinu viděli poprvé a po zdouhavé debatě o příčinách tvoření druhé praskliny pod první prasklinou dospěli k závěru, že se musí jednat o již opravované místo s abnormálním svorníkem. Abnormální svorníky byly aplikovány výrobcem LOM Praha v takových případech, kdy byla zjištěna prasklina pod standardním svorníkem. LOM Praha tyto závady řešily následovným způsobem:

Standardní svorník u zjištěného defektu je demontován z klikové skříně, provede se prohloubení stávající díry na svorník o 7 mm, aby zasahoval abnormální svorník za prasklinu do materiálu odlitku. Následuje prodloužení závitu do prohloubené části díry pro svorník pomocí závitníku M10x1.25. LOM Praha dále aplikuje do svorníkové díry výrobek „LOCTITE-606“ s následovnou aplikací abnormálního svorníku do prohloubené díry. Aplikovaný LOCTITE-606 dle LOM Praha vyplní prostor mezi dvěma plochami praskliny vlivem vytlačení během aplikace abnormálního svorníku.

Tuto opravu LOM Praha využívaly běžně s tím, že jakmile se motor dolétá do generální údržby, bude kliková skříň vyměněna za novou a původní vyřazena z provozu. [27]

Při dalším zkoumání okolí svorníku byl zjištěn původ unikajícího oleje během provozu. Vlivem chvění a vibrací uvolněných částí pod svorníkem se vyrvořila terciální prasklina směřující od svorníku do vnější (pravé) stěny klikové skříně. (viz. obr. č. 48)



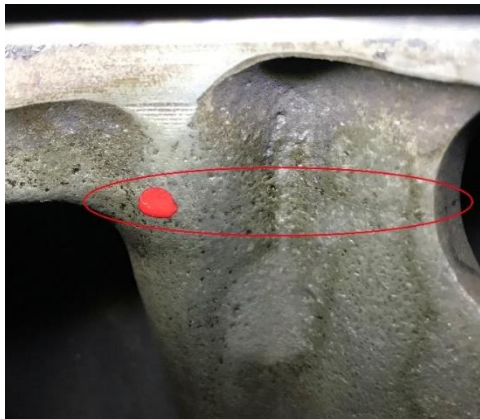
*Obrázek 48: Detailní pohled boční praskliny válce č. 3, svorníku č. 4 [48]*

### **5.2.3.3 VÁLEC Č. 5**

Po hojném výskytu trhlin na válci č. 4 nebyly na válci č. 5 shledány žádné defekty.

### **5.2.3.4 VÁLEC Č. 6**

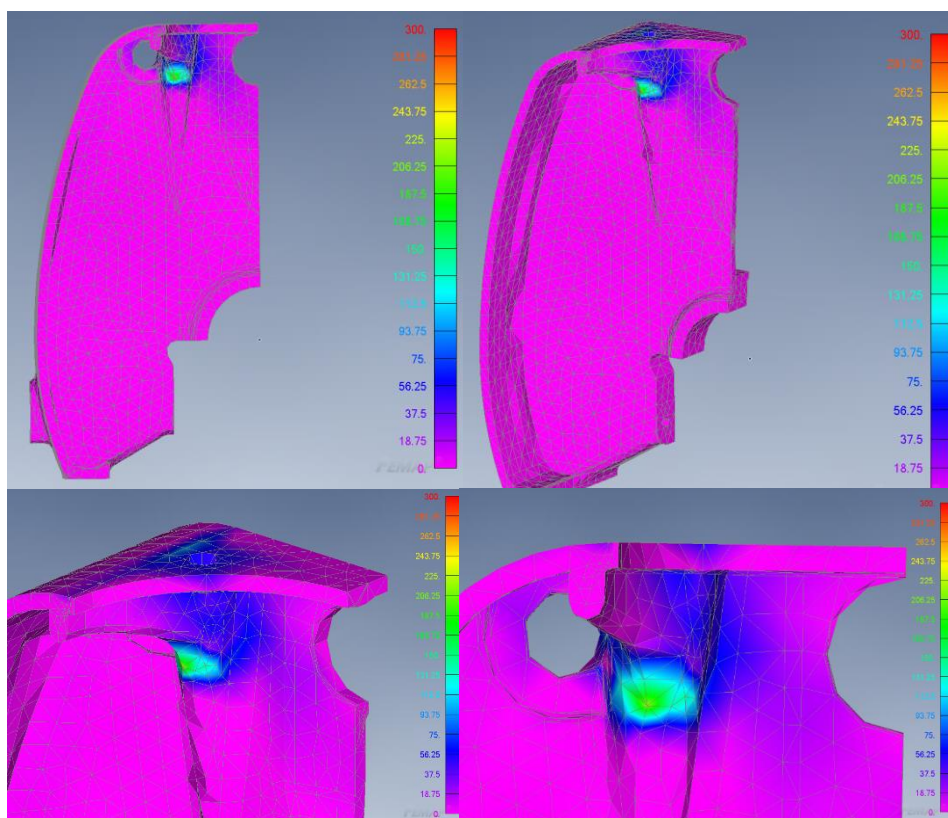
Na Válci č. 6 bylo opět postupováno jako u předchozích pěti válců. Na tomto čísle byl odhalen jeden defekt, a to na svorníku č. 2, který má identický charakter jako defekt na válci č. 4, svorníku č. 3. (viz obr. č. 49) Zbylé svorníky na tomto válci nevykazovaly známky výskytu defektů.



*Obrázek 49: Detailní pohled praskliny válce č.6, svorníku č. 2 [48]*

## **5.2.4 SIMULACE VZNIKU TRHLINY**

V návaznosti na analýzu a mapování těchto prasklin byla pomocí 3D modelu segmentu klikové skříně a svorníku vytvořena simulace napětí v odlitku v provozním prostředí. Pro tento úkol byl využit simulační program FEMAP od společnosti SIEMENS. Z výsledků simulace je při zvýšené grafické vizualitě napětí v tahu patrné místo s největší koncentrací napětí (viz. obr. č. 50). Toto je místo, které odpovídá nejvzdálenější závrtné části svorníku v odlitku. Lze tedy z výsledků simulačního programu předpokládat, že toto je počáteční místo vzniku trhlin v odlitku během silného zatížení spojeného s chvěním, vibracemi a gyroskopickými silami od vrtule.



**Obrázek 50: Snímky z výsledků napětového zatížení provozních hodnot klikové skříňě [48]**

### 5.3 VÝBĚR OPTIMÁLNÍ METODY OPRAVY PRO REALIZACI OPRAVY ZJIŠTĚNÝCH DEFEKTŮ



**Obrázek 51: Logo Diamant-service**

S ohledem na konvenční a nekonvenční metody oprav odlitků zmíněných v této práci, bylo rozhodnuto jít cestou studeného svařování. K této metodě bylo přistoupeno kvůli tomu, že se jedná o metodu, ve které se neustále zdokonalují produkty, nejmodernějšími technologiemi. Také se jedná o metodu, která je již široce rozšířená bezmála ve všech typech průmyslu a je zařazená mezi standardní metody oprav odlitků motorů v automobilním a industriálním průmyslu.

Z tohoto důvodu byla kontaktována česká pobočka firmy Diamant-Service sídlící v Liberci. Vzhledem k charakteristikám základního materiálu odlitku klikové skříňě a specifikacím

prostředí, ve kterém se defekty vyskytují, byla zmíněnou společností doporučena nejvhodnější směs kovového tmelu pro konkrétní opravu metodou studené svařování.

Pro opravu defektů byl vybrán výrobek zvaný „Plastic Metal Alu Superior Pulver (0008)“ (viz. obr. č. 52, 53). Jedná se o směs kovového prášku s 96% obsahem kovu a zbylá procenta tvoří přísady k zajištění excelentního pojení mikročástic kovu. [27]



**Obrázek 52: Balení materiálu Plastic Metal Alu Superior Pulver (0008) [48]**



**Obrázek 53: Materiál Plastic Metal Alu Superior Pulver (0008) [48]**

Společně s kovovým práškem bylo zprostředkováno tvrdidlo (viz. obr. č. 54), které zajišťuje dokonalé pospojení a vytvrzení kovového prášku k získání finální celistvé podoby kovového výrobku.



**Obrázek 54: Tvrdidlo [48]**



## **Postup:**

### *Příprava povrchu*

Před samotným mícháním kovu je za potřebí si pečlivě připravit povrch, na který bude materiál aplikován. K zajištění nejlepší možné přilnavosti aplikovaného materiálu k základnímu materiálu je za potřebí zajistit hrubou strukturu povrchu a je-li to možné, co největší kontaktní plochu mezi aplikovaným a základním materiálem. Dále je velice důležité zajistit, aby styčné plochy byly absolutně odmaštěny, tohoto může být dosaženo očištěním pomocí technického benzínu, nebo čističem dodávaným firmou Diamant.

### *Míchání*

Míchání prášku a tvrdidla by mělo dosahovat minimálního poměru 1:1 (viz. obr. č. 55). Dalším přidáváním kovového prášku je možné pro získání tužší směsi. Maximální směšovací poměr je však 3:1. Díky těmto širokým možnostem lze namíchat směs řidší vhodnou pro lití nebo hustší naopak lépe aplikovatelnou nanášením.

### *Vytvrzování*

Vytvrzovací doba závisí na poměru použitém během míchání směsi a může se pohybovat od 5 do 60 minut. [27]



**Obrázek 55: Namíchaná směs Metal-plastic materiálu [48]**

## **5.4 OPRAVA PRASKLIN ODLITKU KLIKOVÉ SKŘÍŇĚ**

### **5.4.1 TEORETICKÝ POSTUP OPRAVY PRASKLINY**

Ponaučení z výsledků oprav prasklin klikových skříní výrobcem LOM Praha, bylo rozhodnuto vycházet ze stejného postupu opravy (zmíněný výše) s určitými změnami. Tyto změny spočívaly především ve využití materiálu plastic-metal pro opravu a také v kompletním odstranění materiálu v defektní části odlitku s následným nahrazením tímto moderním materiálem. Substitucí defektní části materiálu za plastic-metal má hlavní význam v tom, že dojde ke kompletnímu odstranění praskliny a jejímu zacelení. Také zde nebude docházet k nežádoucím vibracím mezi plochami praskliny a závit svorníku bude opět zabírat celou délkou závitu v celistvém materiálu a tím bude obnovena původní pevnost odlitku.

## 6 OPRAVA PRASKLIN

### 6.1 DEMONTÁŽ SVORNÍKŮ

K zajištění bezproblémového přístupu k defektům a zamezení možnosti poničení svorníku během opravy bylo rozhodnuto svorníky demontovat z klikové skříně. K tomuto procesu je za potřebí použít speciální přípravek (viz. obr. č. 56), protože zde hrozí překroucení a deformace svorníku během demontáže.



**Obrázek 56: Přípravek pro demontáž svorníků [48]**



**Obrázek 57: Demontáž svorníku z klikové skříně [48]**

### 6.2 ODSTRANĚNÍ DEFEKTŮ

Jakmile byl zajištěn přístup k defektům a vyloučena možnost poničení svorníků, byl zahájen proces odstranění prasklin. Tento proces se skládal ze dvou úkonů. První úkon spočíval v odvrtávání praskliny pomocí zárohové akumulátorové vrtačky Makita-DA333DZ (viz. obr. č. 58) a vrtáku  $\varnothing 3.5$  mm (viz. obr. č. 59).



**Obrázek 58: Zárohová akumulátorová vrtačka Makita**



**Obrázek 59: Vrták  $\varnothing 3.5$  mm**

Odvrtávání probíhalo po celé délce praskliny skrze plnou tloušťku stěny (viz. obr. č. 61). Jednotlivé díry byly vrtané v takové vzdálenosti od sebe, aby nedošlo k přeskočení vrtáku do vedlejší díry a případnému odštěpu materiálu.



**Obrázek 60: Proces odvrtávání praskliny klikové skříně [48]**



**Obrázek 61: Proces odvrtávání praskliny klikové skříně [48]**

Jakmile byly otvory takto odvrtány, následovala operace, která zajišťovala maximální možnou styčnou plochu mezi horní a dolní částí původního materiálu. Z tohoto důvodu byly do vyvrtaných děr vyříznuty závity pomocí sady závitníků M4 (viz. obr. č. 62).



**Obrázek 62: Sada závitníků M4 [45]**



**Obrázek 63: Snímek vyříznutých závitů [48]**



Následovalo odstranění zbylých můstků mezi jednotlivými otvory k celkovému odstranění defektu z odlitku (viz. obr. č. 65). K tomuto úkolu bylo opět zvoleno použití ruční zárohové vrtačky obdobně jako u procesu vrtání. Dále byla použita technická kuželová fréza 444800 SKM0307 (RG4400) (viz. obr. č. 64) pro frézování můstků.



**Obrázek 64: Technická fréza HM,  
Kuželová [46]**



**Obrázek 65: Vyfrézovaná drážka se  
závity [48]**

Tímto byl defekt kompletně odstraněn z odlitku. Avšak předtím, než bylo možno aplikovat Metal-Plastický materiál, bylo za potřebí drážku důkladně odmastit a zbavit špon z procesů obrábění. Pro důkladné odstranění špon byl použit stlačený vzduch (viz foto) a následně byla drážka zbavena mastnot pomocí technického benzínu (viz. obr. č. 66).



**Obrázek 66: Odstraňování špon a volných nečistot stlačeným vzduchem [48]**

### 6.3 APLIKACE METAL-PLASTIC MATERIÁLU

V tomto případě opravy bylo rozhodnuto využít širokých vlastností přípravy Metal-Plastic materiálu. Namíchání řidší směsi znamenalo využití možnosti aplikace gravitačním litím, což se v tomto případě nabízelo s přihlédnutím na to, že již byly připraveny nálevky v podobě původních děr pro svorníky. Aby bylo zaručeno zacelení a zamezení vytékání namíchané směsi z drážky během lití, byla drážka ohraničena ze všech stran pomocí maskovací pásky. Ohraničená drážka maskovací páskou byla již připravena k aplikaci Metal-Plastic materiálu.

Příprava směsi byla prováděna stejným způsobem jako v části 5.3.



**Obrázky 67: Postup přípravy materiálu Metal-plastic [48]**

Po namíchání směsi následovala vlastní aplikace. Jak bylo zmíněno výše, drážka byla ze všech stran uzavřena maskovací páskou a pro nálevku byla využita původní díra pro svorník. (viz. obr. č. 68). Do díry pro svorník byla kontinuálně doplňována namíchaná směs do té doby, dokud nebyla drážka plně vyplněna. To bylo dosaženo díky sledování hladiny dodávané směsi (viz. obr. č. 69).



**Obrázek 68: Aplikace materiálu Metal-plastic gravitačním litím [48]**



**Obrázek 69: Vyplněná dutina materiálem Metal-plastic [48]**



Tímto stejným způsobem byla provedena oprava na všech třech prasklinách vyskytujících se pod svorníky. Po vytvrzení směsi byla odstraněna maskovací páska a provedeno mírné zabroušení nerovností drážek. Výsledná podoba drážek je k vidění na následujících snímcích.



**Obrázek 70: Fotografie vyplněných drážek materiálem Metal-plastic [48]**

Oprava poslední praskliny na válci č. 4, svorníku č. 3, která postupuje od svorníku do boku klikové skříně probíhala obdobně jako oprava prasklin pod svorníky. Jelikož nebylo jednoznačně viditelné, kde má prasklina konečný bod, bylo za potřebí využít kapilární zkoušky k přesnému zaměření konce praskliny (viz. obr. č. 71, 72)



**Obrázek 71: Kapilární zkouška – nanesení indikační látky [48]**



**Obrázek 72: Kapilární zkouška – nanesení detekční látky [48]**



V této chvíli již bylo jisté, kde se nachází konečná fáze praskliny. V návaznosti na to byla započata její oprava. Zde bylo vycházeno z poznatků metody stop-drilling zmiňované v části 4.1.2. Ta spočívala nejprve v odvrtání konečné fáze praskliny, aby se zajistilo vybíjení napětí v prasklině a zamezení jejímu šíření (viz. obr. č. 73). Následovalo vyfrézování praskliny vytvořením „V“ drážky (viz. obr. č. 74). Po vyfrézování drážky bylo možné postoupit dále k odmašťovacímu procesu a následně k zacelení drážky pomocí Metal-Plastic materiálu. Zde již nebyla žádoucí řídká směs pro lití, ale spíše směs hustší a ta nanášena a vlačována do drážky pomocí malé špachtle. Konečná podoba praskliny po vytvrzení a srovnání s povrchem klikové skříňe je možno vidět na fotografii (viz. obr. č. 75).



**Obrázek 73: Stop-drilling koncové části praskliny [48]**



**Obrázek 74: Frézování „V“ drážky praskliny [48]**



**Obrázek 75: Vyplněná drážka praskliny Metal-plastic materiálem [48]**

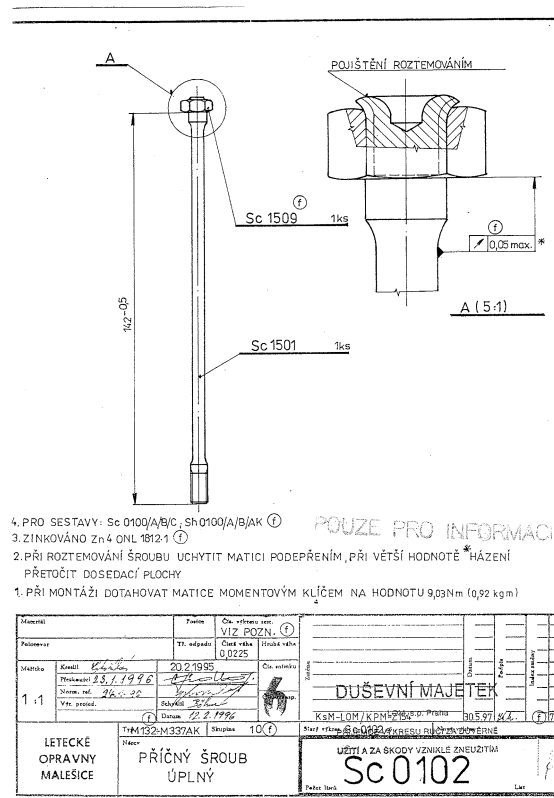
## 6.4 SESTROJENÍ MOTORU

### 6.4.1 OBNOVENÍ DĚR PRO SVORNÍKY

V tomto bodě byly již všechny praskliny opravené a materiál vytvrzený. Před tím, než bylo možné začít se sestrováním motoru, bylo nutno obnovit díry a závity pro svorníky v místech, kde se prováděla oprava. Jelikož byly tyto otvory využívány jako nálevky, byly materiálem Metal-Plastic zaslepeny. Kvůli tomu, že svorníky disponují závitem M10 se stoupáním 1.25mm, byl proto využit příslušný vrták Ø 8.4 mm pro vrtání díry tohoto rozměru závitu. Také byl použit pro řezání závitu příslušný závitník M10 (viz. obr. č. 76).



Obrázek 76: Závitník M10x1.25 [48]



Obrázek 77: Technická dokumentace svorníku [47]

Přesná rozteč polohy otvoru pro svorník bylo obdrženo z technické dokumentace klikové skříně. Polohy otvorů byly označeny na plochu odlitku. Pro zajištění kolmosti otvoru vůči dosedací ploše válců na odlitku byl využit přenosný stojan na vrtačku Narex, opatřený plným těžkým dnem s drážky (viz. obr. č. 78). Pomocí těchto drážek a svorníků na klikové skříně byl stojan připevněn k odlitku. Otvor pro svorník byl následně vyvrtán a poté pomocí závitníku vyříznutý závit. (viz. obr. č. 79)



**Obrázek 78: Sestava vrtačky a stojanu pro vrtání svorníkových otvorů [48]**



**Obrázek 79: Řezání závitů pomocí závitníku M10x1.25 [48]**

Tento postup byl opakován pro všechny 3 svorníky, na kterých byly opravy prováděny. Svorníky byly do otvorů aplikovány pomocí stejného přípravku, kterým byly svorníky vytáčeny v bodě 6.1 této práce.

Tímto byla oprava prasklin kompletní.

## 6.5 OVĚŘENÍ SPOLEHLIVOSTI OPRAVY ODLITKU

Kvůli ověření spolehlivosti opravovaných prasklin odlitků bylo uvažováno, jakým zkouškám klikovou skříň podrobit, aby se nejlépe simulovaly provozní teplotní podmínky zatížení.

S ohledem na tyto skutečnosti bylo rozhodnuto pro motorové stacionární pozemní zkoušky. Tyto zkoušky spočívají v kompletním sestavení motoru do provozního stavu a jeho následné usazení do letounu. Díky silné podpoře firmy Glider Aerobatic Club (GAC), ve které jsem také zaměstnán, byl veškerý potřebný materiál k dispozici. GAC také zprostředkoval letoun, na kterém se v tu chvíli prováděla údržba motoru, tudíž byl letoun bez pohonné jednotky a tím adekvátní zkušební platformou pro zkoušky.

### 6.5.1 KOMPLETACE MOTORU DO PROVOZNÍHO STAVU

Kompletace motoru do provozního stavu byla prováděna mnou za použití svých znalostí získaných z provozu a zkušeností ze Střední školy civilního letectví Praha Ruzyně, na které jsem vystudoval obor letecký mechanik.

Kompletace motoru byla průběžně dokumentována a následně z materiálů sestaveno video celkové montáže motoru se zástavbou do letounu. Video dokumentace je přiložena k této práci ve formátu .mp4 na přiložené USB Flashdisku.

Video je také k dispozici pomocí načtení QR kódu, nebo na odkaze níže



Odkaz video: <https://youtu.be/M4CsFoiH2qo>

## 6.6 PRŮBĚH ZKOUŠKY MOTORU

Jelikož byly na tomto motoru použity nové pístní kroužky a válce, na kterých byl proveden proces honování, bylo rozhodnuto na začátek zkoušky vložit zabíhací postup vydávaný firmou LOM Praha pro tyto konkrétní motory. Tento postup je nutný kvůli správnému zaběhnutí a usazení dílů. V případě tohoto motoru tedy primárně jde o usazení pístních kroužků s válci. Když by se záběh nepovedl, mohlo by dojít k nesprávnému těsnění mezi válci a písty, případně k jejich poškození. Postup záběhu je přiložen níže (viz. obr. č. 80). [27]



### PROVOZNÍ INSTRUKCE

#### 7. ZÁBĚH PO VYMĚNĚ DÍLŮ SKUPINY PÍST - VÁLEC

Po smontování motoru proveďte záběh motoru v letadle s letovou vrtulí.

Spouštění motoru proveďte dle instrukce uvedené v této části příručky.

Postup záběhu:

Otáčky za min.	Doba chodu	Kompresor-M332,M337
spuštění		zapnut
800	10 minut	vypnut
1000	5 minut	vypnut
1100	5 minut	vypnut
1400	5 minut - teplota vstup. oleje min. 25°C	vypnut
1600	5 minut	vypnut
1800	5 minut	vypnut
2000	5 minut	vypnut
2200	5 minut	vypnut
2400	10 minut	vypnut
2600	20 vteřin	vypnut
2700-100	10 vteřin - teplota hlav válců max. 210°C	zapnut
2400	10 minut	vypnut
2600	20 vteřin	vypnut
2700-100	10 vteřin - teplota hlav válců max. 210°C	zapnut
900 ÷ 1100	10 minut - ochlazení	
500 ÷ 600	zastavení	vypnut

Doba chodu celkem 81 minut

Při záběhu motoru musí být dodrženy všechny předepsané hodnoty teplot a tlaků dle specifikace v části 3 této příručky. V průběhu prvních 10-ti hodin chodu motoru po záběhu je vhodné používat maximální vzletový a maximální trvalý režim motoru co nejméně.

**Obrázek 80: Postup záběhu motoru M-137/M-337 [44]**

Následně po dokončení zabíhacího procesu byl motor podroben 5 hodinové záběhové zkoušce. V této zkoušce bylo provedeno celkem 5x spouštění motoru. Motorové zkoušky byly rozděleny do 5 úseků po 60 minutách. Na začátku každého úseku bylo provedeno nejprve spuštění motoru, následně ohřívání motoru a oleje na provozní teploty (5 min.). Po ohřátí motoru vždy proběhla zkouška zapalování levé a pravé řady zapalovacích svíček a magnet. Dále byla snížena přípust' na hodnotu 1 000 ot. po dobu jedné minuty. Posléze byly zvýšeny otáčky motoru na 1 500 ot. opět po dobu jedné minuty. Následovaly dvě minuty na otáčkách 2 000 ot. a okamžitě po té maximální výkon po dobu jedné minuty. Jelikož se motor během pozemního motorování poměrně intenzivně zahřívá, vždy po jedné minutě maximálního výkonu následovaly dvě minuty chlazení motoru na snížené otáčky 1 700 ot. Proces maximálního výkonu a chlazení bylo opakováno do uplynutí každého hodinového úseku. Na konci úseku vždy probíhalo chlazení motoru na 1 000 ot. s následným vypnutím. Průběh úseků je popsán níže. Během celého motorového úseku byly v kabině letounu monitorovány motorové přístroje, tj. tlak paliva, tlak mazacího oleje a teplota mazacího oleje. U každého úseku byla vždy přítomna monitorující osoba vybavena hasícími přístroji. Tato osoba monitorovala stav motoru zvenčí a primárně kontrolovala možný výskyt oleje unikající z klikové skříně z míst oprav.

Průběh úseků: - - - - -

1) Start motoru

2) Zahřívání – Otáčky 1500 - 5 min.

3) Zkouška zapalování motoru – otáčky 2000 – 30s

4) 1 min. – 1000ot.

5) 1 min. – 1500ot.

6) 2 min. – 2000ot.

7) 1 min. – 2550ot. (Maximální výkon)

8) 2 min. – 1700ot. (Chlazení motoru)

- Následně se opakoval bod č. 7 a 8 do konce hodinového úseku.

Průběh vypnutí motoru na konci úseku:

1) Z Maximálního výkonu (2550ot) plynulým stáhnutím přípusti na 1000ot

2) 2 min. – 1000ot.

3) Vypnutí motoru - - - - -





*Obrázek 81: Foto letounu během motorové zátěžové zkoušky [48]*

## **6.7 HODNOCENÍ MOTOROVÉ ZÁTĚŽOVÉ ZKOUŠKY**

Motorová zátěžová zkouška proběhla bez komplikací. Během prvního spouštění motoru se vždy předpokládá, že se vyskytnou určité nedostatky. U tohoto motoru také nastala drobnost v podání selhání těsnění na záslepce slepé větve olejového čerpadla. To se projevilo intenzivním únikem oleje ze zadní části motoru. Monitorující osoba však ale okamžitě informovala ručními gesty o nutnosti zastavení motoru, které bylo vzápětí ihned provedeno. Závada byla lokalizována, zhodnocena a vadné těsnění vyměněno novým. Dále motorová zkouška probíhala hladce a během zkoušky nebyly zaznamenány žádné anomálie v provozních hodnotách motoru a přístrojů. Monitorující osoba v průběhu zkoušky také nenaznamenala známky závad ani únik oleje z motoru.

## 7 VYHODNOCENÍ OPRAVY PO MOTOROVÉ ZKOUŠCE

Po dokončení motorové zátěžové zkoušky bylo za potřebí zkontrolovat a zhodnotit stav opravovaných míst klikové skříně. V případě opravy praskliny na válci č. 4 svorníku č. 3 postupující od svorníku do boku klikové skříně to bylo jednoduché. Zde bylo také jediné místo opravy, které bylo možné monitorovat během chodu motoru. V případě vady či protahování trhliny by byl velmi patrný únik oleje. Jelikož toto místo opravy nevykazovalo žádné známky úniku oleje, byla to velice přívětivá zpráva a po bližší inspekci byla oprava zhodnocena jako úspěšná. Aby dále bylo možno provést kontrolu zbylých tří prasklin, bylo nutné motor opět odstrojit. Zde ale nebylo provedeno svěšení celého motoru. Pouze byl demontován palivový a zapalovací systém společně s deflektory chladícího vzduchu. Dále bylo pokračováno vačkovou hřídelí s jejím domkem. V této chvíli byly již odkryté samotné válce s hlavami. Jelikož se opravy prováděly na válcích č. 4 a č. 6, bylo pro účely kontroly dostačující demontovat pouze tyto válce.







***Obrázky 82: postup demontáže hlav a válců za účelem kontroly stavu oprav [48]***

Toto bylo učiněno a tím byl uvolněn prostor pro kontrolu oprav. Vizualně byl stav oprav v dobrém stavu. Na první pohled nebyly vidět žádné známky poškození či závad. Podrobnější kontrola byla dále prováděna stejným způsobem jako v části 5.2.3 za použití mírného pohybu svorníku. Tato kontrola byla provedena vždy několikrát na každém místě opravy. S radostí lze potvrdit, že opravy prasklin na všech třech místech nevykazovaly známky poškození, ani známky trhlin.

## 7.1 ZÁVĚREČNÉ ZHODNOCENÍ

Cílem této bakalářské práce bylo najít účinnou metodu pro opravy odlitků v leteckém průmyslu s její následnou aplikací. Konkrétně v této práci jsem se zabýval defektním odlitkem klikové skříně motoru řady M, výrobce LOM Praha. Na skříně bylo zaznamenáno několik defektů stejného typu, které byly následně analyzovány. Před realizací jejich oprav jsem nejdříve vyhledával metody oprav, které se používají v letectví a v jiných typech průmyslu. Tyto metody jsem popsal, zhodnotil a následně jsem zvolil metodu, kterou jsem se rozhodl tyto defekty opravovat. Zvolený způsob opravy byla tedy metoda studeného svařování a díky silné podpoře českého zástupce Diamond-servis sídlící v Liberci, jsem měl možnost opravu prakticky zrealizovat. Po dokončení opravy jsem delší dobu přemýšlel nad tím, jakým způsobem nejlépe zhodnotit kvalitu opravy defektů odlitku. Nejpřesnější výsledky zkoušky by vyplývaly z reálného provozu na akrobatickém, či aerovlekovém letounu. Taková zkouška by ale na sebe vážala několik rizik a také mnoho času stráveného vyřizováním registrace experimentálního letounu pro účely letových zkoušek. Proto jsem se rozhodl co nejlépe napodobit provozní prostředí, ve kterém se tyto motory pohybují v podobě pozemních zátěžových zkoušek. Motor jsem tedy nejdříve sestavil a následně usadil do letounu, který mi byl pro účely pozemních zkoušek zapůjčen od firmy GAC. Na motoru jsem provedl pozemní zátěžové zkoušky, při kterých jsem zvýšeným zatížením napodoboval reálné prostředí těchto motorů. Po ukončení zkoušky jsem motor opět odstrojil kvůli kontrole oprav provedených na klikové skříně. Tyto opravy i po silném zatížení obstály motorovou zkoušku a po důkladné kontrole nebyly shledány žádné závady v oblastech oprav klikové skříně ani materiálu, kterým se oprava prováděla. Z těchto faktů tuto opravu hodnotím pro účely bakalářské práce jako úspěšnou. Před tím však než přednesu výrobci LOM Praha návrh opravy klikových skříní touto metodou, podrobím motor dalším pozemním zkouškám. Pokud oprava nadále obstojí ve zkouškách, budu usilovat o letové experimentální zkoušky.

Práce na opravě byla velice zajímavá, naučná a poskytla mi možnost se do detailu seznámit s motory typu M a jejich vlastnostmi.

Věřím, že výsledky a poznatky z mé bakalářské práce budou přínosem leteckému průmyslu a budou nápomocny k udržení letové způsobilosti našich ikonických československých letounů.

## ZDROJE

- [1] CORE – *Aggregating the world's open access research papers* [online]. Copyright © [cit. 26.07.2021]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/30308559.pdf>
- [2] ADAMEC, Josef a Jindřich KOCÁB. *Letadlové motory*. Vyd. 2. Praha: Corona, 2008. ISBN 978-80-86116-54-9.
- [3] ScienceDirect. *ScienceDirect* [online]. Copyright © [cit. 26.07.2021]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/az91-alloy>
- [4] [online]. Copyright ©S [cit. 26.07.2021]. Dostupné z: [http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/matlet/Slitiny\\_Mg.pdf](http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/matlet/Slitiny_Mg.pdf)
- [5] GAC - *akrobatická a plachtařská škola Miloše Ramerta* [online]. Copyright © [cit. 26.07.2021]. Dostupné z: <http://www.gac-ramert.eu/files/doletis-motorova-etiketa.mp4>
- [6] VEČEŘA, Jiří. *MATERIÁLY POUŽÍVANÉ V LETECKÉM PRŮMYSLU* [online]. Brno, 2011 [cit. 2021-7-26]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/4293/final-thesis.pdf?sequence=6>
- [7] RŮŽIČKA, Josef. *STRUKTURA A VLASTNOSTI TLAKOVĚ LITÝCH ODLITKŮ Z HOŘČÍKOVÉ SLITINY AZ91* [online]. Brno, 2009 [cit. 2021-7-26]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=19124](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=19124)
- [8] HUBÁČKOVÁ, Jiřina, Lubomír ČÍŽEK a Radomila KONEČNÁ. *Strukturní charakteristiky hořčíkové slitiny AZ91* [online]. ŽILINA, 2003 [cit. 2021-7-26]. Dostupné z: [http://metal2014.tanger.cz/files/proceedings/metal\\_03/papers/176.pdf](http://metal2014.tanger.cz/files/proceedings/metal_03/papers/176.pdf)
- [9] LOM PRAHA. *Technický popis a návod k obsluze* [online]. Copyright © [cit. 26.07.2021]. Dostupné z: <https://pistovemotory.s8.cdn-upgates.com/y/y5b0d108796da9-technicky-popis-a-navod-k-obsluze-motoru-rev02-2018-05.pdf>
- [10] CORE – *Investigate the efectictiveness of stop drill hole in delaying crack from crack initiation*. [online]. Copyright © [cit. 26.07.2021]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/159180385.pdf>
- [11] RŮŽIČKA, Milan, Josef JURENKA a Martin NESLÁDEK. *Dynamická pevnost a životnost* [online]. 2005 [cit. 2021-7-26]. Dostupné z: [http://mechanika.fs.cvut.cz/content/files/DPZ/2017/DPZ\\_Jur\\_2017\\_05.pdf](http://mechanika.fs.cvut.cz/content/files/DPZ/2017/DPZ_Jur_2017_05.pdf).  
Prezentace. ČVUT Fakulta Strojní.
- [12] KOSEK, Lukáš. *LOMOVÁ HOUŽEVNATOST KOVOVÝCH MATERIÁLŮ A JEJÍ ZKOUŠENÍ* [online]. 2011 [cit. 2021-7-26]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=41136](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=41136).  
Bakalářská práce. VUT v Brně, FSI.

- [13] Cracked Crankcases: Repair or Replace? - Aviation Consumer. *Home - Aviation Consumer* [online]. Copyright © Belvoir Media Group, LLC. All rights reserved. [cit. 27.07.2021]. Dostupné z: <https://www.aviationconsumer.com/maintenance/cracked-crankcases-repair-or-replace/>
- [14] *Svařování* [online]. [cit. 2021-7-26]. Dostupné z: [http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/svarovani/UT\\_01\\_Prehled\\_svarovani\\_T08.pdf](http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/svarovani/UT_01_Prehled_svarovani_T08.pdf) . Fakultní prezentace. ČVUT FS.
- [15] *Svařování* – *Wikipedie*. [online]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Sva%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD>
- [16] 9 Rules for Successful Weld Repair of High Strength Steel - Domson Engineering & Inspection LTD. *Crane & Lift Engineer - Non Destructive Testing Canada* | Domson [online]. Dostupné z: <https://domson.ca/9-rules-for-successful-weld-repair-of-high-strength-steel/>
- [17] Kapilární zkoušení | Weldinspect s.r.o.. Weldinspect s.r.o. | *Nedestruktivní testování výrobků a inspekce svařování* [online]. Copyright © Weldinspect s.r.o. [cit. 27.07.2021]. Dostupné z: <https://www.weldinspect.cz/kapilarni-zkouseni>
- [18] MACEK, Prof. Ing. Karel DrSc. *STRUKTURA A VLASTNOSTI MATERIÁLU A JEJICH ZKOUŠENÍ* [online]. [cit. 2021-7-26]. Dostupné z: [http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/3-6\\_vady-vyrboku-a-zkousky-bez-poruseni.pdf](http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/3-6_vady-vyrboku-a-zkousky-bez-poruseni.pdf) . Fakultní práce. ČVUT FS.
- [19] EURS, Niklas. *Metal stitch reconditioning analysis* [online]. 2013 [cit. 2021-7-26]. Dostupné z: [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/69616/eurs\\_niklas.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/69616/eurs_niklas.pdf?sequence=1&isAllowed=y) . Bakalářská práce. VAASA Mechanical and Production Engineering.
- [20] How to repair a cracked engine block or head gasket with K&W FIBERLOCK - *K&W Stop Auto Leak Solutions. K&W Stop Auto Leak Solutions - Find the solution to fix your car leak* [online]. Copyright ©2021 CRC INDUSTRIES. ALL RIGHTS RESERVED [cit. 27.07.2021]. Dostupné z: <https://www.stopautoleaks.com/videos/how-to-repair-a-cracked-engine-block-or-head-gasket-with-kw-fiberlock/>
- [21] The metallplastic experts: Full-Service-Provider since 130 years. *Metall-Polymer-Systeme: höchste Qualität von DIAMANT®* [online]. Copyright © 2016 [cit. 27.07.2021]. Dostupné z: <https://www.diamant-polymer.de/en/>
- [22] Learn More About the Belzona company. *Object moved* [online]. Copyright © [cit. 27.07.2021]. Dostupné z: <https://www.belzona.com/en/about.aspx>
- [23] *ZÁKLADNÍ FAKTA O LODNÍCH ŠROUBECH* [online]. [cit. 2021-7-27]. Dostupné z: <https://www.vrtule.org/prilohy/Z%C3%A1kladn%C3%AD%20vysv%C4%9Btlivky%20vrtul%C3%AD.pdf>
- [24] Úřad pro civilní letectví - Bezpečně a s nadhledem [online]. Dostupné z: <https://www.caa.cz/dokumenty/predpisy>
- [25] TEXT v úplném znění: 32012R0748 — CS — 24.03.2020. EUR-Lex — *Access to European Union law — NAŘÍZENÍ KOMISE (EU) č. 748/2012* [online]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/HTML/?uri=CELEX:02012R0748-20200324&from=CS#toCId15>

- [26] Kostroun, Tomáš. *Informace bakalářská práce – certifikační postup* [elektronická pošta]. Message to: [denniszdenek.strnad@fs.cvut.cz](mailto:denniszdenek.strnad@fs.cvut.cz) 15. dubna 2021 [cit. 27.07.2021]
- [27] BURIÁNEK, Roman, PODLIPSKÝ, Jiří, ALTMAN, Oldřich. – *Osobní sdělení odborníků*. [V průběhu bakalářské práce]
- [28] ZAMĚSTNANEC. Osobní sdělení zaměstnance Diamant-servis s.r.o. Ruprechtická 387/49, 460 01 Liberec
- [29] LOM Praha. *Katalog náhradních dílů M337A,AK,AK.1 rev r*. [online]. Copyright © [cit. 27.07.2021]. Dostupné z: <https://pistovemotory.s8.cdn-updates.com/q/g5e465b356a92a-katalog-nd-m337a-ak-ak-1-rev-r.pdf>
- [30] *lycoming engine maintenance manual* [online]. Copyright © [cit. 27.07.2021]. Dostupné z: <https://www.lycoming.com/sites/default/files/MM-IO-360-N1A%20-%203-31-2016.pdf>
- [31] *Aeroklub Kralupy nad Vltavou – popis obsluha a údržba letounu zlin 226 ms* [online]. Copyright © [cit. 27.07.2021]. Dostupné z: [https://www.akkralupy.cz/casomira/soubory/Z226MS\\_1.pdf](https://www.akkralupy.cz/casomira/soubory/Z226MS_1.pdf)
- [32] Pístové motory :: Letecké pístové motory :: *Pístové motory :: Letecké pístové motory* :: [online]. Copyright © LOM PRAHA s. [cit. 27.07.2021]. Dostupné z: <http://www.pistovemotory.cz>
- [33] *Katedra mechaniky, pružnosti a pevnosti* | [online]. Copyright © [cit. 27.07.2021]. Dostupné z: [http://www.kmp.tul.cz/system/files/duz\\_2018\\_6\\_lm\\_ru.pdf](http://www.kmp.tul.cz/system/files/duz_2018_6_lm_ru.pdf)
- [34] Lycoming IO360 oil leak = case crack? - General Mooney Talk - Mooneyspace.com - A community for Mooney aircraft owners and enthusiasts. *Forums - Mooneyspace.com - A community for Mooney aircraft owners and enthusiasts* [online]. Dostupné z: <https://mooneyspace.com/topic/36686-lycoming-io360-oil-leak-case-crack/>
- [35] Lycoming Engines | Piston Aircraft | General Aviation. *lycoming.com* [online]. Copyright ©2021 [cit. 27.07.2021]. Dostupné z: <https://www.lycoming.com/engines>
- [36] BENEŠ, Libor. *Svařování* [online]. Copyright © [cit. 27.07.2021]. Dostupné z: [http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/svarovani/UT\\_01\\_Prehled\\_svarovani\\_T08.pdf](http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/svarovani/UT_01_Prehled_svarovani_T08.pdf)
- [37] KADEŘÁBEK, Tomáš. *NEDESTRUKTIVNÍ ZKOUŠENÍ MATERIÁLU: PŘÍPRAVA UČITELE STŘEDNÍ TECHNICKÉ ŠKOLY Z POHLEDU VYBRANÝCH METOD VÝUKY* [online]. 2017 [cit. 2021-7-26]. Dostupné z: [https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/70064/MU-BP-2017-Kaderabek-Tomas-BP\\_2017\\_Kaderabek\\_Tomas\\_final.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/70064/MU-BP-2017-Kaderabek-Tomas-BP_2017_Kaderabek_Tomas_final.pdf?sequence=1&isAllowed=y).  
Bakalářská práce. ČVUT MÚVS.
- [38] Cracked O-320 Case - Best way to proceed? - Page 3. SuperCub.Org - *Any Plane, Any Adventure!* [online]. Copyright © 2021 vBulletin Solutions, Inc. All rights reserved. [cit. 27.07.2021]. Dostupné z: <https://www.supercub.org/forum/showthread.php?53815-Cracked-O-320-Case-Best-way-to-proceed/page3>

- [39] Cast Iron Repair Engine Applications - Turlock, CA - LOCK-N-STITCH Inc.. *301 Moved Permanently* [online]. Copyright © 2016, [cit. 27.07.2021]. Dostupné z: <http://www.locknstitch.com/engines-casting-repair-industry.html>
- [40] M137A LOM engine with propeller on 130hours FOR SALE | afors advert No42645. *Aircraft For Sale | Light Aircraft, Microlights, Gliders, Autogyros, Helicopters etc* [online]. Copyright © [cit. 27.07.2021]. Dostupné z: <https://afors.com/aircraftView/42645/M137A-LOM-engine-with-propeller-on-130hours-FOR-SALE>
- [41] VOLTcraft® BS-20 Hand-held endoscope with 6.1 cm (2.4 inch) display, transfer cable and carry case | Conrad.com. *Conrad Electronic » Your Sourcing Platform* [online]. Copyright © Conrad Electronic International GmbH [cit. 27.07.2021]. Dostupné z: <https://www.conrad.com/p/voltcraft-bs-20-hand-held-endoscope-with-61-cm-24-inch-display-transfer-cable-and-carry-case-122249>
- [42] LIVARNOLUX® *Kapesní LED svítlna s powerbankou - Lidl-Shop.cz. Lidl-shop.cz | Vždy.Více.Online.* [online]. Dostupné z: <https://www.lidl-shop.cz/p/livarnolux-kapesni-led-svitlna-s-powerbankou/p100321864>
- [43] RICHMANN. *Teleskopické inspekční zrcátko* [online]. Dostupné z: <http://www.perfecta-zelezarstvi.cz/x247539/teleskopicke-inspekcní-zrcatko>
- [44] LOM PRAHA. *Technický popis a návod k obsluze motoru* [online]. Copyright © [cit. 27.07.2021]. Dostupné z: <https://pistovemotory.s8.cdn-upgates.com/y/y5b0d108796da9-technicky-popis-a-navod-k-obsluze-motoru-rev02-2018-05.pdf>
- [45] *Sada závitníků M4* [online]. Dostupné z: [https://cdn.myshoptet.com/usr/www.promistry.cz/user/shop/big/78262-1\\_zavitnik-m4-sada-3-ks-vorel-to-24310.jpg?5e68580d](https://cdn.myshoptet.com/usr/www.promistry.cz/user/shop/big/78262-1_zavitnik-m4-sada-3-ks-vorel-to-24310.jpg?5e68580d)
- [46] Fréza technická HM, kuželová, malá 444800 SKM0307 (RG4400). *BO-IMPORT s.r.o.* [online]. Dostupné z: <https://www.bo-import.cz/freza-technicka-hm-kuzelova-mala-444800-skm0307-rg4400-p13104/>
- [47] BOHM, Jaroslav. *Konstruktér LOM Praha - Informace k bakalářské práci* [elektronická pošta]. Message to [denniszdenek.strnad@fs.cvut.cz](mailto:denniszdenek.strnad@fs.cvut.cz) 25.11.2020 [cit. 27.07.2021]
- [48] Vlastní fotografie

## SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obrázek 1: Kliková skříň řadového motoru M-337A [29]
- Obrázek 2: Kliková skříň ležatého motoru Lycoming [30]
- Obrázek 3: Prostupový diagram chladícího vzduchu kapotami letounu Z-226MS [31]
- Obrázek 4: Únik oleje z motorového prostoru letounu
- Obrázek 5: Popis motoru M-337A [32]
- Obrázek 6: Prasklina v odlitku klikové skříně motoru M-137
- Obrázek 7: Dvojitá prasklina v odlitku klikové skříně motoru M-137
- Obrázek 8: Podrobný přehled motoru M-137 z 3D modelu
- Obrázek 9: Odlitek klikové skříně motoru M-137
- Obrázek 10: Válec motoru M-137, snímek z 3D modelu
- Obrázek 11: Hlava motoru M-137, snímek z 3D modelu
- Obrázek 12: Ojnice motoru M-137, snímek z 3D modelu
- Obrázek 13: Kliková a vačková hřídel motoru M-137, snímek z 3D modelu
- Obrázek 14: Ventily motoru M-137, snímek z 3D modelu
- Obrázek 15: Svorník motoru M-137, snímek z 3D modelu
- Obrázek 16: Přehled typů růstu prasklin [12]
- Obrázek 17: Pole napětí v blízkosti trhlin [33]
- Obrázek 18: Pole plastické a elastické zóny v blízkosti trhlin [10]
- Obrázek 19: Prasklina klikové skříně motoru typu Lycoming [34]
- Obrázek 20: Oblasti plastické a elastické v blízkosti trhliny [12]
- Obrázek 18: Pole plastické a elastické zóny v blízkosti trhlin [10]
- Obrázek 21: Motor Lycoming thunderbolt [35]
- Obrázek 22: Průřez svarem typu „V“ [36]
- Obrázek 23: Postup provedení kapilární zkoušky [37]



Obrázek 24: Kapilární zkouška provedená na klikové skříni motoru Lycoming [38]

Obrázek 25: Proces Metal lock [19]

Obrázek 26: Proces metal stitch [19]

Obrázek 27: Pin typu C [19]

Obrázek 28: Pin typu L [19]

Obrázek 29: Aplikace metody lock and stitch [39]

Obrázek 30: Produkt FiberLock [20]

Obrázek 31: Postup opravy zmetkového odlitku [21]

Obrázek 32: Oprava poškozeného lodního šroubu vlivem kavitace

Obrázek 33: Logo LOM Praha

Obrázek 34: Kliková skříň motoru M-337

Obrázek 35: Letoun Z-226MS

Obrázek 36: Poloha defektu motoru M-137 [40]

Obrázek 37: Boroskopická kamera [41]

Obrázek 38: Ruční svítilna [42]

Obrázek 39: Inspekční zrcátko [43]

Obrázek 40: Číslování postupu během analýzy klikové skříně [44]

Obrázek 41: Svírání svorníků za účelem odhalení defektů

Obrázek 42: Odhalená prasklina klikové skříně

Obrázek 43: Prasklina v dutině klikové skříně

Obrázek 44: Průběh inspekce pomocí boroskopu

Obrázek 45: Lokalita praskliny znázorněna v rozkladu motoru ve třech bodech, snímek z 3D modelu motoru M-337

Obrázek 46: Detailní pohled místa výskytu praskliny s 90° řezem, snímek z 3D modelu motoru M-337

Obrázek 47: Detailní pohled dvojité praskliny válce č. 3, svorníku č. 4

Obrázek 48: Detailní pohled boční praskliny válce č. 3, svorníku č. 4



Obrázek 49: Detailní pohled praskliny válce č.6, svorníku č. 2

Obrázek 50: Snímky z výsledků napětového zatížení provozních hodnot klikové skříně

Obrázek 51: Logo Diamant-service

Obrázek 52: Balení materiálu Plastic Metal Alu Superior Pulver (0008)

Obrázek 53: Materiál Plastic Metal Alu Superior Pulver (0008)

Obrázek 54: Tvrdidlo

Obrázek 55: Namíchaná směs Metal-plastic materiálu

Obrázek 56: Přípravek pro demontáž svorníků

Obrázek 57: Demontáž svorníku z klikové skříně

Obrázek 58: Zárohová akumulátorová vrtačka Makita

Obrázek 59: Vrták Ø 3.5 mm

Obrázek 60: Proces odvrtávání praskliny klikové skříně

Obrázek 61: Proces odvrtávání praskliny klikové skříně

Obrázek 62: Sada závitníků M4 [45]

Obrázek 63: Snímek vyříznutých závitů

Obrázek 64: Technická fréza HM, Kuželová [46]

Obrázek 65: Vyfrézovaná drážka se závity

Obrázek 67: Postup přípravy materiálu Metal-plastic

Obrázek 68: Aplikace materiálu Metal-plastic gravitačním litím

Obrázek 69: Vyplněná dutina materiálem Metal-plastic

Obrázek 70: Fotografie vyplněných drážek materiálem Metal-plastic

Obrázek 71: Kapilární zkouška – nanesení indikační látky

Obrázek 72: Kapilární zkouška – nanesení detekční látky

Obrázek 73: Stop-drilling koncové části praskliny

Obrázek 74: Frézování „V“ drážky praskliny

Obrázek 75: Vyplněná drážka praskliny Metal-plastic materiálem

Obrázek 76: Závitník M10x1.25

Obrázek 77: Technická dokumentace svorníku [47]

Obrázek 78: Sestava vrtačky a stojanu pro vrtání svorníkových otvorů

Obrázek 79: Řezání závitu pomocí závitníku M10x1.25

Obrázek 80: Postup záběhumotoru M-137/M-337 [44]

Obrázek 81: Foto letounu během motorové zátěžové zkoušky

Obrázky 82: postup demontáže hlav a válců za účelem kontroly stavu oprav