

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

PÍST ČTYŘDOBÉHO ZÁŽEHOVÉHO LETECKÉHO MOTORU

PISTON OF 4-STORKE SI-ENGINE FOR AIRPLANE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAN GABRLÍK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. DAVID SVÍDA

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jan Gabrlík

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Píst čtyřdobého zážehového leteckého motoru

v anglickém jazyce:

Piston of 4-stroke SI-engine for airplane

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Pro dané základní provozní parametry motoru, navrhnete základní rozměry pístní skupiny a klikového ústrojí. Pro zadaný průběh indikátorového diagramu a zadaný provozní režim provedte pevnostní kontrolu kritických průřezů pístu.

Cíle bakalářské práce:

1. Vypracujte návrh základních rozměrů motoru.
2. Zpracujte návrh základních rozměrů klikového mechanismu.
3. Na základě empirických údajů vypracujte návrh základních rozměrů pístu a provedte pevnostní kontrolu kritických průřezů pístu.

Seznam odborné literatury:

- [1] Rauscher, J.: Ročníkový projekt. Brno, FS VUT 1996
- [2] Rauscher, J.: Vozidlové motory. Brno, FS VUT, Studijní opory
- [3] Kožoušek J.: Výpočet a konstrukce spalovacích motorů II. Praha, SNTL 19

Vedoucí bakalářské práce: Ing. David Svída

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/2009.

V Brně, dne 11.11.2008

L.S.

prof. Ing. Václav Pištěk, DrSc.
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

Prohlášení o autorství

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem pístu čtyřdobého zážehového leteckého motoru. Cílem práce je stanovit základní rozměry pístu, motoru a klikového mechanismu.

Práce se také zabývá pevnostní kontrolou kritických průřezů pístu.

Klíčová slova: Píst, letecký motor, Allison, Rolls-Royce, Daimler-Benz

Annotation

This bachelor's work deals with proposal piston of 4-stroke si-engine for airplane. Aim of work is too determine basic dimensions of piston, motor and crank mechanism.

Work deals with strenght calculation of critical piston section too.

Key words: Piston, aircraft motor, Allison, Rolls-Royce, Daimler-Benz

Bibliografická citace mé práce:

GABRLÍK, J. *Píst čtyřdobého zážehového leteckého motoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 31 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. David Svída.

Obsah

1. Konstrukce leteckých motorů	2
1.1 Hvězdicový motor	2
1.2 Rotační motor	3
1.3 Řadový motor	4
2. Přepřínované řadové letecké motory 30. a 40. let 20. století	5
2.1 Allison V-171	5
2.2 Rolls-Royce Merlin	9
2.3 Daimler-Benz DB 601	12
3. Vlastní výpočet pístu	15
3.1 Hlavní rozměry motoru	15
3.1.1 Zdvihový objem jednoho válce motoru V_Z	15
3.1.2 Střední efektivní tlak p_e	15
3.1.3 Litrový výkon motoru P_l	15
3.1.4 Zdvihový poměr k	16
3.1.5 Velikost střední pístové rychlosti c_s	16
3.2 Hlavní rozměry pístu	16
3.2.1 Rozměry konstrukčních prvků pístu	17
3.2.1.1 Výška pístu H_p	17
3.2.1.2 Kompresní výška pístu H_k	17
3.2.1.3 Vzdálenost mezi nálitky pro pístní čep H_o	17
3.2.1.4 Výška pláště pístu H_{pl}	17
3.2.1.5 Výška prvního můstku H_{m1}	17
3.2.1.6 Výška druhého můstku H_{m2}	17
3.2.1.7 Výška ostatních můstků H_m	17
3.2.1.8 Vzdálenost mezi pístními kroužky $H_{\check{c}}$	17
3.2.1.9 Průměr pístního čepu $D_{\check{c}}$	17
3.2.1.10 Tloušťka dna pístu δ	17
3.2.2 Drážky pro pístní kroužky	18
3.2.2.1 Radiální vůle	18
3.2.2.2 Axiální vůle	18
3.3 Pevnostní výpočet pístu	20
3.3.1 Pevnostní výpočet dna pístu	20
3.3.1.1 Maximální tlak plynů ve válci p_{max}	20
3.3.1.2 Maximální síla tlaku plynů F_{pmax}	21
3.3.1.3 Maximální ohybový moment M_{omax}	21
3.3.1.4 Moment odporu v ohybu W_o	21
3.3.1.5 Maximální ohybové napětí σ_o	22
3.3.1.6 Max.ohyb. nap. ve středu desky pro podepřenou desku σ_{oMax}	22
3.3.2 Nejslabší místo pláště pístu	22
3.3.2.1 Maximální síla od tlaku plynů F_{pMax}	22
3.3.2.2 Min. příčný průřez pístu v drážce pro stírací pístní kroužek S_x	22
3.3.2.3 Namáhání vyvolané tlakem plynů $\sigma_{tl max}$	23
3.3.2.4 Setrvačná síla $F_{sp,x}$	23
3.3.2.5 Tahové napětí ve vyšetřovaném průřezu σ_t	24
3.3.3 Měrný tlak na plášť pístu	24
3.3.4 Můstek mezi prvním a druhým těsnícím kroužkem	24
3.3.4.1 Výsledný silový účinek na můstek F_m	25
4. Závěr	26
5. Model pístu dle návrhu	27
6. Seznam použitých symbolů	29
7. Seznam použité literatury	30

1.Konstrukce leteckých motorů

Pístové letecké motory můžeme podle jejich konstrukce rozdělit do tří základních skupin. A to na motory hvězdicové, hvězdicové rotační a řadové.

1.1 Hvězdicový motor

Jde o pístový spalovací motor s nejméně třemi válci paprskovitě uspořádanými kolem klikového hřídele v jedné nebo více za sebou uspořádaných rovinách kolmých k ose hřídele. Hvězdicové motory jsou vybaveny ventilovým rozvodem typu OHV, kdy jsou šoupátka ventilů ovládána vačkami, umístěnými na excentru pohybujícím se proti směru rotace klikového hřídele. Chlazení je zajištěno vzduchem proudícím okolo válců.

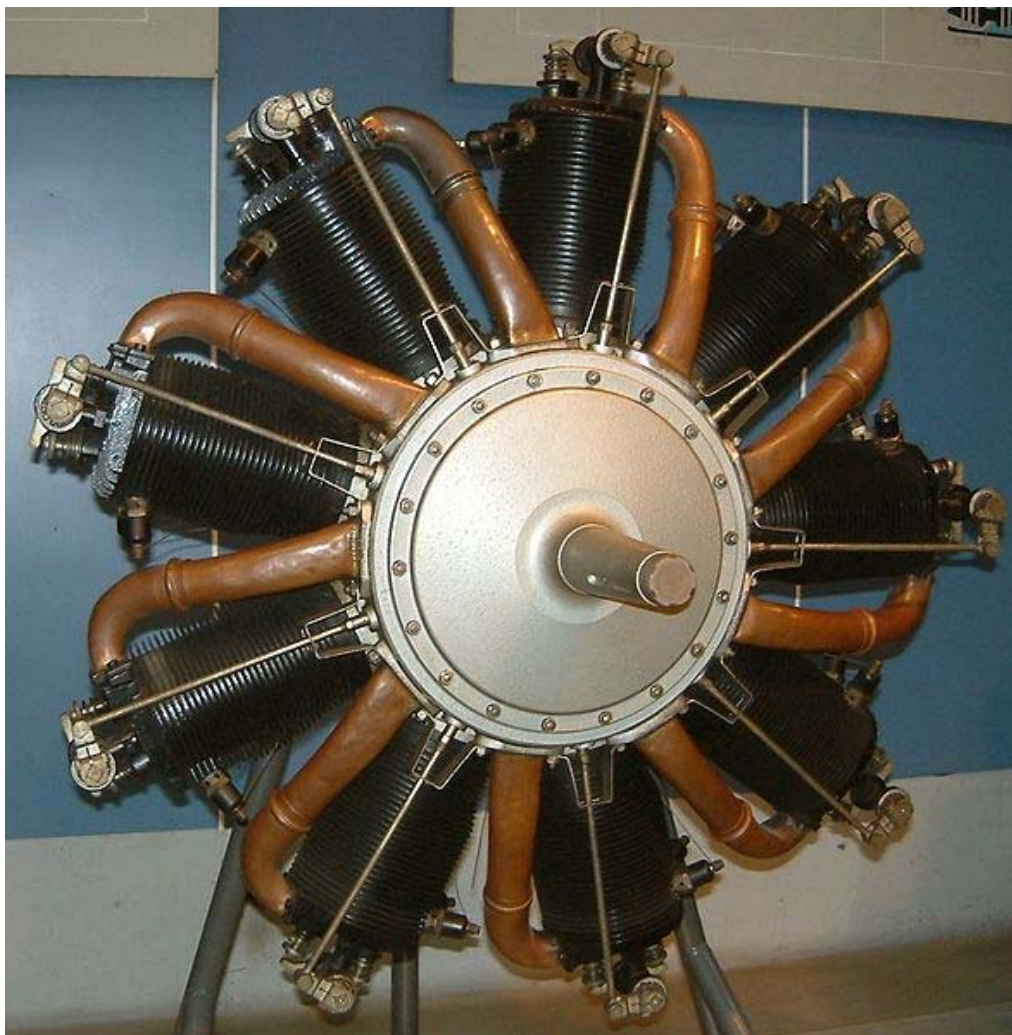
První hvězdicový motor vynalezl Charles Manly v roce 1901. Jednalo se o pětiválec o výkonu 52 koňských sil. Dvuhvězdicový motor se objevil v Německu před první světovou válkou. Tato koncepce se však prosadila až v meziválečném období. Během druhé světové války se dvou a více hvězdicové motory používaly nejen k pohonu rozličných typů letadel všech zainteresovaných stran, ale například i amerických tanků typu Sherman. (lit. [16], [17])



Obr. 1 Hvězdicový motor Pratt & Whitney Twin Wasp R-2800 [1]

1.2 Rotační motor

Jedná se o hvězdicový motor, jehož klikový hřídel je pevně uchycen do draku letounu. Kliková skříň i s věncem válců okolo hřídele rotuje současně s vrtulí. Tento systém byl oblíbený již od prvních let letectví hlavně pro svou nízkou hmotnost a jednoduché chlazení vzduchem. Největší výhodou tohoto uspořádání bylo, že se celý motor choval jako setrvačnick, a tím „uhlazoval“ svůj chod a snižoval vibrace. Vibrace představovaly v té době vážný problém u všech leteckých motorů, pro jejich snížení se k motorům musely přidávat těžké setrvačníky.



Obr. 2 Francouzský rotační motor Le Rhône 9C [2]

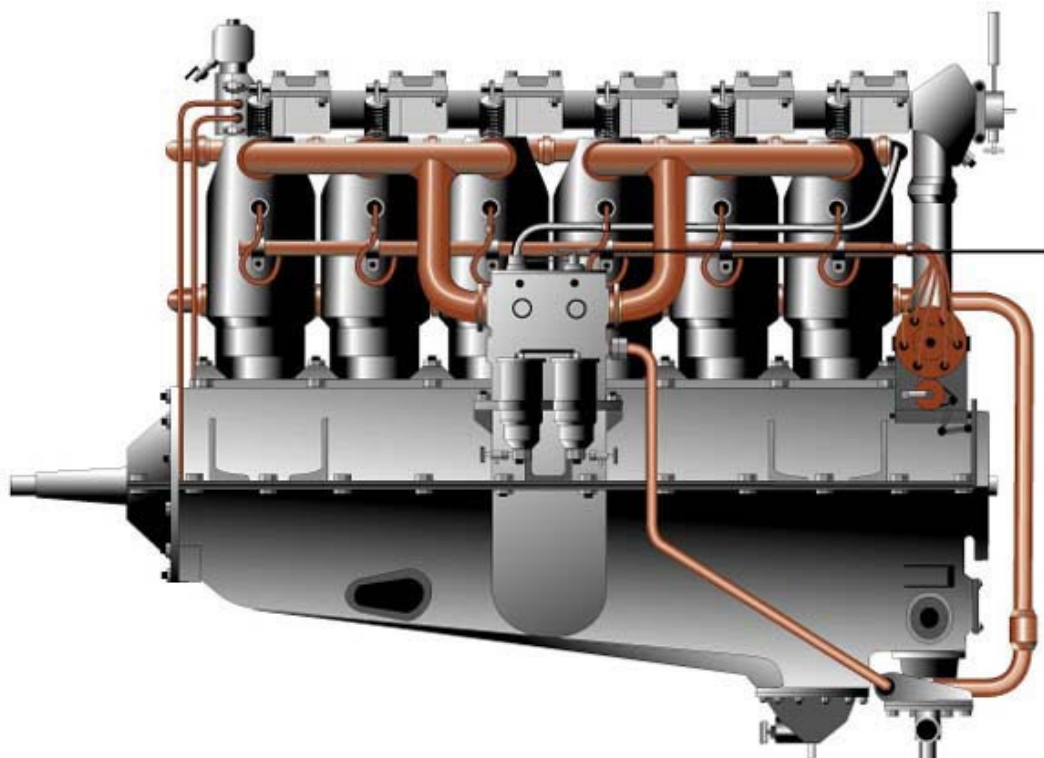
Při neustálé snaze zvyšovat výkon se začaly objevovat problémy. S zvyšujícím se výkonem rostla i hmotnost motoru, a tím pádem i gyroskopický moment, který způsoboval potíže s chvěním a nestabilitou celého stroje. Ke konci 1. světové války se objevilo řešení, které gyroskopický moment snížilo. Vrtule se otáčela na opačnou stranu než motor, bohužel tento systém byl nespolehlivý a poruchový. Další nevýhodou rotačních motorů byla jejich vysoká spotřeba paliva ve srovnání s konkurenčními koncepcemi. To také výrazně přispělo k jejich ústupu modernějším, ekonomičtějším konstrukcím po první světové válce. (lit. [2], [18])



Obr. 3 Použití rotačního motoru k pohonu německého závodního motocyklu Megola vyráběného ve 20. letech [2]

1.3 Řadový motor

V automobilovém průmyslu se takto označují pouze motory jejichž válce jsou umístěny v jedné řadě. Oproti tomu v letectví se takto označují všechny pístové motory, které nejsou hvězdicové. Základní vývojovou řadu leteckých řadových motorů představují motory s kapalinovým chlazením. Chladícím médiem byla nejprve voda, až mnohem později se začal používat glykol. Typickou podobu takového motoru představoval jednořadý šestiválec, který upřednostňovali hlavně Němci a Rakušané.



Obr. 4 Německý řadový šestiválec Mercedes D.IIIa [3]

Tyto motory byly výkonné a spolehlivé, ale stejně jako motory rotační byly v roce 1918 na hranici svých možností. Zvyšování počtu válců v jedné řadě bylo sice možné, ale motory byly příliš rozměrné a těžké, pro stíhací letadla prakticky nepoužitelné. Také chladicí systém těchto motorů byl citlivý na poškození v boji a pro svůj většinou krabicovitý tvar zhoršoval i aerodynamické vlastnosti stíhacích strojů. Celkově také vycházela letadla s řadovými motory podstatně těžší než s motory hvězdicovými. Revoluční řešení představoval motor švýcarského konstruktéra usazeného ve Španělsku Marca Birkigta. Šlo o osmiválec Hispano Suiza, který měl dvě řady válců po čtyřech uspořádaných do „V” a i s převody byl umístěn do společného odlévaného hliníkového bloku.



Obr. 5 Letecký motor Hispano-Suiza 8 [4]

Nejvýkonnější motory představovaly v době první světové války i v poválečném období motory víceřadé. Právě možnost neustálého zvyšování výkonu řadových motorů nakonec vedla k vytlačení motorů rotačních. Vrcholem vývoje řadových leteckých motorů jsou motory přeplňované. Na vývoji kompresorových motorů se začalo pracovat již v roce 1915. Plného rozvoje a úspěchu bylo dosaženo až po první světové válce v USA v roce 1919. Hlavním důvodem pro zavedení kompresorových motorů byl pokles výkonu atmosferických (nepřeplňovaných) motorů se zvyšující se nadmořskou výškou. (lit. [18], [19])

2. Přepřítované řadové letecké motory 30. a 40. let 20. století

Během tohoto období došlo k podstatnému navýšení výkonu leteckých motorů. Zatímco v roce 1939 se výkon stíhacího letounu pohyboval okolo 1000 hp, na konci druhé světové války to již byly 3000 hp.

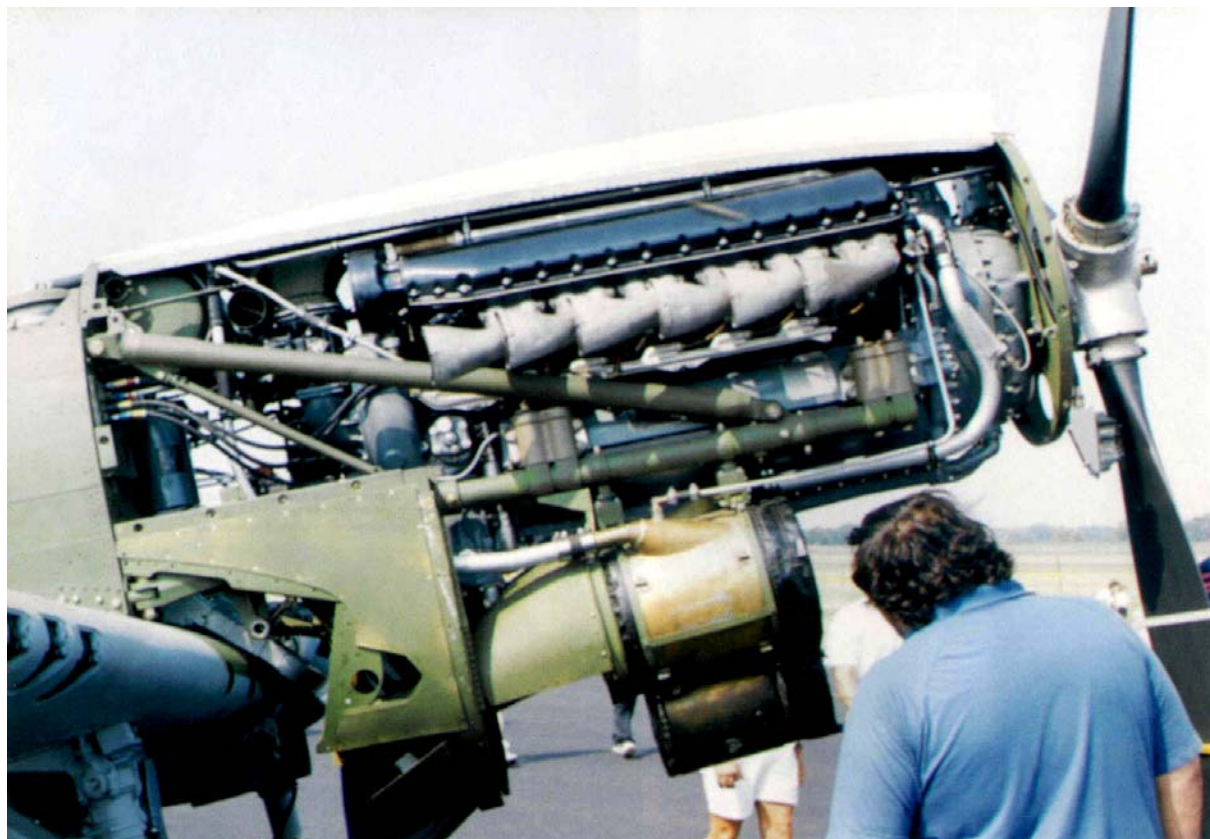
2.1 Allison V-1710

Jedná se o letecký motor vyráběný americkou společností Allison před a během druhé světové války. Vznik motoru byl ovšem poměrně komplikovaný a dlouhý. Jeho vývoj byl zahájen už v květnu roku 1929, ale poměrně dlouho trvalo odstraňování „dětských nemocí“ konstrukce. Oficiální homologace motoru při výkonu 1000 koní byla provedena až v roce 1937.



Obr. 6 Motor Allison V-1710 připojený na dynamometr [5]

Tento stav byl do značné míry zapříčiněn právě probíhající hospodářskou krizí. Vývoj probíhal na několika málo prototypích, které byly postupně upravovány na základě dat získaných při zkouškách na brzdě a později na létající zkušebně. První prototyp motoru byl dokončen v srpnu 1931. Prvními skutečně významnými verzemi byla až řada „Series C“, z nichž první se rozběhl na brzdě v roce 1935. Šlo o první motory V-1710, které se dostaly na výkon 1000 hp. Během března a dubna 1937 přepracovaný motor V-1710-C8 konečně úspěšně prošel úřední 150-ti hodinovou homologační zkouškou. Předchozí test motoru V-1710-C6 skončil poruchou po 141 hodinách chodu na zkušebně. První opravdu významnou sériovou verzí byl až V-1710-33 (V-1710-C15), který poháněl první verze stíhačky Curtiss P-40 .



Obr. 7 Zástavba motoru Allison do draku letounu Curtiss P-40 E [6]

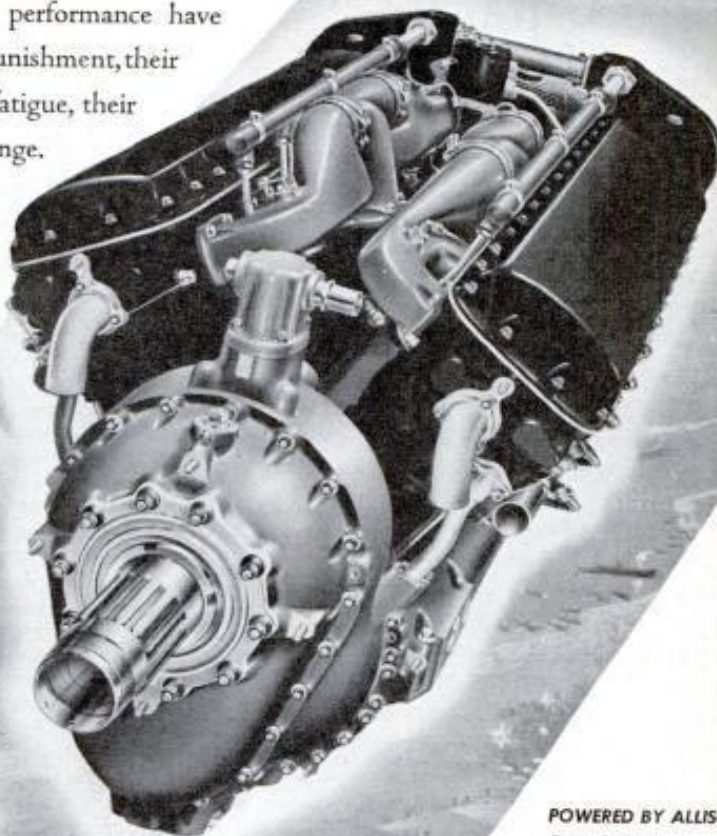
Nesrovnatelně větší praktický přínos, než motory „Series C“, měly teprve motory „Series F“. Tyto mj. ve verzích V-1710-39 a -81 poháněly stíhací letouny Curtiss P-40 a první verze typu North American P-51 Mustang. Ve verzích V-1710-89/-91 a -111/-113 stíhací letouny Lockheed P-38. Další významné verze byly pozdější „Series E“ pohánějící stíhačky Bell P-39 Airacobra a P-63 Kingcobra.

Ve srovnání se svými soupeřícími, například slavný Rolls-Royce Merlin, byl motor Allison hendikepován horšími výkony ve velkých výškách. Prvními verzemi s dvoustupňovým kompresorem, který výrazně zlepšil výkony motorů V-1710 ve velkých výškách, byly až V-1710-47 a V-1710-93 (E9 a E11), které poháněly stíhačky P-63 Kingcobra. Zůstává skutečností, že s pozdějšími verzemi motoru Rolls-Royce Merlin byly skutečně srovnatelné jen za války v prototypch postavené verze V-1710-121 a V-1710-119 z letounů Curtiss XP-40Q a North American XP-51J. Popř. ještě v nevelkém počtu postavené motory V-1710-109. Motory Allison během druhé světové války prokázaly svou spolehlivost nejen ve vlhkém klimatu džunglí Jihovýchodní Asie a Pacifiku, ale i prašných pouštích severní Afriky a nad zamrzlými stepmi Sovětského Svazu. (lit. [20])

WORTHY WEAPON

America's fighter pilots using Allison-powered planes are downing the enemy on every battle front. ★ Allison engines by superb performance have proved their ability to take punishment, their smoothness to lessen pilot fatigue, their economy to provide long range.

★ These engines—worthy weapons today—will contribute to the comfort and safety of the planes you will ride in tomorrow.



POWERED BY ALLISON:

P-38—Lightning
P-39—Airacobra
P-40—Warhawk
A-36 and P-51A—Mustang

More than 50,000 Allison engines have been built for the above planes of the U. S. Army Air Forces.

**BUY WAR BONDS
DO MORE THAN BEFORE**

LIQUID-COOLED AIRCRAFT ENGINES

Allison

DIVISION OF

Indianapolis, Indiana



Every Sunday Afternoon

GENERAL MOTORS SYMPHONY OF THE AIR—NBC Network

JULY, 1944

Buy War Savings Bonds and Stamps Regularly.

201

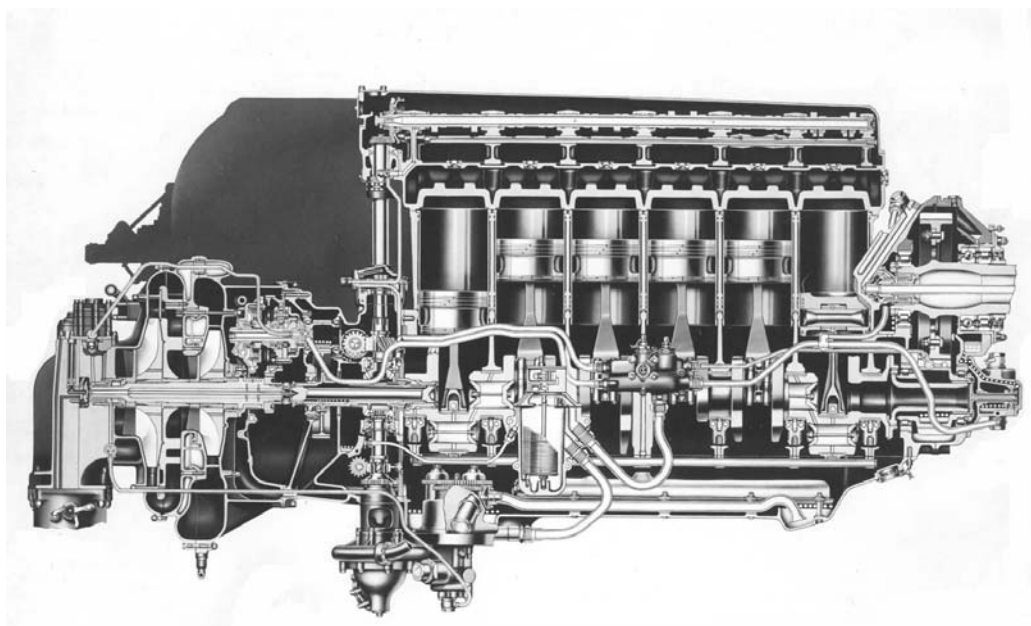
Obr. 8 Dobová reklama firmy Allison [7]

Specifikace motoru Allison V-1710-73

- **Typ:** pístový letecký motor, čtyřdobý zážehový kapalinou chlazený přeplňovaný vidlicový dvanáctiválec (bloky válců svírají úhel 60 stupňů), vybavený reduktorem
- **Vrtání válce:** 5½ palce (139,7 mm)
- **Zdvih pístu:** 6 palců (152,4 mm)
- **Zdvihový objem motoru:** 28,031 litru
- **Kompresní poměr:** 6,65 (s výjimkou několika prototypů a motorů „series G“)
- **Rozvod:** OHC, čtyřventilový (dva sací a dva výfukové ventily, výfukové jsou chlazeny sodíkem)
- **Zapalování:** zdvojené, magnety
- **Mazání motoru** se suchou klikovou skříní
- **Výkony:**
 - vzletový 1325 hp (988 kW) při 3000 ot/min. a plnicím tlaku 51,0 in Hg (1727 mbar/hPa)
 - nominální 1150 hp (857,5 kW) v 3658 m, při 3000 ot/min. a plnicím tlaku 42,0 in Hg (1422 mbar/hPa)
 - bojový 1580 hp (1178,2 kW) v 762 m, při 3000 ot/min. a plnicím tlaku 60,0 in Hg (2032 mbar/hPa)
- **Kompresor:** odstředivý jednostupňový jednorychlostní, poháněný převodem od klikového hřídele
- **Karburátor:** PD-12K2
- **Hmotnost suchého motoru** (bez provozních náplní): 610,1 kg

2.2 Rolls-Royce Merlin

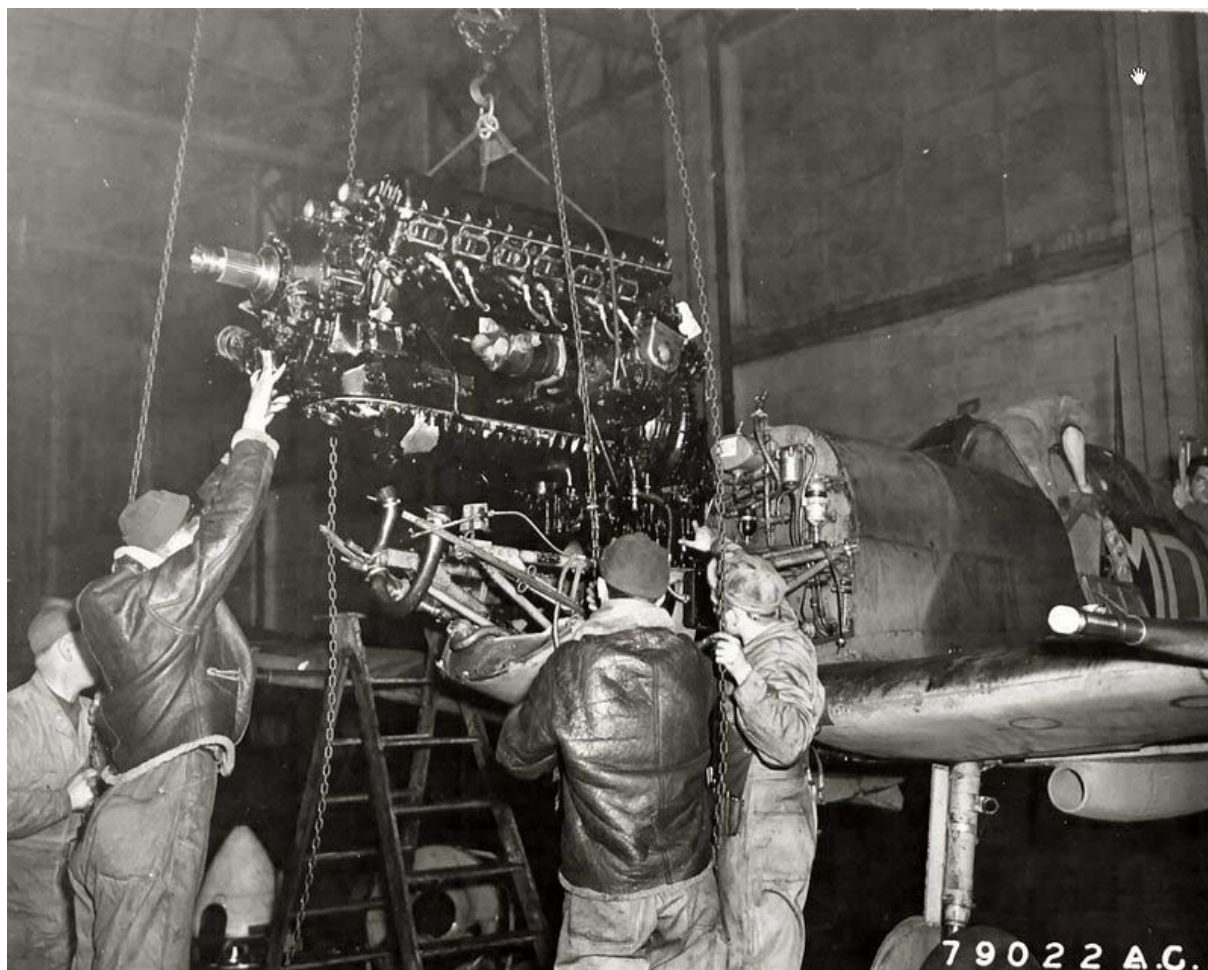
První prototyp britského motoru Rolls-Royce Merlin se poprvé rozběhl 15. října 1933 jako PV-12. Byl pokračováním vývoje, který firma Rolls-Royce zahájila počátkem 30. let. PV-12 byl vyvíjen zcela ve vlastní režii firmy, bez jakéhokoliv zájmu oficiálních míst, což mohlo pro firmu znamenat finanční ztrátu.



Obr. 9 Průřez motorem Merlin [22]

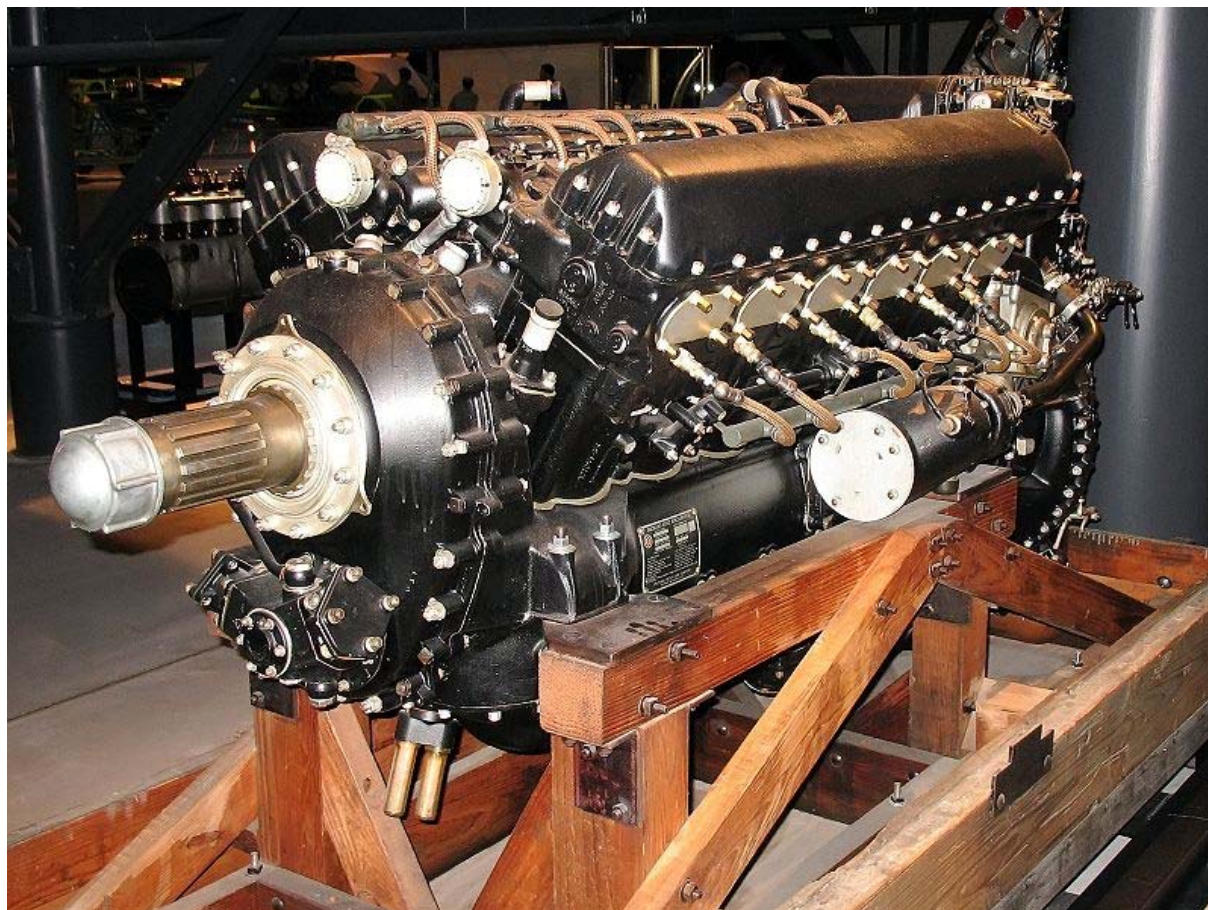
První let absolvoval PV-12 zabudován do dvouplošníku Hawker Hart. Stalo se tak 21. února 1935. Byl vybaven odpařovacím chlazením, které bylo v této době módní, avšak dosti nespolehlivé. Když se naskytla možnost dodávek ethylen-glykolu ze Spojených Států, byl motor upraven na chlazení kapalinou a prošel testy na zkušebním stavu po předepsanou dobu sta hodin.

V roce 1935 vydalo ministerstvo letectví směrnici F.10/35 požadující nový stíhací letoun dosahující minimální rychlosti 499 km.h^{-1} . Byly vyvinuty dvě konstrukce a to Hawker Hurricane a Supermarine Spitfire, který byl navržen podle směrnice F.37/34 prikazující použití motoru PV-12. Smlouvy o dodávce letounů byly podepsány v roce 1936. Motor PV-12 dostal nejvyšší prioritu a byl pojmenován Merlin.



Obr. 10 Američtí mechanici během demontáže motoru Merlin ze Spitfiru Mk.V [8]

Rané verze se ovšem potýkaly s technickými potížemi, jako selhání převodových soukolí nebo neustálé problémy s pláštěm chladiče. Firma Rolls-Royce však brzy zavedla ojedinělý program na zlepšení kvality. Náhodně vybrané motory byly zpuštěny na plný výkon až do doby, než se porouchaly. Poté byly rozmontovány. Poškozená část, která havárii způsobila, byla přepracována, aby byla odolnější. Po dvou letech od zahájení programu motor Merlin „vyspěl“ a stal se jedním z nespolehlivějších leteckých motorů své doby. Mohl běžet i osm hodin na plný výkon bez sebemenších problémů.



Obr. 11 Americký licenční motor Packard V-1650 [9]

Motor Merlin byl považován za natolik důležitý pro válečné úsilí, že brzy začala jednání o licenční výrobě mimo Spojené království. Firma Rolls-Royce prověřila mnoho automobilek v Kanadě a Spojených státech, aby vybrala jednu, která bude Merlin vyrábět. Nakonec byla vybrána firma Packard Motor Car Company, která Rolls-Royce zaujala svou vysokou kvalitou výroby. Licenční smlouva byla podepsána v září 1940 a první motor postavený firmou Packard se rozběhl v srpnu 1941.

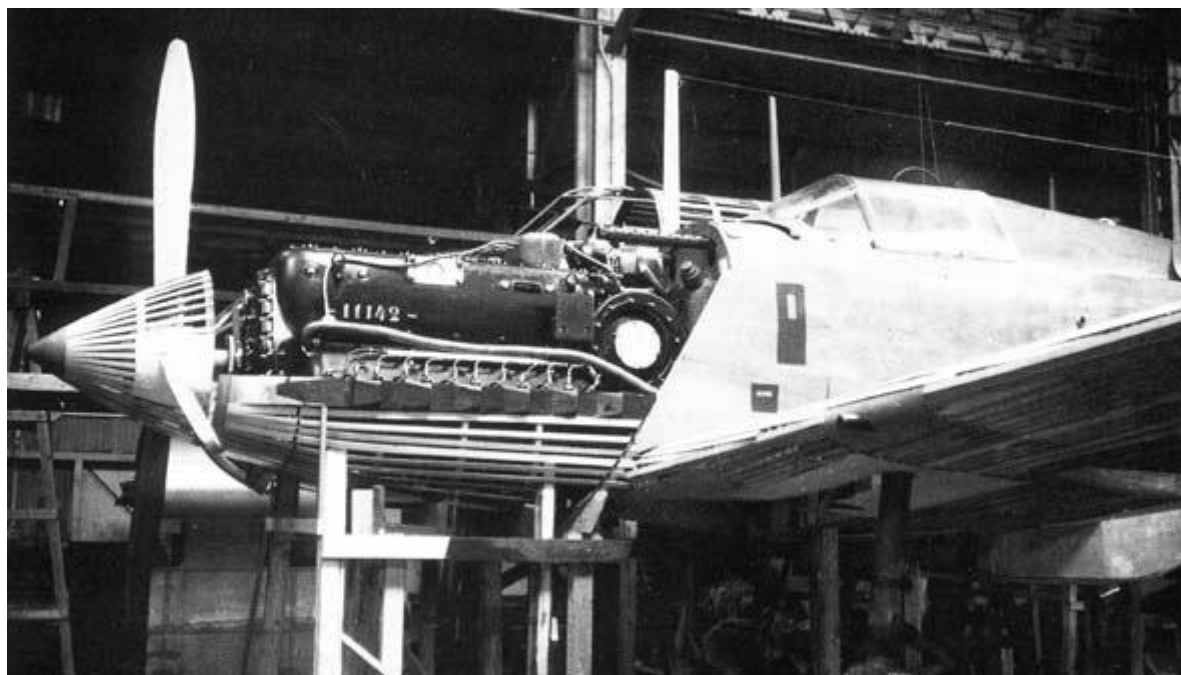
Snad jedinou nevýhodou motoru Merlin byla absence přímého vstřikování paliva. Tento nedostatek omezoval britské stíhače zvláště při střemhlavém letu a prudkých obrazech, kdy vlivem záporného „g“ docházelo k vysátí paliva z karburátoru. Bylo totiž spočítáno, že motor vybavený karburátorem podá větší specifický výstupní výkon při nižší teplotě, tj. vyšší hustotě palivové směsi, než motor s přímým vstřikováním. Problém byl vyřešen až použitím tzv. „otvoru slečny Shillingové“. Jednalo se o membránu v plovákové komoře, která zabraňovala vysátí paliva z karburátoru během prudkého klesání. Tuto inovaci vymyslela v březnu 1941 inženýrka Královské letecké společnosti Beatrice Shillingová. Další inovací bylo v roce 1943 zavedení Bendix-Strombergova tlakového karburátoru, který pod tlakem vstřikoval palivo do dmýchadla. Konečným vylepšením bylo zavedení SU vstřikovacího karburátoru, který pracoval v podstatě jako mechanické vstřikování paliva. (lit. [21], [22])

Specifikace motoru Rolls-Royce Merlin řady RM.8SM

- **Typ:** pístový letecký motor, čtyřdobý zážehový kapalinou chlazený přeplňovaný vidlicový dvanáctiválec (bloky válců svírají úhel 60 stupňů), přeplňovaný odstředivým kompresorem, vybavený reduktorem
- **Vrtání válce:** 5,40 palce (137,16 mm)
- **Zdvih pístu:** 6,00 palce (152,4 mm)
- **Zdvihový objem motoru:** 1648,959 cu.in. (27,021 litru)
- **Celková plocha pístů:** 1773 cm²
- **Kompresní poměr:** 6,00
- **Rozvod OHC,** čtyřventilový (dva sací a dva výfukové ventily, výfukové jsou chlazeny sodíkem)
- **Zapalování** zdvojené, magnety
- **Mazání** motoru tlakové, oběžné, se suchou klikovou skříní
- **Karburátor:** S.U. A.V.T.44/206 (Merlin 61), A.V.T.44/201 nebo A.V.T.44/215
- **Hmotnost suchého motoru:** 746,2 kg (Merlin 63)“
- **Výkony** (Merlin 63):
 - vzletový 1280 hp (954,5 kW) při 3000 ot/min. a plnicím tlaku +12 psi (abs. tlak 1841 hPa)
 - bojový (2. převod kompresoru) 1400 hp (1096,2 kW) ve výšce 4572 m, při 3000 ot/min. a plnicím tlaku +18 psi (abs. tlak 2254 hPa)

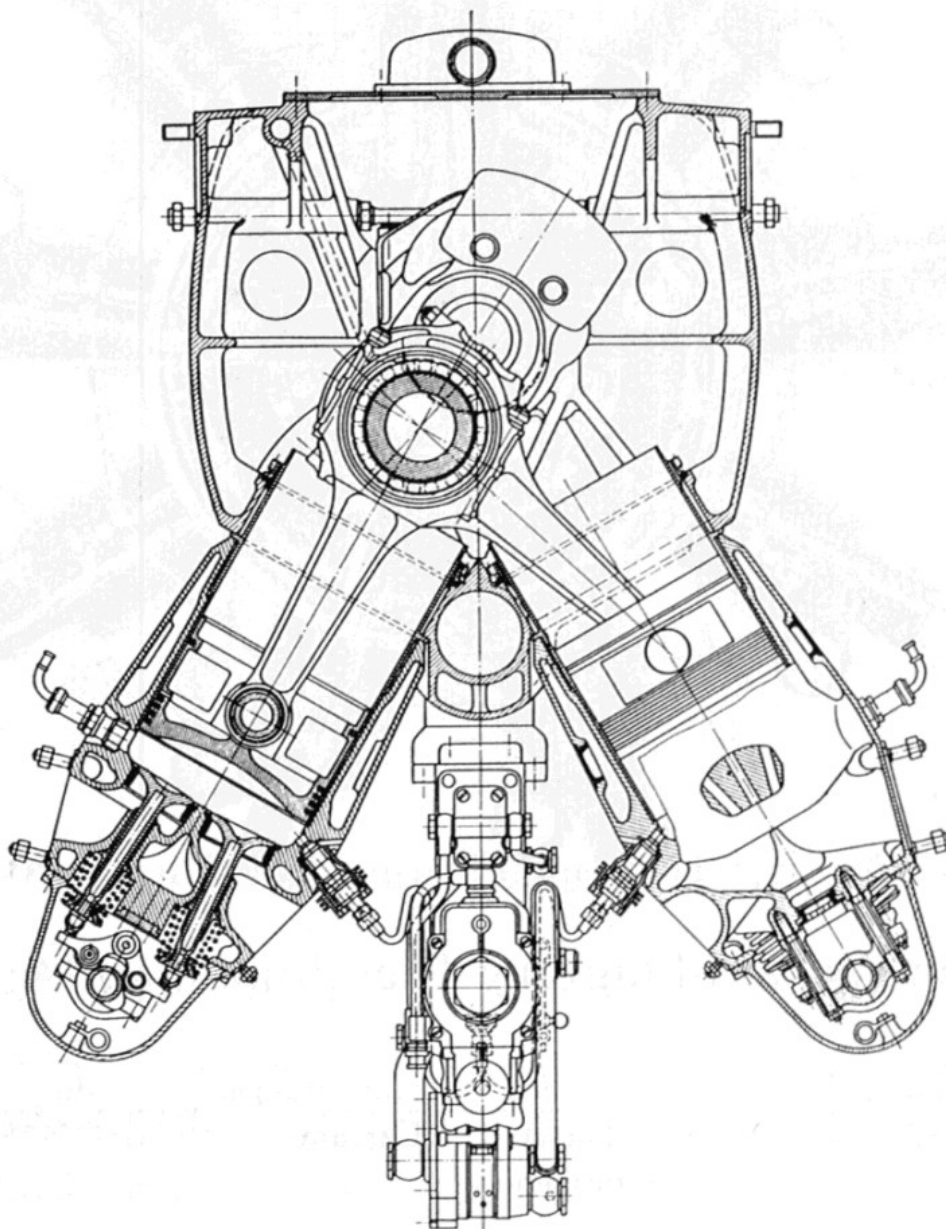
2.3 Daimler-Benz DB 601

Kořeny tohoto motoru německé firmy Daimler-Benz sahají do roku 1932 k motoru DB 600. Byl to kapalinou chlazený 12-ti válcový motor s válci do obráceného V, o objemu 33,9 litru s karburátorem a přeplňovaný kompresorem. Daimler-Benz DB 601 byla modifikace z roku 1934 s vylepšeným kompresorem a přímým vstřikováním paliva.



Obr. 12 Zástavba motoru DB 601 do druku letounu Kawasaki Ki 60, později byly licenční motory Daimler používány k pohonu letounů Kawasaki Ki 61 [10]

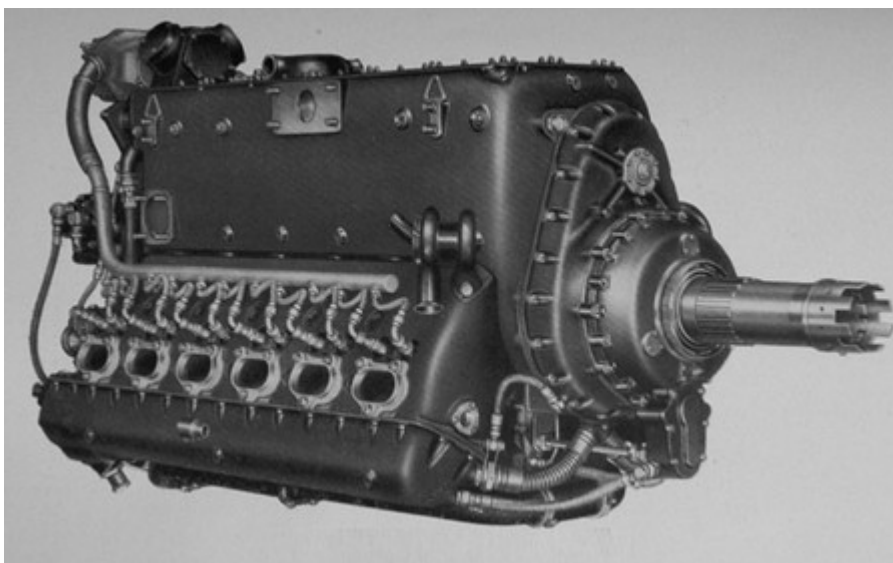
Varianta DB 601N měla kompresor vybavený regulací výkonu pomocí hydraulické spojky. Tato byla ovládána automaticky v závislosti na barometrickém tlaku okolního vzduchu. Na rozdíl od jiných typů kompresorů, které dosahovaly regulace výkonu pomocí převodů, tento systém poskytoval plynulou změnu otáček v závislosti na výšce letu.



Obr. 13 Příčný průřez motorem Daimler-Benz DB 601 [11]

U verze DB 601E došlo k přepracování vstupu vzduchu do kompresoru a k modernizaci samotného kompresoru, který nyní využíval tzv. náporový efekt. Tímto došlo k navýšení výkonu na 1200 hp. Tento motor mohl využít vstřikování GM-1, které do motoru krátkodobě vstříkovalo jako okysličovadlo NO_2 . Přírůstek výkonu byl pozoruhodný (udává se 25 – 30%), ale životnost motoru díky vysoké teplotě spalování a agresivitě dusíku klesla až na řádově 15 hodin. Motory DB 601

byly rovněž licenčně vyráběny v dalších zemích Osy. V Japonsku byl DB 601 vyráběn firmami Aiči a Kawasaki, v Itálii pak firmou Alfa-Romeo.



Obr. 14 Motor DB 601[12]

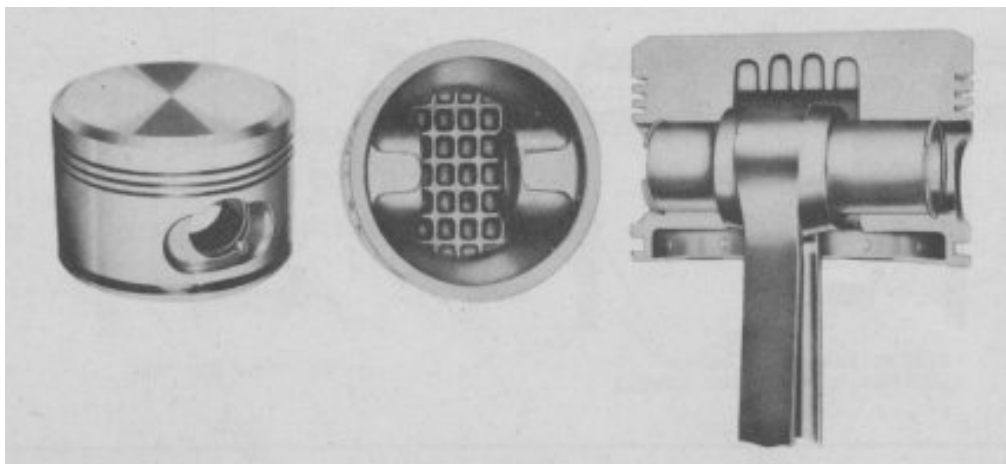
Při srovnání s hlavním „konkurentem“ motorem Merlin firmy Rolls-Royce zvýhodňoval motor Daimler systém přímého vstřikování paliva. Díky tomuto měly letouny vybavené německými motory vyšší akceleraci a dosahovaly vyšších rychlostí při střemhlavém letu a během stoupání, kdy anglické letouny měly potíže s karburátory. (lit. [23], [24])

Specifikace motoru Daimler-Benz DB 601

- **Typ:** Kapalinou chlazený, přeplňovaný, pístový, invertní, letadlový dvanáctiválec do V (60°)
- **Vrtání válce:** 150 mm
- **Zdvih pístu:** 160 mm
- **Zdvihový objem motoru:** 33,9 l
- **Délka:** 1 722 mm
- **Suchá hmotnost:** 590 kg
- **Ventilový rozvod:** Dva sací ventily a dva sodíkem chlazené výfukové ventily na jeden válec, rozvod OHC.
- **Kompresor:** Jednostupňový, jednorychlostní odstředivý kompresor, poháněný přes ozubená kola
- **Mazací soustava:** Suchá kliková skříň s jedním tlakovým a dvěma odsávacími čerpadly
- **Chladicí soustava:** Chlazení kapalinou
- **Výkony:**
 - 1175 hp (865 kW) při 2 500 ot./min. (vzletový výkon)
 - 1070 hp (735 kW) při 2 400 ot./min. (nepřetržitý výkon)
- **Měrný výkon:** 25,5 kW/l
- **Kompresní poměr:** 6,9:1

3. Vlastní výpočet pístu

Jelikož jsem si jako objekt své práce zvolil již existující letecký motor Allison V-1710, Vycházím při výpočtu ze známých popřípadě odvozených hodnot.



Obr. 15 Starší provedení pístu firmy Allison [13]

3.1 Hlavní rozměry motoru

Znamé hodnoty: Vrtání válců motoru: $D = 139,7 \text{ mm}$
Zdvih pístu motoru: $Z = 152,4 \text{ mm}$
Zdvihový objem motoru: $V = 28,031 \text{ l}$
Kompresní poměr motoru: 6,65
Maximální výkon motoru: $P = 1111,1 \text{ kW}$
Otáčky motoru: $n = 3000 \text{ min}^{-1}$
Taktost motoru: $\tau = 0,5$
Počet válců motoru: $i = 12$

3.1.1 Zdvihový objem jednoho válce motoru V_z

$$V_z = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot Z$$
$$V_z = \frac{\pi \cdot 0,1397^2}{4} \cdot 0,1524 \quad (1)$$
$$V_z = 2,336 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

3.1.2 Střední efektivní tlak p_e

$$p_e = \frac{60 \cdot P_e \cdot 1000}{V_z \cdot n \cdot \tau \cdot i}$$
$$p_e = \frac{60 \cdot 1111,1 \cdot 1000}{2,336 \cdot 10^{-3} \cdot 3000 \cdot 0,5 \cdot 12} \quad (2)$$
$$p_e = 1,585 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

3.1.3 Litrový výkon motoru P_l

$$P_l = \frac{P_e}{V_z \cdot 1000 \cdot i}$$

$$P_l = \frac{1111,1}{2,336 \cdot 10^{-3} \cdot 1000 \cdot 12} \quad (3)$$

$$P_l = 39,637 \text{ kW} \cdot l^{-1}$$

3.1.4 Zdvihový poměr k

$$k = \frac{Z}{D}$$

$$k = \frac{152,4}{136,7} \quad (4)$$

$$k = 1,091$$

3.1.5 Velikost střední pístové rychlosti c_s

$$c_s = 2 \cdot \frac{Z}{1000} \cdot \frac{n}{60}$$

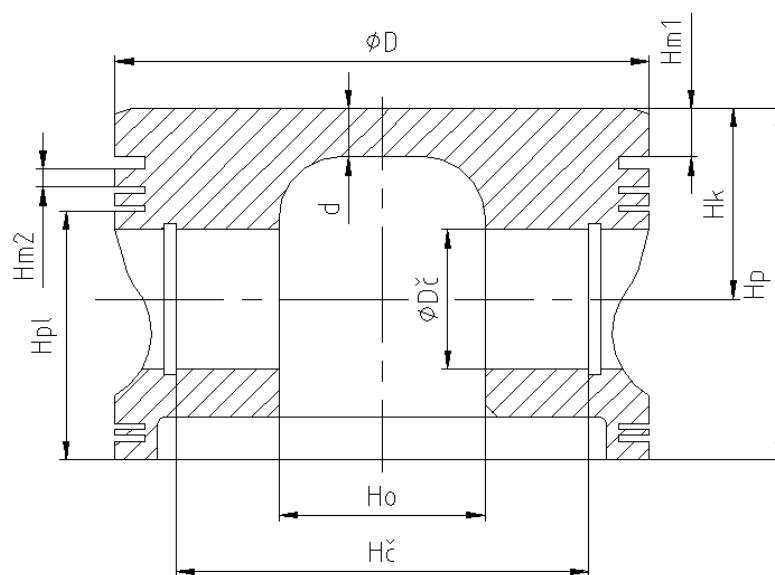
$$c_s = 2 \cdot \frac{152,4}{1000} \cdot \frac{3000}{60} \quad (5)$$

$$c_s = 15,24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Velikost střední pístové rychlosti by u zážehových motorů neměla překročit $19 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, což vypočítaná hodnota splňuje.

3.2 Hlavní rozměry pístu

Při stanovení rozměrů pístu jsem vycházel z vrtání válců motoru a nákresu pístu použitého firmou Allison.



Obr. 16 Hlavní rozměry pístu (novější provedení) firmy Allison [14], [25]

3.2.1 Rozměry konstrukčních prvků pístu

3.2.1.1 Výška pístu H_p

$$H_p = 88,8 \text{ mm}$$

3.2.1.2 Kompresní výška pístu H_k

$$H_k = 60 \text{ mm}$$

3.2.1.3 Vzdálenost mezi nálitky pro pístní čep H_o

$$H_o = 50,4 \text{ mm}$$

3.2.1.4 Výška pláště pístu H_{pl}

$$H_{pl} = 65 \text{ mm}$$

3.2.1.5 Výška prvního můstku H_{m1}

$$H_{m1} = 12 \text{ mm}$$

3.2.1.6 Výška druhého můstku H_{m2}

$$H_{m2} = 6 \text{ mm}$$

3.2.1.7 Výška ostatních můstků H_m

$$H_m = 4,2 \text{ mm}$$

3.2.1.8 Vzdálenost mezi pístními kroužky H_{ξ}

$$H_{\xi} = 115 \text{ mm}$$

3.2.1.9 Průměr pístního čepu D_{ξ}

$$D_{\xi} = 36,5 \text{ mm}$$

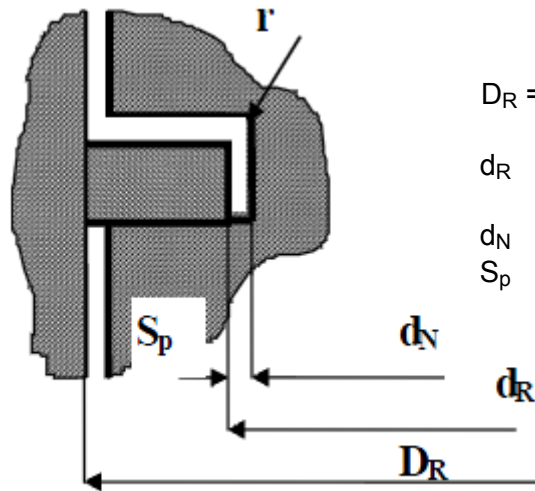
3.2.1.10 Tloušťka dna pístu δ

$$\delta = 12,2 \text{ mm}$$

3.2.2 Drážky pro pístní kroužky

3.2.2.1 Radiální vůle

- radiální vůle prvního pístního kroužku



Použité označení na obr.

$D_R = D$ – vnější průměr kroužku v zamontovaném stavu (vrtání válce)

d_R – vnitřní průměr kroužku v zamontovaném stavu

d_N – Průměr drážky pro pístní kroužek v pístu

S_p – radiální vůle pístního kroužku

Obr. 17 Radiální vůle pístního kroužku [14]

S_p volím dle doporučení literatury 0,6 mm

a šířka pístního kroužku, volím vzhledem k dostupnosti podle německé normy DIN 70 910

$$d_N = D - 2 \cdot (a + S_p) \quad (6)$$

$$d_N = 139,7 - 2 \cdot (5,7 + 0,6) \rightarrow 129,5 \text{ mm}$$

- radiální vůle druhého pístního kroužku

a šířka pístního kroužku, volím vzhledem k dostupnosti podle německé normy DIN 70 915

$$d_N = D - 2 \cdot (a + S_p) \quad (6)$$

$$d_N = 139,7 - 2 \cdot (5,7 + 0,6) \rightarrow 129,5 \text{ mm}$$

- radiální vůle stíracího kroužku

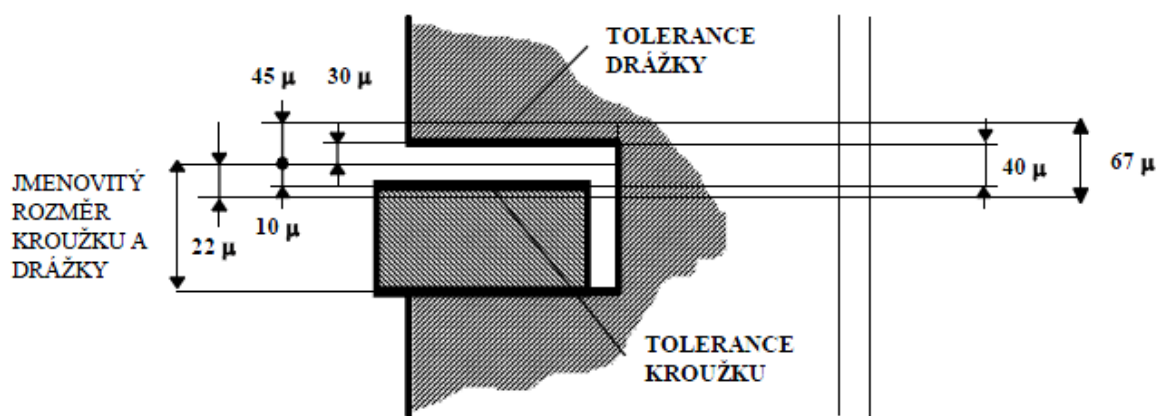
a šířka pístního kroužku, volím vzhledem k dostupnosti podle německé normy DIN 70 947

$$d_N = D - 2 \cdot (a + S_p) \quad (6)$$

$$d_N = 139,7 - 2 \cdot (5,7 + 0,6) \rightarrow 129,5 \text{ mm}$$

3.2.2.2 Axiální vůle

Axiální vůle kroužku je určována řadou faktorů, přičemž rozhodující je pravděpodobnost vzniku karbonových úsad. Proto u prvního pístního kroužku, kde v důsledku vysokých teplot je nebezpečí vzniku karbonové vrstvy značné, jsou axiální vůle větší než u druhého pístního kroužku. (lit. [14])



Obr. 18 Toleranční pole a axiální vůle pístního kroužku [14]

- axiální vůle prvního kroužku

podle normy DIN 70 910

Drážka: $3,5^{+0,050}_{+0,035}$

Pístní kroužek: $3,5^{-0,010}_{-0,022}$

Maximální vůle kroužku v drážce - 0,072 mm

Minimální vůle kroužku v drážce - 0,045 mm

- axiální vůle druhého kroužku

podle normy DIN 70 915

Drážka: $3,5^{+0,040}_{+0,025}$

Pístní kroužek: $3,5^{-0,010}_{-0,022}$

Maximální vůle kroužku v drážce - 0,062 mm

Minimální vůle kroužku v drážce - 0,035 mm

- axiální vůle stíracího kroužku

podle normy DIN 70 947

Drážka: $6^{+0,040}_{+0,025}$

Pístní kroužek: $6^{-0,010}_{-0,022}$

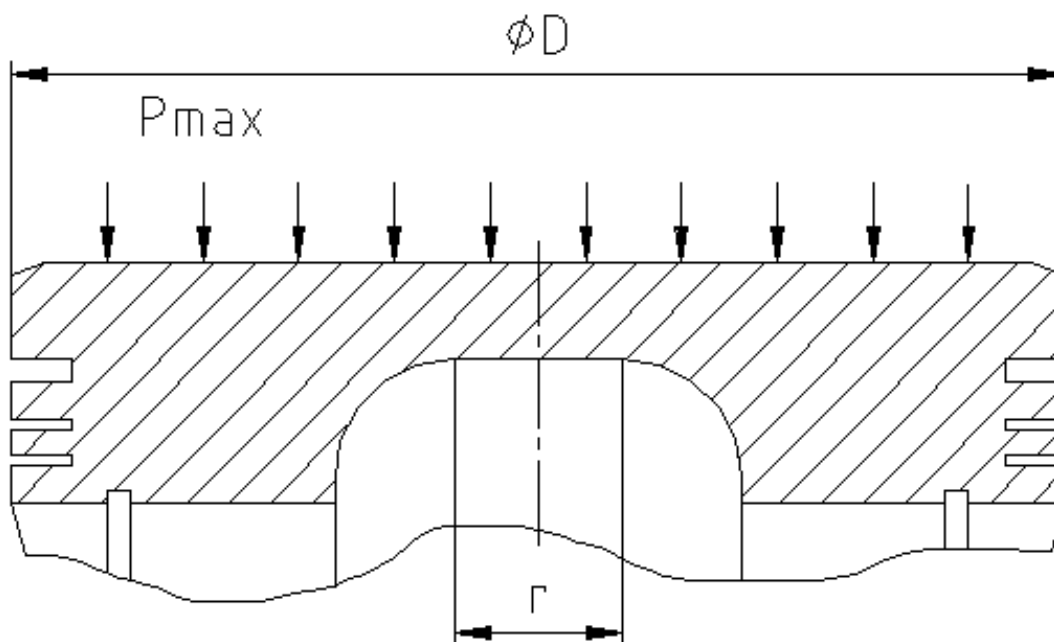
Maximální vůle kroužku v drážce - 0,062 mm

Minimální vůle kroužku v drážce - 0,035 mm

3.3 Pevnostní výpočet pístu

Vzhledem ke složitosti tvaru pístu i jeho namáhání můžeme provést pouze informativní výpočet zahrnující základní namáhání vyvolané tlakem plynů při spalování a setrvačnými silami. Další zatěžující účinky jako je tepelný tok průřezy pístu, proměnnost zatěžujících účinků i vlivy vrubových účinků vyvolávajících koncentraci napětí, není možno přímo do výpočtu zahrnout, a jsou souhrnně respektovány velikostí dovolených hodnot napětí. Kontrolní pevnostní výpočet prvotního návrhu pístu vychází z podobnosti namáhání provedených a osvědčených konstrukcí pístu. (lit. [14])

3.3.1 Pevnostní výpočet dna pístu



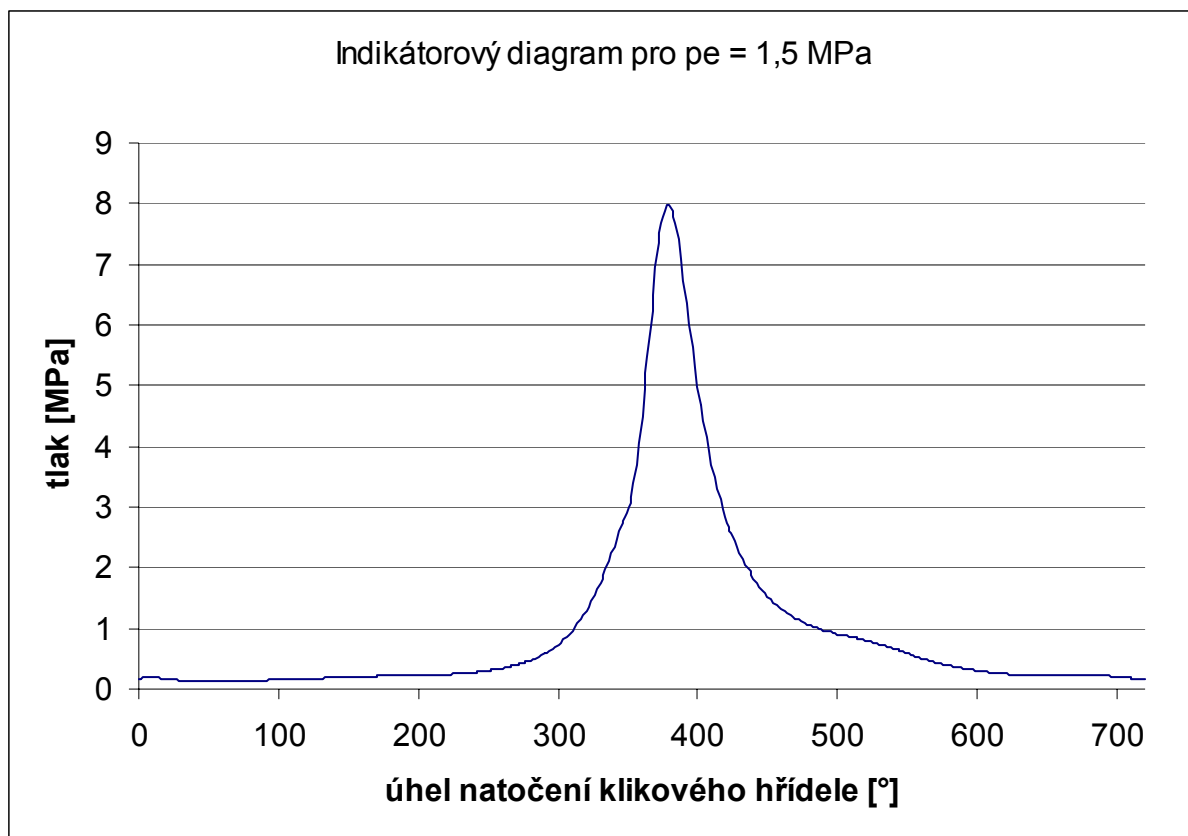
Obr. 19. Zatížení dna pístu [14], [25]

3.3.1.1 Maximální tlak plynů ve válci $p_{\max}$

Hodnota maximálního tlaku se určuje pomocí indikátorového diagramu v závislosti na středním efektivním tlaku.

V mém případě je střední efektivní tlak zhruba $p_e = 1,5 \text{ MPa}$.

$$p_{\max} = 7,179 \text{ MPa}$$



Obr. 20 Indikátorový diagram

3.3.1.2 Maximální síla tlaku plynů $F_{p\max}$

$$F_{p\max} = \pi \cdot r^2 \cdot p_{\max}$$

$$F_{p\max} = \pi \cdot 19,2^2 \cdot 7,179$$

$$F_{p\max} = 1314,12 \text{ N}$$
(7)

3.3.1.3 Maximální ohybový moment $M_{o\max}$

$$M_{o\max} = \frac{r^3}{3} \cdot p_{\max}$$

$$M_{o\max} = \frac{19,2^3}{3} \cdot 7,179$$

$$M_{o\max} = 16937,386 \text{ N} \cdot \text{mm}$$
(8)

3.3.1.4 Moment odporu v ohybu W_o

$$W_o = \frac{1}{3} \cdot r \cdot \delta^2$$

$$W_o = \frac{1}{3} \cdot 19,2 \cdot 12,2^2$$

$$W_o = 952,576 \text{ mm}^3$$
(9)

3.3.1.5 Maximální ohybové napětí σ_o

$$\begin{aligned}\sigma_o &= p_{\max} \cdot \left(\frac{r}{\delta}\right)^2 \\ \sigma_o &= 7,179 \cdot \left(\frac{19,2}{12,2}\right)^2 \\ \sigma_o &= 17,781 \text{ MPa}\end{aligned}\tag{10}$$

3.3.1.6 Maximální ohybové napětí ve středu desky pro podepřenou desku $\sigma_{o\text{Max}}$

$$\begin{aligned}\sigma_{o\text{Max}} &= 1,25 \cdot p_{\max} \cdot \left(\frac{r}{\delta}\right)^2 \\ \sigma_{o\text{Max}} &= 1,25 \cdot 7,179 \cdot \left(\frac{19,2}{12,2}\right)^2 \\ \sigma_{o\text{Max}} &= 22,226 \text{ MPa}\end{aligned}\tag{11}$$

$\sigma_{\text{dov}} = 20 \text{ až } 25 \text{ Mpa}$

Vypočtená hodnota $\sigma_{o\text{Max}}$ spadá do intervalu hodnot dovoleného napětí => podmínka splněna

3.3.2 Nejslabší místo pláště pístu

Bývá u většiny pístů v drážce pístu pro stírací kroužek, kde stěna pístu je zeslabena nejen samotnou drážkou, ale i otvory, kterými je odváděn setřený olej do klikové skříně motoru. (lit. [14])

3.3.2.1 Maximální síla od tlaku plynů $F_{p\text{Max}}$

$$\begin{aligned}F_{p\text{Max}} &= \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot p_{\max} \\ F_{p\text{Max}} &= \frac{\pi \cdot 139,7^2}{4} \cdot 7,179 \\ F_{p\text{Max}} &= 110039,003 \text{ N}\end{aligned}\tag{12}$$

3.3.2.2 Min. příčný průřez pístu v drážce pro stírací pístní kroužek S_x

$$\begin{aligned}S_x &= \pi \cdot (r_1^2 - r_2^2) \\ S_x &= \pi \cdot (0,06475^2 - 0,0252^2) \\ S_x &= 1,386 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2\end{aligned}\tag{13}$$

3.3.2.3 Namáhání vyvolané tlakem plynů $\sigma_{tl \max}$

$$\begin{aligned}\sigma_{tl \max} &= \frac{F_{pMax}}{S_x} \\ \sigma_{tl \max} &= \frac{110039,003}{1,386 \cdot 10^{-3}} \\ \sigma_{tl \max} &= 7,937 \cdot 10^7 Pa\end{aligned}\tag{14}$$

$\sigma_{dov} = 30 \text{ až } 40 \text{ Mpa}$

Vypočtená hodnota $\sigma_{tl \max}$ spadá do intervalu hodnot dovoleného napětí => podmínka splněna

Na konci výfukového zdvihu dochází při doběhu pístu do horní úvrati k namáhání vyšetřovaného průřezu na tah. Toto namáhání je vyvoláváno setrvačnými silami hmotnosti koruny pístu nad vyšetřovaným průřezem. (lit. [14])

3.3.2.4 Setrvačná síla $F_{sp,x}$

$$\begin{aligned}F_{sp,x} &= m_x \cdot r_k \cdot \omega_{\max}^2 \cdot (1 + \lambda_0) \\ F_{sp,x} &= 0,567 \cdot 0,076 \cdot 314,159 \cdot (1 + 0,2) \\ F_{sp,x} &= 5117 N\end{aligned}\tag{15}$$

m_x – hmotnost koruny pístu nad vyšetřovaným průřezem

Vzhledem ke složitosti výpočtu a orientační hodnotě výsledku postup výpočtu neuvádím.

$m_x = 0,567 \text{ kg}$ (pro píst vyrobený z duralu $\rho = 2800 \text{ kg.m}^{-3}$)

r_k – poloměr klikového hřídele

$$r_k = \frac{Z}{2 \cdot 1000} \rightarrow r_k = \frac{152,4}{2 \cdot 1000} \rightarrow r_k = 0,076 m\tag{16}$$

$\omega_{\max}$ – maximální rychlost otáčení klikového hřídele

$$\omega_{\max} = \frac{\pi \cdot n}{30} \rightarrow r_k = \frac{\pi \cdot 3000}{30} \rightarrow r_k = 314,159 s^{-1}\tag{17}$$

λ_0 – ojnicní poměr

volím $\lambda_0 = 0,2$ z rozsahu $\lambda_0 = 0,2 \text{ až } 0,3$

3.3.2.5 Tahové napětí ve vyšetřovaném průřezu σ_t

$$\sigma_t = \frac{F_{sp,x}}{S_x}$$

$$\sigma_t = \frac{5117}{1,386 \cdot 10^{-3}} \quad (18)$$

$$\sigma_t = 3,691 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

$\sigma_{dov} = 4 \text{ až } 10 \text{ Mpa}$

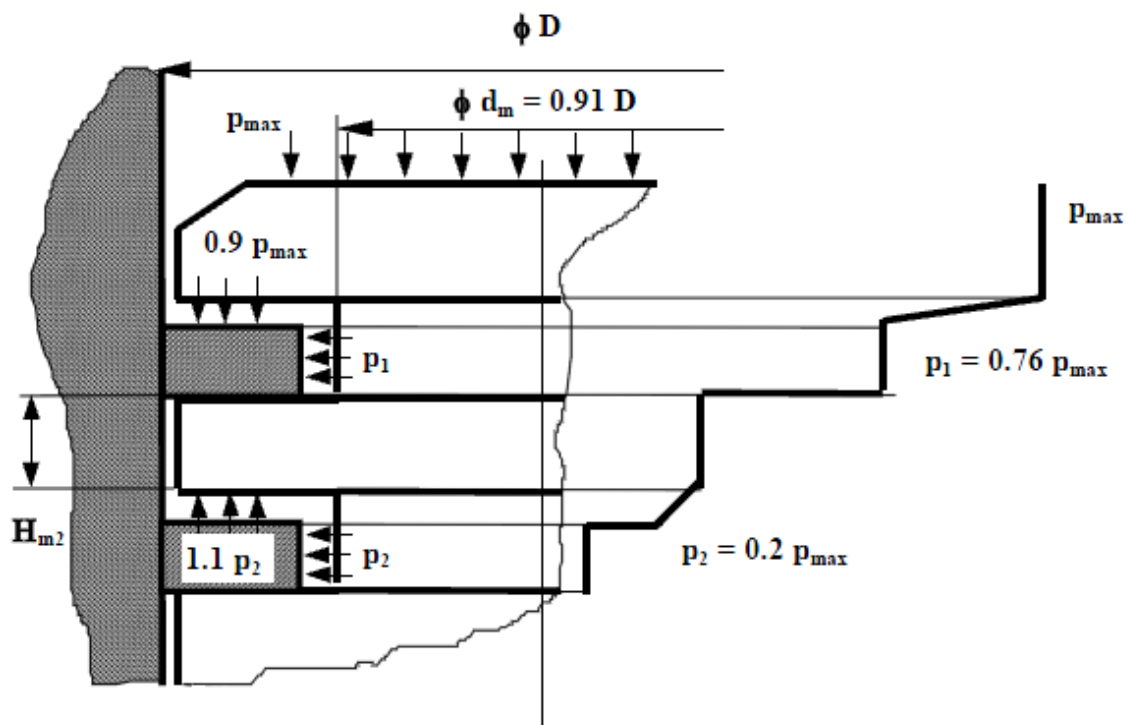
Vypočtená hodnota σ_t spadá do intervalu hodnot dovoleného napětí => podmínka splněna

3.3.3 Měrný tlak na plášť pístu

Je vyvoláván normálovou silou, kterou působí píst na stěnu válce. Její maximální velikost je dosahována poblíž horní úvratě při pohybu pístu v průběhu expanzního zdvihu. Je určována kinematikou klikového mechanismu a průběhem tlaku plynů ve válci motoru při hoření. (lit. [14])

$$p_{pl} = \frac{F_{n,max}}{D_{pl} \cdot L_{pl}} \quad (19)$$

3.3.4 Můstek mezi prvním a druhým těsnícím kroužkem



Obr. 21 Rozložení tlaků v mezi kroužkových objemech [14]

Je vystaven velmi vysokému namáhání od tlaku plynů ve spalovacím prostoru za současného působení značných teplot. (lit. [14])

3.3.4.1 Výsledný silový účinek na můstek F_m

$$F_m = \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d_m^2) \cdot (0,9 \cdot p_{\max} - 0,22 \cdot p_{\max})$$
$$F_m = \frac{\pi}{4} \cdot (139,7^2 - [0,91 \cdot 139,7]^2) \cdot (0,9 \cdot 7,179 - 0,22 \cdot 7,179) \quad (20)$$
$$F_m = 12862,679 N$$

Ohybový moment

$$M_o = F_m \cdot \frac{D - d_m}{4}$$
$$M_o = 12862,679 \cdot \frac{139,7 - (0,91 \cdot 139,7)}{4} \quad (21)$$
$$M_o = 4,043 \cdot 10^4 N \cdot mm$$

Modul odporu v ohybu

$$W_o = \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot d_m \cdot H_{m2}^2$$
$$W_o = \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot 0,91 \cdot 139,7 \cdot 6^2 \quad (22)$$
$$W_o = 2,396 \cdot 10^3 mm^3$$

Ohybové napětí

$$\sigma_o = \frac{M_o}{W_o}$$
$$\sigma_o = \frac{4,043 \cdot 10^4}{2,396 \cdot 10^3} \quad (23)$$
$$\sigma_t = 16,872 MPa$$

Průřez v místě vetknutí

$$S_1 = \pi \cdot d_m \cdot H_{m2}$$
$$S_1 = \pi \cdot 0,91 \cdot 139,7 \cdot 6 \quad (24)$$
$$S_1 = 2396 mm^2$$

Smykové napětí

$$\tau = \frac{F_m}{S_1}$$
$$\tau = \frac{12862,679}{2396} \quad (25)$$
$$\tau = 5,368 MPa$$

Výsledné redukované napětí

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_o^2 + 3\tau^2}$$

$$\sigma_{red} = \sqrt{16,872^2 + 3 \cdot 5,368^2}$$

$$\sigma_{red} = 20,065 \text{ MPa}$$

(26)

Redukované napětí nepřesahuje hodnotu **60 až 80 Mpa**, která se vztahuje na hliníkové slitiny s nárůstem teploty při zohlednění vrubových účinků.

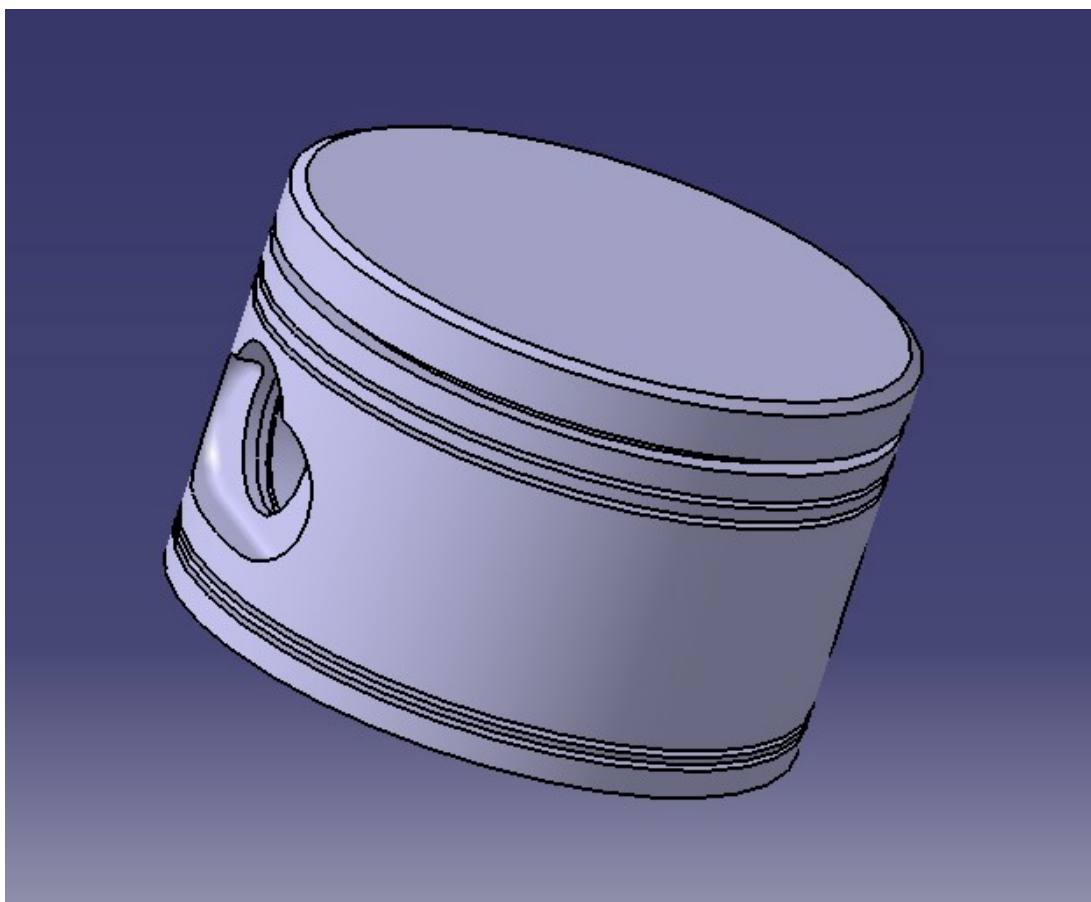
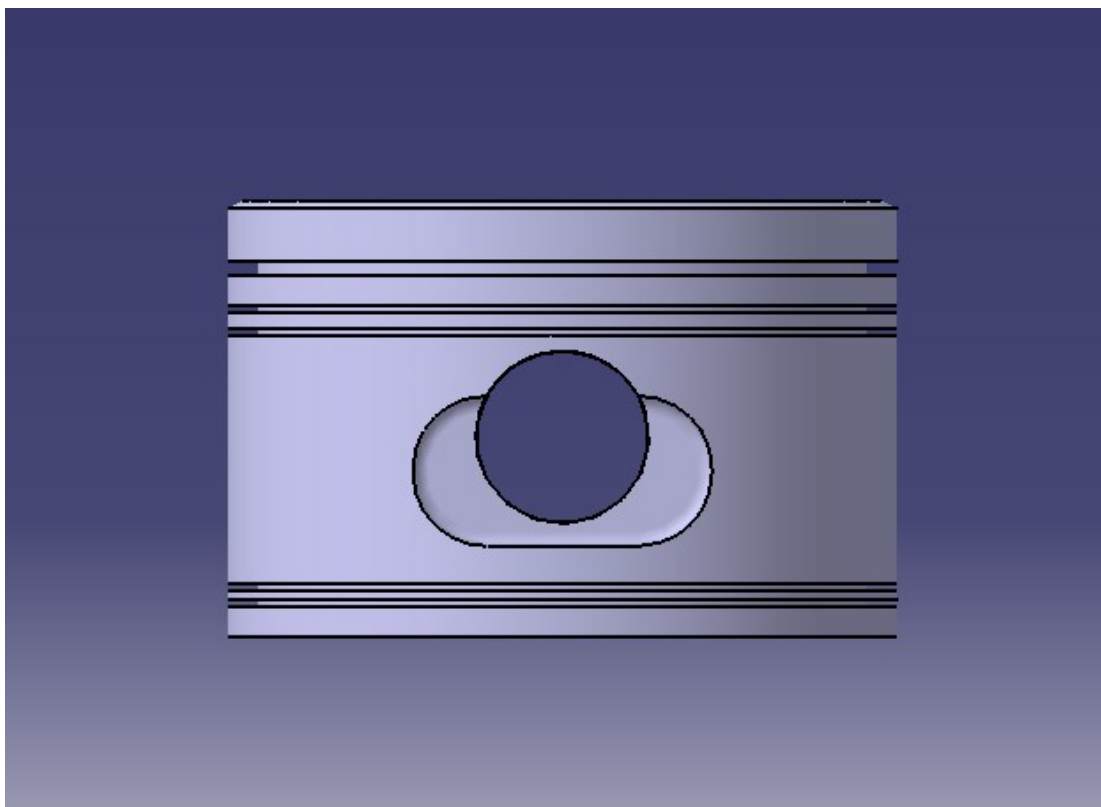


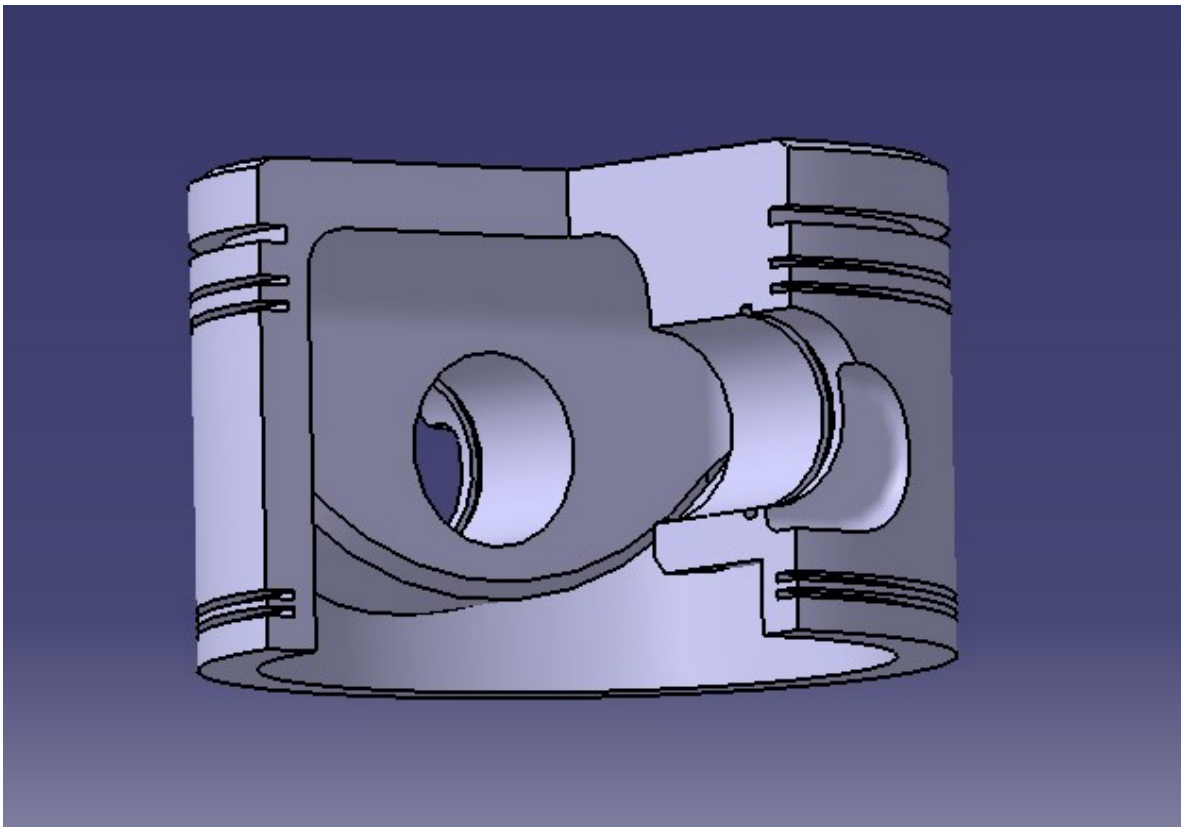
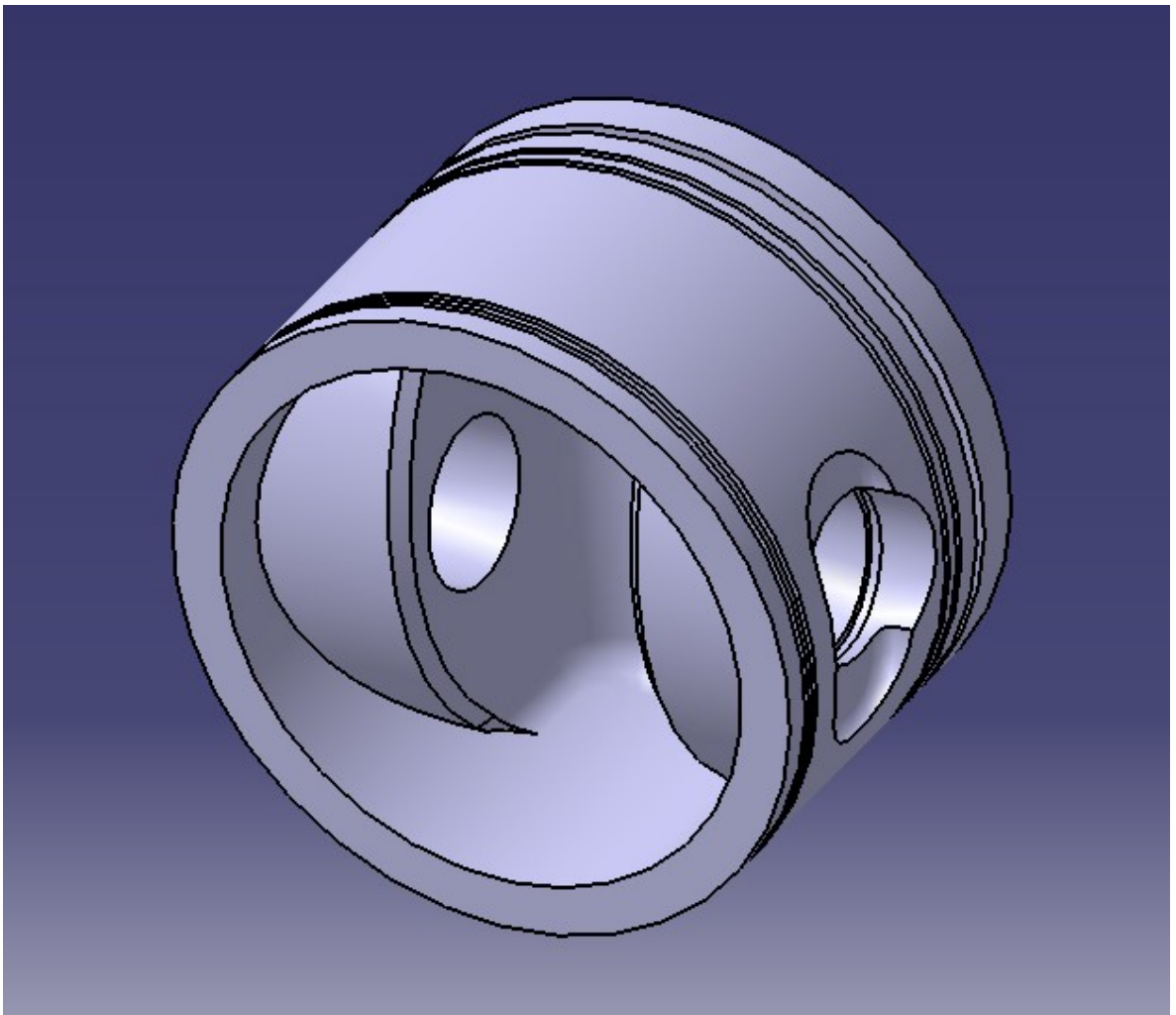
Obr. 22 Klikový hřídel a písty motoru Allison [15]

4. Závěr

Na základě známých provozních parametrů motoru Allison byly stanoveny základní rozměry motoru a klikového mechanismu. Výpočty bylo dále ověřeno, zda píst vyhovuje na namáhání. Všechny podmínky vyjma jediné byly splněny. Nesplnění podmínky pro napětí vyvolané tlakem plynů σ_{tlmax} je pravděpodobně způsobeno tím, že letecké motory pracují s vyššími tlaky než motory automobilové, jichž se týkají meze dovolených napětí použitých při výpočtu.

5. Model pístu dle návrhu





5. Seznam použitých symbolů

a	[mm]	šířka pístního kroužku
c_s	[m.s ⁻¹]	střední pístové rychlosti
D	[mm]	vrtání válců motoru
$D_{\check{c}}$	[mm]	průměr pístního čepu
d_R	[mm]	vnitřní průměr kroužku v zamontovaném stavu
d_N	[mm]	průměr drážky pro pístní kroužek v pístu
F_{pmax}	[N]	maximální síla tlaku plynů
$F_{sp,x}$	[N]	setrvačná síla
F_m	[N]	výsledný silový účinek na můstek
H_p	[mm]	výška pístu
H_k	[mm]	kompresní výška pístu
H_o	[mm]	vzdálenost mezi nálitky pro pístní čep
H_{pl}	[mm]	výška pláště pístu
H_{m1}	[mm]	výška prvního můstku
H_{m2}	[mm]	výška druhého můstku
H_m	[mm]	výška ostatních můstků
$H_{\check{c}}$	[mm]	vzdálenost mezi pístními kroužky
i	[-]	počet válců motoru
k	[-]	zdvihový poměr
M_o	[N.mm]	ohybový moment
$M_{o max}$	[N.mm]	maximální ohybový moment
m_x	[kg]	hmotnost koruny pístu nad vyšetřovaným průřezem
n	[min ⁻¹]	otáčky motoru
P	[W]	maximální výkon motoru
P_l	[W]	litrový výkon motoru
p_e	[Pa]	střední efektivní tlak
p_{max}	[Pa]	maximální tlak plynů ve válci
p_{pl}	[Pa]	měrný tlak na plášť pístu
r	[mm]	poloměr podepření desky
r_k	[mm]	poloměr klikového hřídele
S_1	[mm ²]	průřez v místě vetknutí
S_p	[mm]	radiální vůle pístního kroužku
S_x	[mm ²]	min. příčný průřez pístu v drážce pro stírací pístní kroužek
V	[m ³]	zdvihový objem motoru
V_Z	[m ³]	zdvihový objem jednoho válce motoru
W_o	[m ³]	moment odporu v ohybu
Z	[mm]	zdvih pístu motoru
λ_0	[-]	ojniční poměr
δ	[mm]	tloušťka dna pístu
σ_o	[MPa]	maximální ohybové napětí
σ_{oMax}	[MPa]	max. ohybové napětí ve středu desky pro podepřenou desku
σ_{red}	[MPa]	výsledné redukované napětí
$\sigma_{tl max}$	[MPa]	namáhání vyvolané tlakem plynů
σ_t	[MPa]	tahové napětí ve vyšetřovaném průřezu
τ	[-]	taktnost motoru
τ	[MPa]	smykové napětí
ω_{max}	[min ⁻¹]	maximální rychlost otáčení klikového hřídele

6.Seznam použité literatury

Literatura

- [1] GOEBL, Greg. *Wright, P&W, Allison, & Rolls-Royce Aircraft Piston Engines* [online]. 5/2009. Dostupné z : <http://www.vectorsite.net/gfxpxe_01.html>
- [2] *Rotační motor* [online]. 5/2009 [citováno 2009-05-18]. Dostupné z : <http://cs.wikipedia.org/wiki/Rota%C4%8Dn%C3%AD_motor>
- [3] PEARSON, Bob. *WWI Aero Engine* [online]. 5/2009. Dostupné z : <<http://www.cbrnp.com/profiles/miscellaneous/ww1-aero-engines.htm>>
- [4] [online]. 5/2009. Dostupné z : <<http://www.mincbergr.net/Museums/Brussels/engines/engines.htm>>
- [5] *Crew at work on dynamometer...* [online]. 5/2009. Dostupné z : <<http://www.nasaimages.org/luna/servlet/detail/nasaNAS~13~13~64406~168924:CREW-AT-WORK-ON-DYNAMOMETER-ON-ALLI>>
- [6] DRENDEL, Lou. *Walk Around : P-40 Warhawk*. Carrollton, Texas: Squadron/Signal Publications, INC., 1996. 80 s. ISBN 0-89747-361-2.
- [7] *Popular Science* [online]. Vydáno: 6. 1944. Dostupné z : <http://books.google.cz/books?id=3CEDAAAAMBAJ&printsec=frontcover&dq=Popular+Science+July+1944&lr=&source=gbs_summary_r&cad=0_0#PPA201,M1>
- [8] *Removing the Merlin engine* [online]. 12/2008. Dostupné z : <<http://www.spitfiresite.com/photos/historic/2008/12/removing-merlin-engine.html>>
- [9] *Packard V-1650* [online]. 5/2009. Dostupné z : <http://en.wikipedia.org/wiki/Packard_V-1650>
- [10] *Kawasaki Ki-60* [online]. 3/2005. Dostupné z : <<http://forum.valka.cz/viewtopic.php/t/1272>>
- [11] FRYŚ, Andrzej. *Mało znane fakty z okresu II Wojny Światowej : Pompy produkowane w Andrychowie były stosowane do śmiercionośnych myśliwców Luftwaffe* [online]. 5/2009. Dostupné z : <<http://www.modelpartner.ig.pl/articles/pumps/pumps.html>>
- [12] GARZEN, L.; GARZEN, L. *Der DB 601 der Ile de Riou* [online]. 7/2006. Dostupné z : <http://www.taucher.net/redaktion/67/Das_Raetsel_eines_DB_601_10.html>
- [13] *Allison V-1710 : Operating Instructions and Overhaul Instructions* [online]. 5/2009. Dostupné z : <http://www.weakforcepress.com/allison_v-1710.htm>
- [14] RAUSCHNER, Jaroslav. *Ročníkový projekt (studijní opory)*, Brno, Učební texty vysokých škol, 2005. 154 s.
- [15] *Aviation engines : Allison* [online]. 5/2009. Dostupné z : <<http://www.oldengine.org/members/diesel/Duxford/allison.htm>>
- [16] *Radial engine* [online]. 5/2009. Dostupné z : <http://en.wikipedia.org/wiki/Radial_engine>
- [17] *Hvězdicový motor* [online]. 5/2009. Dostupné z : <http://cs.wikipedia.org/wiki/Hv%C4%9Bzdicov%C3%BD_motor>
- [18] *Pohonné jednotky letadel : Letecké motory* [online]. 5/2009 [citováno 2009-05-18]. Dostupné z : <http://engel.ic.cz/l.svetova_valka_soubory/Page479.htm>
- [19] *Řadový motor* [online]. 5/2009 [citováno 2009-05-18]. Dostupné z : <http://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%98adov%C3%BD_motor>
- [20] *Allison V-1710* [online]. 5/2009 [citováno 2009-05-05]. Dostupné z : <http://cs.wikipedia.org/wiki/Allison_V-1710>
- [21] *Rolls-Royce Merlin* [online]. 5/2009 [citováno 2009-05-20]. Dostupné z : <http://en.wikipedia.org/wiki/Merlin_engine>
- [22] *Rolls-Royce Merlin* [online]. 5/2009 [citováno 2009-05-20]. Dostupné z : <http://cs.wikipedia.org/wiki/Rolls-Royce_Merlin>

- [23] ŠUCHA, Pavol. *Daimler-Benz DB 600-601* [online]. 2/2003 [citováno 2009-05-19]. Dostupné z : <<http://www.lietadla.com/motory/db-600.htm>>
- [24] *Daimler-Benz DB 601* [online]. 5/2009 [citováno 2009-05-19]. Dostupné z : <http://cs.wikipedia.org/wiki/Daimler-Benz_DB_601>
- [25] WHEELER, Bud. *V-1710 Overhaul by Allison Competition Engines*. 16 s.

Normy

- [26] DIN 70 910: 1973, R – ringe
- [27] DIN 70 915: 1973, M – ringe
- [28] DIN 70 947: 1973, D – ringe