



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

PÍST ZÁŽEHOVÉHO MOTORU ZÁVODNÍ VERZE ŠKODA 110

PISTON FOR RACING ENGINE ŠKODA 110

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAKUB GERÁK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. DAVID SVÍDA, PH.D.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jakub Gerák

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

obor: **Stavba strojů a zařízení (2302R016)**

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

Píst zážehového motoru závodní verze Škoda 110

v anglickém jazyce:

Piston for Racing Engine Škoda 110

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Zpracujte kontrolní výpočet a navrhnete případné konstrukční úpravy pístu pro závodní motor Škoda 110.

Cíle bakalářské práce:

1. Na základě empirických údajů vypracujte základní kontrolní výpočet pístu.
2. Zhodnoťte získané výsledky a navrhnete případné konstrukční úpravy.

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, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/13.

V Brně, dne 19.10.2012



prof. Ing. Václav Pištěk, DrSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že předloženou bakalářskou práci jsem zpracoval samostatně, pod vedením Ing. Davida Svídy, Ph.D. Prohlašuji, že citace použitých zdrojů je úplná.

V Brně dne 24.5.2013

.....

podpis

Poděkování

Tímto děkuji Ing. Davidu Svídovi, Ph.D., který obětoval svůj čas, aby tato práce mohla být vypracována. Dále děkuji Ing. Daliboru Klamsovi za poskytnutí informací a materiálů potřebných při vypracování této práce. Také děkuji své rodině za podporu při studiu.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá závadou na pístu Metalex pro motor závodní Škody 110. Cílem práce je zjistit důvody závady pístu, zkontrolovat nejvíce namáhané části pevnostním výpočtem a navrhnout případné konstrukční řešení tak, aby píst vydržel všechna namáhání po celou dobu požadované životnosti.

Klíčová slova: motor, píst, pístní kroužek, klikový hřídel, namáhání

Abstrakt

This Bachelor's thesis deals with the defect of the piston Metalex for a racing engine Škoda 110. The aim of my work is to find the reasons for the piston defect, to check the most stressed parts by strength calculation and suggest a possible structural design so that the piston withstands all stresses throughout the required lifespan.

Key words: engine, piston, compression ring, crankshaft, stress

Bibliografická citace

GERÁK, J. *Píst zážehového motoru závodní verze Škoda 110*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 50 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. David Svída, Ph.D.

Bakalářská práce
Píst zážehového motoru závodní verze škoda 110
Jakub Gerák

Obsah

Zadání	2
Čestné prohlášení	4
Poděkování.....	5
Abstrakt.....	6
Bibliografická citace.....	7
Obsah.....	8
1 Úvod.....	10
2 Škoda 110 LS	11
2.1 Historie a rozdělení Škody 100 a 110.....	11
2.2 Základní popis Škody 110LS.....	12
2.2.1 Motor Škody 110LS	12
3 Závodní verze Škoda 110.....	12
3.1 Stručný popis úprav celého vozu	13
4 Upravený motor Škoda 110.....	14
4.1 Úpravy motoru	14
4.2 Úpravy příslušenství motoru.....	17
4.3 Základní parametry motoru	18
4.4 Výpočty dalších parametrů motoru	19
4.4.1 Kinematika klikového mechanismu	19
4.4.2 Střední efektivní tlak	21

Bakalářská práce
Píst zážehového motoru závodní verze škoda 110
Jakub Gerák

4.4.3	Střední indikovaný tlak.....	21
4.4.4	Indikátorový diagram	22
4.5	Rozdělení hmotnosti ojnice	24
4.5.1	Výpočet polohy těžiště	25
4.5.2	Výpočet momentů setrvačnosti.....	27
4.5.3	Výpočet redukováných hmotností v tříbodové redukci.....	27
4.5.4	Výpočet redukováných hmotností ve dvoubodové redukci.....	28
5	Pevnostní výpočet a kontrola pístu	29
5.1	Pevnostní výpočet pístu	29
5.1.1	Pevnostní výpočet druhého můstku.....	29
5.1.2	Pevnostní výpočet dna pístu.....	33
5.1.3	Měrný tlak na plášť pístu	35
5.1.4	Nejslabšího místa pláště pístu namáhané tlakem	39
5.1.5	Nejslabšího místa pláště pístu namáhané tahem	40
5.2	Kontrola pístu.....	41
5.2.1	Kontrola mechanického poškození vadného pístu	41
5.2.2	Pevnostní výpočet druhého můstku v místě největší hloubky drážek.....	42
5.2.3	Detailní kontrola geometrie drážky pro první pístní kroužek.....	45
6	Závěr	47
7	Seznam použité literatury.....	48
8	Seznam použitých symbolů.....	49

1 Úvod

Při úpravách osobních automobilů na závodní verze, je snaha o maximální možné snížení hmotnosti celého vozu. Odlehčení některých součástí nebo nahrazení součástmi s nižší hmotností, zejména pohybujících se částí hnací soustavy, může mít zásadní význam pro zvýšení výkonu. Proto jsou některé použité součásti namáhány na hranici možného zatěžování, což vede k častějším případům jejich poškození než u sériových vozů.

Při amatérských úpravách závodních vozidel jsou návrhy konstrukce jednotlivých součástí většinou voleny na základě dlouholetých zkušeností nebo vhodným odhadem, nikoli však početně. Mnohé z těchto zkušeností jsou získávány tím, že součást je navržena chybně a důsledek je její selhání, destrukce nebo zničení většího celku součástí. Aby bylo možné se vyvarovat opakování stejných chyb a případné nedostatky mohli být odstraněny, je nutné zjištění příčin selhání.

Právě proto je hlavním cílem této práce zjištění důvodu závady a to na pístu Metalex pro motor závodní verze Škody 110. Závada se projevila odlomením části můstku mezi prvním a druhým pístním kroužkem. Prvním možným důvodem závady, je nedostatečná výška můstku. Je možné, že píst je určen pouze pro motory s nižším výkonem, než je dosaženo u této závodní verze. Dalším důvodem závady může být ojedinělá výrobní vada nebo dodatečné poškození pístu vzniklé při montáži nebo při manipulaci.

Dalším cílem práce, je provést kontrolní výpočty pístu na základě empirických údajů, z důvodu zjištění dostatečné životnosti. Není totiž jisté, zda nejsou příliš namáhány i ostatní, dosud nepoškozené části pístu.

2 Škoda 110 LS

2.1 Historie a rozdělení Škody 100 a 110

Automobily Škoda 100 a 110 nahrazovaly starší modely Škoda 1000 a 1100MB, od kterých se lišily jen několika zásadními změnami. Byly vyráběny od roku 1969 do roku 1977 a ve speciální verzi, se zešíkmenou zádí vozu a označením 110R až do roku 1981.[4]

Škoda 110 se liší od méně výkonné verze Škody 100 pouze rozdílným zdvihovým objemem motoru, dosaženým rozdílným průměrem vrtání válců. Poloměr klikového hřídele je shodný u obou objemových verzí.[4]



Obr. 1 Škoda 110LS (z francouzského de Luxe Super) [6]

Pro rozeznání vývojem odlišných modelů je pro Škodu 110 používáno označení 110L a 110LS. Škoda 110LS se liší přídatnými světlomety, opatřenými žárovkami s halogenovým plynem a několika dalšími nepatrnými změnami. [4]

2.2 Základní popis Škody 110LS

Škoda 110LS je osobní automobil pro 4 až 5 osob se čtyřmi dveřmi a s celokovovou samonosnou karoserií. Pohon je přenášen prostřednictvím zadní nápravy. Čtyřdobý zážehový motor je umístěn za zadní nápravou. Maximální dosahovaná rychlost 140 km/h. [4]

2.2.1 Motor Škody 110LS

Motor Škody 110LS vychází z konstrukce motoru Škody 1100MB. Základní konstrukce motoru Škody 1000 a 1100MB je s různými úpravami používána u motorů ve vozech Škoda až do roku 2004.

Motor Škody 110LS je zážehový, nepřepřlňovaný, řadový čtyřválec s osmy ventily a rozvodem OHV. Zdvihový objem motoru je 1107cm³ a výkon je podle DIN 46 kW. Příprava směsi je realizována pomocí karburátoru. Chlazení je zajištěno vodou a chladičem umístěným v motorovém prostoru. Ventilátor chladiče je poháněn klínovým převodem od klikového hřídele. [4]

3 Závodní verze Škoda 110



Obr. 2 Závodní verze Škody 110

Bakalářská práce
Píst zážehového motoru závodní verze škoda 110
Jakub Gerák

Závodní verze Škody 110 je určena k amatérskému závodu do vrchu v třídě E1-1150. Na vozidle jsou rozsáhlé úpravy týkající se všech jeho částí. Všechny úpravy jsou provedeny Ing. Daliborem Klemsou který je zároveň i řidičem vozu. Závodní Škoda 110 je vyobrazena na obr. 2.

Na motoru vozidla je zvýšen výkon na 67,6 kW při otáčkách 6100 min⁻¹ a dosahovaná rychlost vozidla je asi 155 km/h. Maximální rychlost je neadekvátní výkonu a to z důvodu použití velkých převodových poměrů vyhovujících pro závod do vrchu.

3.1 Stručný popis úprav celého vozu

Úpravy motoru jsou uvedeny v následující části **Upravený motor Škoda 110**.

Skleněná okna kromě čelního, jsou nahrazena z důvodu zvýšení bezpečnosti a snížení hmotnosti makrolomem. Vozidlo je odlehčeno z původních 840 kg na 650 kg.

Převodovka

Převodová skříň s diferenciálem je nahrazena čtyřstupňovou převodovou skříní z formule Škoda. Jelikož formule Škoda má opačně uložený motor, tak diferenciál je nutné upravit na opačný smysl otáčení výstupního hřídele. Převodové poměry jednotlivých stupňů jsou uvedeny v tab. 1.

Tab. 1 Převodové poměry

První převodový stupeň:	3,08
Druhý převodový stupeň:	1,99
Třetí převodový stupeň:	1,41
Čtvrtý převodový stupeň:	1,08
Převodový poměr stálého převodu:	4,4

Bakalářská práce
Píst zážehového motoru závodní verze škoda 110
Jakub Gerák

Podvozek a jeho části

Seznam dílů nahrazující originální díly:

- závodní odpružení a tlumení odpružení vozidla od firmy HP sporting
- přední kotoučové brzdy se čtyřmi pístky ze Škody 130 s brzdovým obložení Ferodo
- brzdové pístky o průměru 21 mm v zadních bubnových brzdách
- Slick pneumatiky Avon Tyres, přední 180-55/13, zadní 190-55/13

Kabina vozidla

Z kabiny vozidla je odstraněno veškeré komfortní vybavení, čalounění a ovládací prvky nepotřebné při závodu. Přístrojová deska je tvořena tvarovaným hliníkovým plechem, do kterého je vsazena kontrolní signalizace a informační přístroje, které byly doplněny o tlakoměr motorového oleje a otáčkoměr motoru. Rychloměr je odpojen. Ve vozidle je umístěno pouze sedadlo řidiče s pětibodovými pásy.

4 Upravený motor Škoda 110

4.1 Úpravy motoru

Úprava válců motoru

Pro zvýšení zdvihového objemu je upraveno vrtání válců z původních 72 mm na 73,2. Zdvihový objem je tedy zvýšen z původních 1107 cm³ na 1145 cm³, i po úpravě motor zůstává ve stejné objemové kategorii do 1150 cm³.

Úprava a vyvážení klikového hřídele

Kliková hřídel je vyleštěna pro zvýšení pevnosti a snížení odporu vzduchu při vysokých otáčkách. Odlehčení je provedeno na řemenici a setrvačnicku, u kterého je snížena hmotnost z původních 11kg na 6 kg. Kliková hřídel, setrvačnick a řemenice jsou následně společně vyváženy v Sigma Group a.s. Lutín.

Bakalářská práce
Píst zážehového motoru závodní verze škoda 110
Jakub Gerák

Ojnice

Originální ojnice jsou nahrazeny ojnicemi z motoru Škody 100, z důvodu nižší hmotnosti. Rozměry zůstávají zachovány. Ojnice jsou odlehčeny o nálitky ok sloužících pro vyvážení. Pro zvýšení pevnosti jsou ojnice vyleštěny. Ojnice jsou vyváženy s přesností na 0,1 g.

Písty

Originální písty jsou nahrazeny závodními písty tvaru **T** značky Metalex. Písty jsou roku výroby 1983, ale doposud nebyly používány. Pístní kroužky jsou od firmy Buzuluk a.s. Hořovice.



Obr. 3 Závadný píst

U jednoho pístu došlo při běžícím motoru k odlomení části druhého můstku mezi pístními kroužky. Závadný píst je vyobrazen na obr. 3.

Bakalářská práce
Píst zážehového motoru závodní verze škoda 110
Jakub Gerák



Obr. 4 Model pístu z programu Autodesk Inventor 2013

Válcová hlava

Hlava válců je ponechána původní, litinová s pěti kanály. Kanály jsou vyleštěny. Hlava je snížena pro možnost dosažení požadovaného kompresního poměru. Přesné nastavení kompresního poměru 1:12 je dosaženo použitím na zakázku vyrobeného těsnění hlavy válců od firmy KALINA Industries S.R.O. ve Zlíně. Ventilové víko je použito se dvěma odvětrávacími otvory.

Vačková hřídel

Vačková hřídel je použita ze Škody Fábie 1.4MPi s rozvodem OHV. Vačky jsou upraveny broušením na požadovaný úhel otevření ventilů. Pro sací ventily je úhel otevření 285° a pro výfukové ventily je úhel otevření 280°.

Mechanismus rozvodu

Ventilové pružiny jsou nahrazeny ventilovými pružinami s vyšší tuhostí pro možnost dosažení vyšších otáček motoru. Použité pružiny z motoru BMW M3. Vahadla ventilů jsou použita z verze motoru Škody 110 R. Tato vahadla, která jsou označována jako typ C, umožňují vyšší zdvih ventilů a tím lepší plnění a vyplachování válců. Průměr sacího ventilu je 32 mm a průměr výfukového je 28 mm.

4.2 Úpravy příslušenství motoru

Palivový systém

Původní karburátor je nahrazen dvojitým dvoukomorovým karburátorem značky Weber s vnitřním průměrem 40mm. Vačkou poháněné membránové čerpadlo, umístěné na bloku motoru, je nahrazeno elektrickým čerpadlem FACET s objemovým průtokem 64 l/hod umístěným v palivové nádrži. Dodávka paliva je bez přepadu. Originální nádrž je nahrazena bezpečnostní nádrží.

Elektrická zdrojová soustava

Jako zdroj elektrické energie, je použit olovený akumulátor, který je nutné po každé jízdě vždy znovu nabít. Dynamo dobíjení je pro snížení hmotnosti vozidla a snížení ztráty výkonu motoru vymontováno. Vozidlo má z tohoto důvodu omezený dojezd na několik desítek kilometrů, při plném zatížení pouze na 15 km.

Zapalování

Originální přerušovač je sériově vybaven podtlakovou a odstředivou regulací. Rozdělovač s kladívkovým přerušovačem je použit z vysokozdvížného vozíku Desta MV12B s motorem Škoda 1203, který je vybaven pouze odstředivou regulací. Pružiny v odstředivé regulaci jsou nahrazeny pružinami Bosch s vyšší tuhostí. Rozsah regulace je 17°. Základní předstih zapalování je nastaven na 0°, tedy v horní úvratí pístu. Původní zapalovací transformátor je nahrazen olejem chlazeným transformátorem Bosch.

Chlazení motoru

Vodní chladič, původně umístěn v motorovém prostoru v zadní části vozu, je přemístěn do přední části kde využívá náporového chlazení. Vnitřní průměr potrubí, pro přívod a odvod chladicí kapaliny z motoru do chladiče je zvolen 32 mm. Na chladiči je namontován vrtulový ventilátor, poháněný elektrickým motorem. Ventilátor je v chodu pouze při přejíždění mezi stanovišti závodu, při plném zatížení motoru je odstaven z důvodu úspory elektrické energie a zvýšení chladicího účinku náporovým chlazením.

4.3 Základní parametry motoru

Zdvihový objem: $V = 1144 \text{ cm}^3$

Průměr vrtání válců: $D = 73,2 \text{ mm}$

Zdvih pístu: $Z = 68 \text{ mm}$

Délka ojnice: $l_o = 133 \text{ mm}$

Počet válců: $i = 4$

Maximální výkon: $P_{\max} = 67,6 \text{ kW}$

Jmenovité otáčky: $n = 6100 \text{ min}^{-1}$

Maximální otáčky: $n_{\max} = 8000 \text{ min}^{-1}$

Kompresní poměr: $\varepsilon = 12$

Taktnost motoru: $\tau = 0,5$

Poloměr klikového hřídele

$$r_k = \frac{Z}{2} \tag{1}$$

$$r_k = \frac{0,068}{2} = 0,034m$$

$$r_k = 34mm$$

Ojniční poměr

$$\lambda_o = \frac{r_k}{l_o} \tag{2}$$

$$\lambda_o = \frac{0,034}{0,133} = 0,255639$$

$$\lambda_o = 0,2556$$

Zdvihový objem jednoho válce

$$V_v = \frac{V}{i} \quad (3)$$

$$V_v = \frac{0,001144}{4} = 0,000286m^3$$

$$V_v = 286cm^3$$

V [m] – zdvihový objem motoru

i [-] – počet válců

4.4 Výpočty dalších parametrů motoru

4.4.1 Kinematika klikového mechanismu

Výpočet jmenovité úhlové rychlosti

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \quad (4)$$

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot 6100}{60} = 638,7905s^{-1}$$

$$\omega = 638,8s^{-1}$$

n [min⁻¹] – jmenovité otáčky motoru

Úhlová rychlost motoru je během celého cyklu proměnná, pro zjednodušení výpočtů je nerovnoměrnost zanedbána a úhlová rychlost se uvažuje jako konstantní.

Výpočet kinematických charakteristik

Průběhy polohy, rychlosti a zrychlení pístu jsou vyobrazeny v grafu kinematiky klikového mechanismu.

Bakalářská práce
Píst zážehového motoru závodní verze škoda 110
Jakub Gerák

Vztah pro výpočet polohy pístu v závislosti na úhlu natočení klikového hřídele α .

$$s(\alpha) = r_k \cdot \left((1 - \cos \alpha) + \frac{\lambda_o}{4} (1 - \cos 2 \cdot \alpha) \right)$$

Vztah pro výpočet rychlosti pohybu pístu v závislosti na úhlu natočení klikového hřídele α .

$$v(\alpha) = r_k \cdot \omega \cdot \left(\sin \alpha + \frac{\lambda_o}{4} \cdot 2 \cdot \sin 2 \cdot \alpha \right)$$

Vztah pro výpočet zrychlení působící na píst v závislosti na úhlu natočení klikového hřídele α .

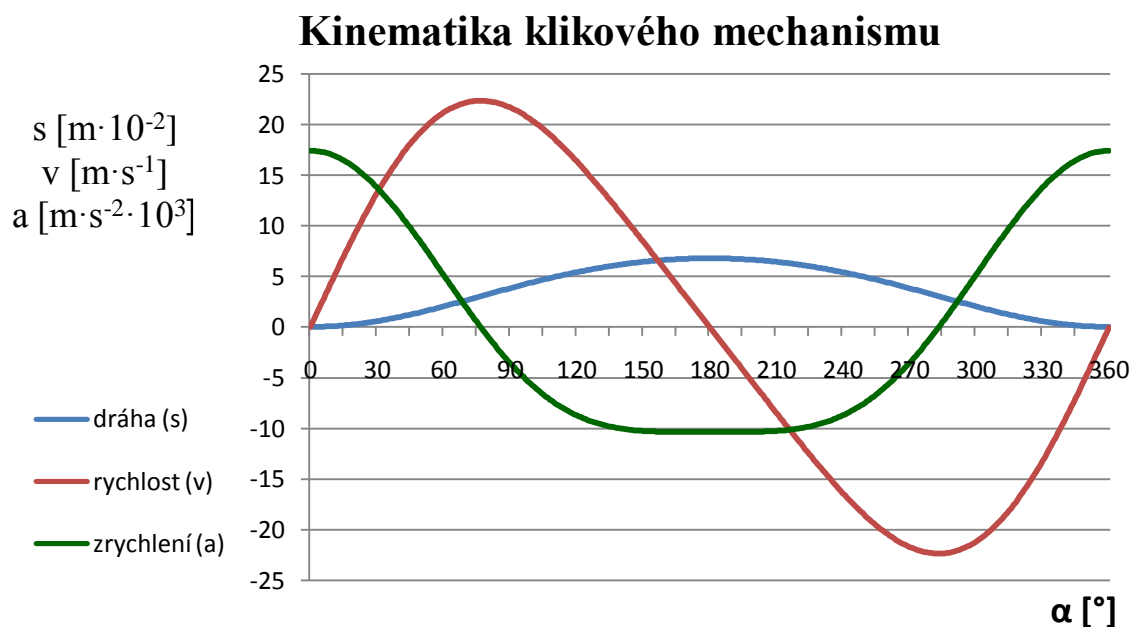
$$a(\alpha) = r_k \cdot \omega^2 \cdot (\cos \alpha + \lambda_o \cdot \cos 2 \cdot \alpha)$$

r_k [m] – poloměr klikového hřídele

ω [s^{-1}] – jmenovitá úhlová rychlost

α [°] – úhel natočení klikového hřídele

λ_o [-] – ojnicní poměr



Obr. 5 Graf kinematiky klikového mechanismu

4.4.2 Střední efektivní tlak

$$p_{se} = \frac{P \cdot 60}{V \cdot \tau \cdot n} \quad (5)$$

$$p_{se} = \frac{67600 \cdot 60}{1,144 \cdot 10^{-3} \cdot 0,5 \cdot 6100} = 1162440 Pa$$

$$p_{se} = 1,162 MPa$$

P [W] – maximální výkon motoru

V [m³] – zdvihový objem motoru

τ [-] – taktnost motoru

n [min⁻¹] – jmenovité otáčky motoru

4.4.3 Střední indikovaný tlak

Přesná hodnota středního indikovaného tlaku může být získána pouze výpočtem z naměřených hodnot indikátorového diagramu.

Přibližnou hodnotu středního indikovaného tlaku lze získat vydělením středního efektivního tlaku, předpokládanou mechanickou účinností.

Mechanická účinnost je volena $\eta = 0,85 \rightarrow (85 \%)$.

$$p_{si} = \frac{p_{se}}{\eta} \quad (6)$$

$$p_{si} = \frac{1162000}{0,85} = 1367060 Pa$$

$$p_{si} = 1,367 MPa$$

p_{se} [Pa] – střední efektivní tlak

η[-] – mechanická účinnost

Bakalářská práce
Píst zážehového motoru závodní verze škoda 110
Jakub Gerák

4.4.4 Indikátorový diagram

Přibližný indikátorový diagram je získán úpravou skutečně naměřeného diagramu, který byl naměřen na motoru podobnými parametry ale s nižší hodnotou středního indikovaného tlaku. Úprava je provedena v úseku mezi 270° a 450° úhlu natočení klikového hřídele (α), vynásobením jednotlivých naměřených hodnot tlaků funkcí :

$$1 + \cos \alpha \cdot x$$

kde x je hodnota zvolená tak, aby výsledná práce cyklu upravovaného indikátorového diagramu odpovídala práci podle vypočítaného středního indikovaného tlaku.

Práce cyklu středního indikovaného tlaku

Vykonaná práce cyklu je vypočítána vynásobením středního indikovaného tlaku a objemu jednoho válce.

$$A_i = p_{si} \cdot V_v \tag{7}$$

$$A_i = 1367000 \cdot 0,000286 = 390,96J$$

$$A_i = 390,96J$$

p_{si} [Pa] – střední indikovaný tlak

V_v [m^3] – zdvihový objem jednoho válce

Práce cyklu podle upraveného indikátorového diagramu

Práce cyklu vypočítaná z upraveného indikátorového diagramu, se musí rovnat práci cyklu vypočítaná ze středního indikovaného tlaku.

$$A_{id} = A_i$$

A_{id} [J] – práce cyklu podle P-V diagramu

Práce cyklu je počítána z p-V diagramu získaného z indikátorového diagramu, kde je úhel natočení klikového hřídele α nahrazen funkcí objemu válce. Funkce objemu válce je funkcí polohy pístu $s(\alpha)$ násobenou plochou dna pístu.

Bakalářská práce
Píst zážehového motoru závodní verze škoda 110
Jakub Gerák

Plocha dna pístu

$$S = \frac{D^2 \cdot \pi}{4} \quad (8)$$

$$S = \frac{0,0732^2 \cdot \pi}{4} = 0,00420835m^2$$

$$S = 4208mm^2$$

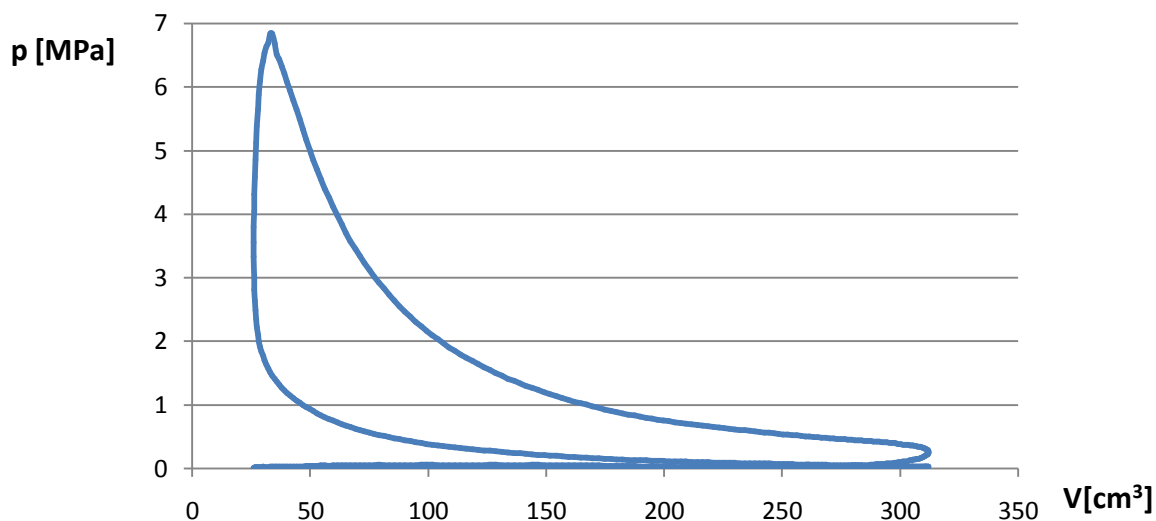
D [m] – průměr vrtání válců

Funkce závislosti objemu na úhlu natočení klikového hřídele:

$$V(\alpha) = S \cdot r \cdot \left((1 - \cos \alpha) + \frac{\lambda}{4} (1 - \cos 2 \cdot \alpha) \right)$$

Vztah pro výpočet práce cyklu z p-V diagramu:

$$A_{id} = \sum_{i=1}^{720} \left(\frac{p_i + p_{i+1}}{2} \cdot (V_{i+1} - V_i) \right) \quad (9)$$



Obr. 6 Upravený p-V diagram

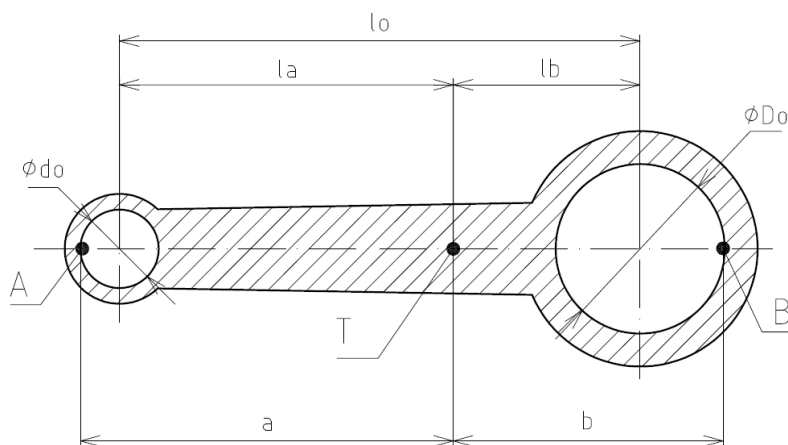
4.5 Rozdělení hmotnosti ojnice

Ojnice vykonává obecný rovinný pohyb. Pro výpočet je ojnice nahrazena dvěma hmotnými body, tak aby jeden vykonával pouze rotační pohyb a druhý pouze translační pohyb. Celková hmotnost ojnice je rozdělena tak, aby hmotné body nahrazovali silové působení skutečné ojnice. Hmotnost bodu vykonávající translační pohyb je pro výpočet setrvačné síly F_s přičtena k hmotnosti pístní skupiny. [5]

Změřené parametry ojnice

Délka ojnice:	$l_o = 133 \text{ mm}$
Průměr oka pro pístní čep:	$d_o = 20 \text{ mm}$
Průměr oka pro klikový čep:	$D_o = 43,2 \text{ mm}$
Celková hmotnost ojnice:	$m_o = 492 \text{ g}$

Celková hmotnost ojnice je vážena včetně ojnících šroubů, matic a podložek.



Obr. 7 Schematický náčrt ojnice [5]

Rozdělení hmotností ojnice je vypočítáno z výsledků měření periody kmitu při zavěšení ojnice v bodech A a B. Nejprve je hmotnost rozdělena tříbodovou redukcí a potom dvoubodovou redukcí.

Bakalářská práce
Píst zážehového motoru závodní verze škoda 110
Jakub Gerák

Perioda kmitu

Měření periody kmitu je pro každé oko prováděno pětkrát, výsledné hodnoty jsou následně zprůměrovány.

Průměrná délka periody kmitu při zavěšení v bodě A: $T_A = 0,7422s$

Průměrná délka periody kmitu při zavěšení v bodě B: $T_B = 0,6736s$

4.5.1 Výpočet polohy těžiště

Výpočet vzdálenosti bodu A a B

$$L = l_o + \frac{d_o}{2} + \frac{D_o}{2} \quad (10)$$

$$L = 0,133 + \frac{0,02}{2} + \frac{0,0432}{2} = 0,1646m$$

$$L = 164,6mm$$

l_o [m] – délka ojnice

d_o [m] – průměr oka ojnice pro pístní čep

D_o [m] – průměr oka ojnice pro čep klikového hřídele

Vzdálenost bodu A od těžiště T

$$b = L \cdot \frac{T_A^2 \cdot g - L \cdot 4 \cdot \pi^2}{T_B^2 \cdot g + T_A^2 \cdot g - 8 \cdot L \cdot \pi^2} \quad (11)$$

$$b = 0,1646 \cdot \frac{0,7422^2 \cdot 9,81 - 0,1646 \cdot 4 \cdot \pi^2}{0,6736^2 \cdot 9,81 + 0,7422^2 \cdot 9,81 - 8 \cdot 0,1646 \cdot \pi^2} = 0,057338m$$

$$b = 57,338mm$$

g [$m \cdot s^{-2}$] – tíhové zrychlení

Bakalářská práce
Píst zážehového motoru závodní verze škoda 110
Jakub Gerák

Vzdálenost bodu A od těžiště T

$$a = L - b \quad (12)$$

$$a = 0,1646 - 0,057338 = 0,107262m$$

$$a = 107,262mm$$

L [m] – vzdálenost bodu A a B

b [m] – vzdálenost bodu B od těžiště T

Vzdálenost těžiště od osy pístního čepu

$$l_a = a - \frac{d_o}{2} \quad (13)$$

$$l_a = 0,107262 - \frac{0,02}{2} = 0,097262m$$

$$l_a = 97,262mm$$

d_o [m] – průměr oka ojnice pro pístní čep

Vzdálenost těžiště od osy čepu klikového hřídele

$$l_b = b - \frac{D_o}{2} \quad (14)$$

$$l_b = 0,057338 - \frac{0,0432}{2} = 0,035738m$$

$$l_b = 35,738mm$$

D_o [m] – průměr oka ojnice pro čep klikového hřídele

4.5.2 Výpočet momentů setrvačnosti

Moment setrvačnosti k bodu A

$$I_A = \frac{T_A^2 \cdot m_o \cdot g \cdot a}{4 \cdot \pi^2} \quad (15)$$

$$I_A = \frac{0,74222^2 \cdot 0,492 \cdot 9,81 \cdot 0,10726}{4 \cdot \pi^2} = 0,0072236 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

T_A [s] – délka periody kmitu při zavěšení v bodě A

m_o [kg] – celková hmotnost ojnice

g [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$] – tíhové zrychlení

a [m] – vzdálenost bodu A od těžiště T

Moment setrvačnosti k těžišti T

$$I_T = I_A - m_o \cdot a^2 \quad (16)$$

$$I_T = 7,2236 \cdot 10^{-3} - 0,492 \cdot 0,10726^2 = 0,0015633 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

4.5.3 Výpočet redukovaných hmotností v tříbodové redukci

Redukovaná hmotnost translační části ojnice

$$m_A = \frac{I_T}{l_A \cdot (l_A + l_B)} \quad (17)$$

$$m_A = \frac{1,5633 \cdot 10^{-3}}{0,097262 \cdot (0,097262 + 0,035738)} = 0,12085 \text{ kg}$$

$$m_A = 120,85 \text{ g}$$

l_A [m] – vzdálenost těžiště od osy pístního čepu

l_B [m] – vzdálenost těžiště od osy čepu klikového hřídele

Bakalářská práce
Píst zážehového motoru závodní verze škoda 110
Jakub Gerák

Redukovaná hmotnost rotační části ojnice

$$m_B = \frac{l_A}{l_B} \cdot m_A \quad (18)$$

$$m_B = \frac{0,097262}{0,035738} \cdot 0,12085 = 0,3289kg$$

$$m_B = 328,9g$$

l_A [m] – vzdálenost těžiště od osy pístního čepu

l_B [m] – vzdálenost těžiště od osy čepu klikového hřídele

m_A [kg] – redukovaná hmotnost translační části ojnice

Redukovaná hmotnost ojnice v těžišti

$$m_T = m_o - m_A - m_B \quad (19)$$

$$m_T = 0,492 - 0,12085 - 0,3289 = 0,04225kg$$

$$m_T = 42,25g$$

m_o [kg] – celková hmotnost ojnice

4.5.4 Výpočet redukovaných hmotností ve dvoubodové redukci

Redukovaná hmotnost translační části ojnice ve dvoubodové redukci

$$m_{ot} = m_A + m_T \cdot \frac{l_B}{l_o} \quad (20)$$

$$m_{ot} = 0,12085 + 0,04225 \cdot \frac{0,035738}{0,133} = 0,132203kg$$

$$m_{ot} = 132g$$

l_o [m] – délka ojnice

Redukovaná hmotnost rotační části ojnice ve dvoubodové redukci

$$m_{or} = m_B + m_T \cdot \frac{l_A}{l_o} \quad (21)$$

$$m_{ot} = 0,03289 + 0,04225 \cdot \frac{0,097262}{0,133} = 0,3598kg$$

$$m_{or} = 360g$$

m_B [kg] – redukovaná hmotnost rotační části ojnice

m_T [kg] – redukovaná hmotnost ojnice v těžišti

l_A [m] – vzdálenost těžiště od osy pístního čepu

l_o [m] – délka ojnice

5 Pevnostní výpočet a kontrola pístu

5.1 Pevnostní výpočet pístu

5.1.1 Pevnostní výpočet druhého můstku

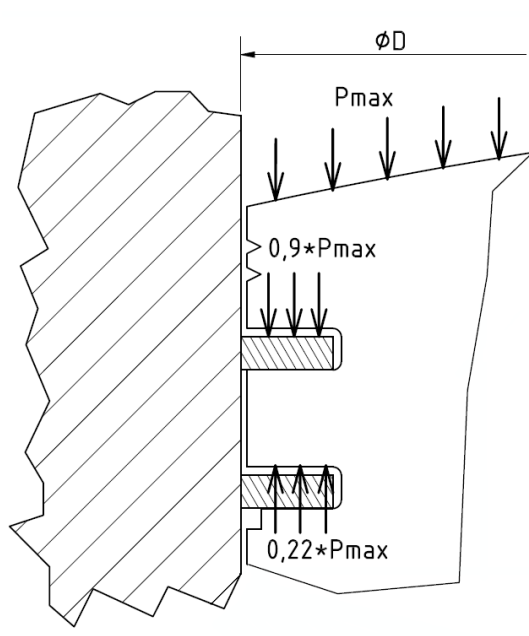
Druhý můstek je vysoce namáhán silami od tlaku plynů a zároveň i vysokými teplotami ve spalovacím prostoru. Nárůst těchto sil při nadměrném zvýšení výkonu motoru a tím i maximálního tlaku mohl způsobit odlomení tohoto můstku. [2]



Obr. 8 Druhý můstek v místě poškození

Bakalářská práce
Píst zážehového motoru závodní verze škoda 110
Jakub Gerák

Síla do tlaku plynů namáhá můstek jako na vetknutý nosník na ohyb a střih. Přibližné rozložení tlaků na jednotlivé plochy v drážkách pro pístní kroužky je uvedeno na obr. 9.



Obr. 9 Přibližné rozložení tlaků v drážkách pro pístní kroužky [1]

Z náhradního indikátorového diagramu je zjištěna maximální hodnota tlaku plynů ve spalovacím prostoru 6,94 MPa.

Síla na druhý můstek od tlaku plynů

$$F_m = \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d_m^2) \cdot 0,68 \cdot p_{max} \quad (22)$$

$$F_m = \frac{\pi}{4} \cdot (0,0732^2 - 0,0662^2) \cdot 0,68 \cdot 6,94 \cdot 10^6 = 3616,775N$$

$$F_m = 3617N$$

D [m] – průměr vrtání válců

d_m [m] – průměr pístu v drážce pro pístní kroužek

p_{max} [Pa] – maximální tlak plynů ve spalovacím prostoru

Bakalářská práce
Píst zážehového motoru závodní verze škoda 110
Jakub Gerák

Ohybový moment působící na druhý můstek

$$M_o = F_m \cdot \frac{D - d_m}{4} \quad (23)$$

$$M_o = 3617 \cdot \frac{0,0732 - 0,0662}{4} = 6,32975Nm$$

$$M_o = 6,33Nm$$

D [m] – průměr vrtání válců

d_m [m] – průměr pístu v drážce pro pístní kroužek

F_m [N] – síla na druhý můstek od tlaku plynů

Modul odporu v ohybu druhého můstku

$$W_o = \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot d_m \cdot H_{m2}^2 \quad (24)$$

$$W_o = \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot 0,0662 \cdot 0,0035^2 = 4,2461 \cdot 10^{-7}m^3$$

$$W_o = 4,25 \cdot 10^{-7}m^3$$

H_{m2} [m] – výška druhého můstku

Ohybové napětí

$$\sigma_o = \frac{M_o}{W_o} \quad (25)$$

$$\sigma_o = \frac{6,33}{4,25 \cdot 10^{-7}} = 14,894MPa$$

$$\sigma_o = 14,9MPa$$

Bakalářská práce
Píst zážehového motoru závodní verze škoda 110
Jakub Gerák

Průřez v místě vetknutí

$$S_v = \pi \cdot d_m \cdot H_{m2} \quad (26)$$

$$S_v = \pi \cdot 0,0662 \cdot 0,0035 = 7,2791 \cdot 10^{-4} m^2$$

$$S_v = 7,28 \cdot 10^{-4} m^2$$

d_m [m] – průměr pístu v drážce pro pístní kroužek

H_{m2} [m] – výška druhého můstku

Smykové napětí

$$\tau = \frac{F_m}{S_v} \quad (27)$$

$$\tau = \frac{3617}{7,28 \cdot 10^{-4}} = 4,9684 MPa$$

$$\tau = 4,97 MPa$$

F_m [N] – síla na druhý můstek od tlaku plynů

Výsledné redukované napětí

$$\sigma_{red} = \sqrt{(\sigma_o^2 + 3 \cdot \tau^2)} \quad (28)$$

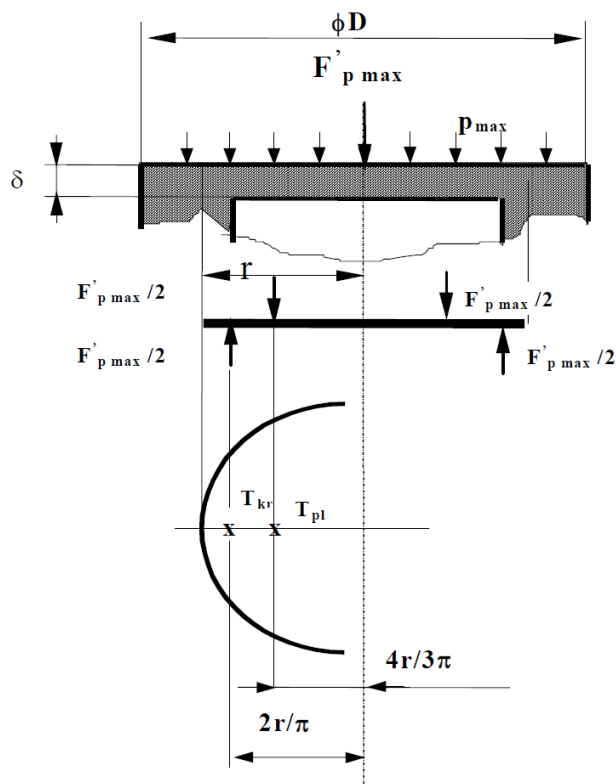
$$\sigma_{red} = \sqrt{(14,9^2 + 3 \cdot 4,97^2)} = 17,208 MPa$$

$$\sigma_{red} = 17,2 MPa$$

σ_o [m] – ohybové napětí můstku

Při zohlednění vrubových účinků a snížení pevnosti při tepelném zatížení by redukované napětí hliníkové slitiny nemělo přesahovat hodnotu 60-80MPa. Hodnota redukovaného napětí nebyla přesažena. Můstek je dimenzován s dostatečnou bezpečností. [1]

5.1.2 Pevnostní výpočet dna pístu



Obr. 10 Zatížení dna pístu a výpočtový model [1]

Kruhovou desku lze nahradit přímým nosníkem, který je zatěžován ve vzdálenosti těžiště půlkruhové desky. [1]

Maximální síla působící na kruhovou desku

$$F'_{p \max} = \pi \cdot r^2 \cdot p_{\max} \quad (29)$$

$$F'_{p \max} = \pi \cdot 0,028^2 \cdot 6,94 \cdot 10^6 = 17093,28N$$

$$F'_{p \max} = 17,1kN$$

r [m] – poloměr vetknutí

p_{\max} [Pa] – maximální tlak plynů

Bakalářská práce
Píst zážehového motoru závodní verze škoda 110
Jakub Gerák

Maximální ohybový moment desky

Maximální ohybový moment je u nahrazujícího nosníku ve středu jeho délky.

$$M'_{o \max} = \frac{F'_{p \max}}{\pi} \cdot \frac{r_v}{3} \quad (30)$$

$$M'_{o \max} = \frac{17100}{\pi} \cdot \frac{0,028}{3} = 50,8Nm$$

$$M'_{o \max} = 50,8Nm$$

$F'_{p \max}$ [N] – maximální síla působící na kruhovou desku

r [m] – poloměr vetknutí

Průřezový modul v ohybu

$$W'_o = \frac{1}{3} \cdot r_v \cdot \delta^2 \quad (31)$$

$$W'_o = \frac{1}{3} \cdot 0,028 \cdot 0,0056^2 = 2,9269 \cdot 10^{-7}m^3$$

$$W'_o = 2,93 \cdot 10^{-7}m^3$$

δ [m] – výška dna pístu

Ohybové napětí pro vetknutý nosník

$$\sigma'_o = \frac{M'_{o \max}}{W'_o} \quad (32)$$

$$\sigma'_o = \frac{50,8}{2,93 \cdot 10^{-7}} = 173378839,6Pa$$

$$\sigma'_o = 173,4MPa$$

Dno pístu zážehového motoru je možno považovat za vetknutou desku. Napětí je silně ovlivněno vetknutím desky.

Ohybové napětí pro vetknutou desku

$$\sigma'_{o \max} = 0,25 \cdot \sigma'_o \quad (33)$$

$$\sigma'_{o \max} = 0,25 \cdot 173,4 \cdot 10^6 = 43,35 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

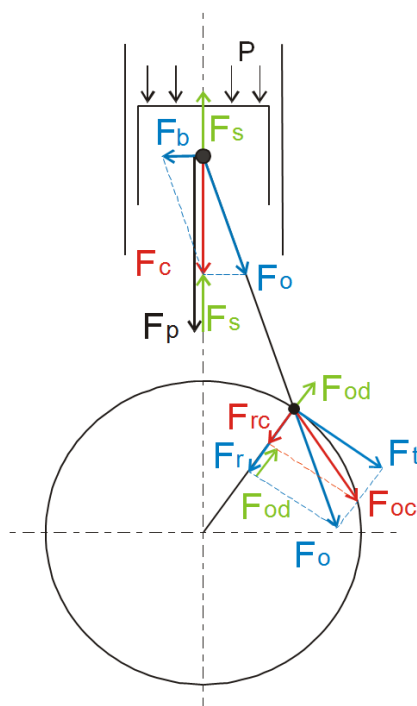
$$\sigma'_{o \max} = 43,35 \text{ MPa}$$

σ'_o [Pa] – ohybové napětí pro vetknutý nosník

Maximální dovolená hodnota napětí pro hliníkové slitiny je u dna pístu podepřenými nízkými žebry 40 až 50MPa, vypočítané napětí tady vyhovuje. [1]

5.1.3 Měrný tlak na plášť pístu

Tlak na plášť pístu je vyvoláván působením normálové síly pístu na stěnu válce. Normálová síla je určena kinematikou klikového mechanismu a průběhem tlaku ve spalovacím prostoru. Maximální velikosti síla nabývá krátce po horní úvratí při expanzním zdvihu. [1]



Obr. 11 Silové zatížení klikového mechanismu [3]

Bakalářská práce
Píst zážehového motoru závodní verze škoda 110
Jakub Gerák

Hmotnost pístní skupiny

Hmotnost pístní skupiny je rovna součtu hmotností všech jejích součástí. Do pístní skupiny jsou zahrnuty pístní kroužky, píst, pístní čep, pojistné kroužky pístního čepu.

Hmotnost pístu: $m_p = 229 \text{ g}$

Hmotnost pístních kroužků: $m_{pk} = 26 \text{ g}$

Hmotnost pístního čepu a pojistek: $m_{pč} = 82 \text{ g}$

$$m_{ps} = \sum m_i = m_p + m_{pk} + m_{pč} \quad (34)$$

$$m_{ps} = 0,229 + 0,026 + 0,082 = 0,337 \text{ kg}$$

$$m_{ps} = 337 \text{ g}$$

Úhel odklonění ojnice

Úhel odklonění ojnice je závislý na úhlu natočení klikového hřídele. Tato závislost je vyjádřena vztahem:

$$\beta_i = \sin^{-1}(\lambda_o \cdot \sin(\alpha_i))$$

λ_o [-] – ojniční poměr

α [°] – úhel natočení klikového hřídele

Celková síla působící na píst ve směru pohybu pístu

Celková síla je dána součtem síly působící od tlaku plynů na plochu dna pístu a setrvačné síly vzniklé zrychlením částí mechanismu vykonávajících translační pohyb. Hmotnost částí mechanismu vykonávajících translační pohyb je dána součtem hmotností pístní skupiny a hmotností hmotného bodu vykonávajícího translační pohyb podle dvoubodové redukce nahrazující silové působení ojnice.

Bakalářská práce
Píst zážehového motoru závodní verze škoda 110
Jakub Gerák

Vztah pro výpočet síly od tlaku plynů

$$F_{pi} = p_i \cdot S$$

p [Pa] – indikovaný tlak

S [m²] – plocha dna pístu

Vztah pro výpočet setrvačné síly

$$F_{si} = -(m_{ps} + m_{ot}) \cdot a_i$$

$$F_{si} = -(m_{ps} + m_{ot}) \cdot r \cdot \omega^2 \cdot (\cos \alpha_i + \lambda \cdot \cos 2 \cdot \alpha_i)$$

m_{ps} [kg] – hmotnost pístní skupiny

m_{ot} [kg] – hmotnost translační části ojnice podle dvoubob redukce

Vztah pro výpočet síly celkové síly

$$F_{ci} = F_{pi} + F_{si}$$

Maximální velikost normálové síly na píst

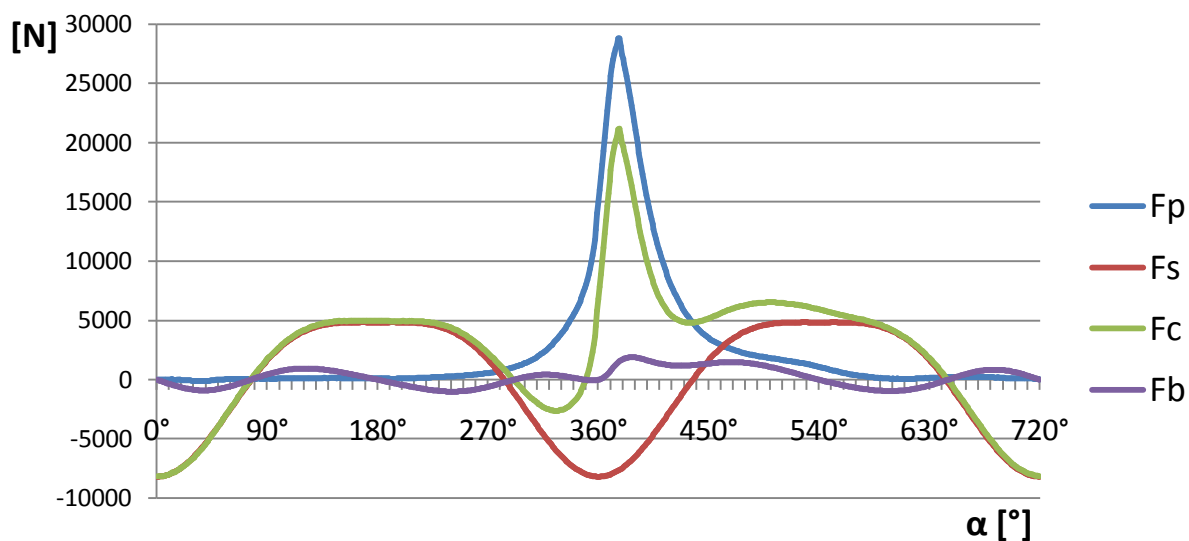
Normálová síla je závislá na velikosti celkové síly působící ve směru pohybu pístu a na úhlu odklonění ojnice. Tato závislost je vyjádřena vztahem:

$$F_{bi} = F_{ci} \cdot \tan(\beta_i)$$

β [°] – úhel odklonění ojnice

Hodnota normálové síly je vypočítána podle uvedených vztahů, pro každou naměřenou hodnotu tlaku v náhradním indikátorovém diagramu. Tedy pro natočení klikového hřídele po jednom stupni.

Bakalářská práce
Píst zážehového motoru závodní verze škoda 110
Jakub Gerák



Obr. 12 Silové působení pístu

Z vypočítaných hodnot vyplývá, že maximální hodnoty normálová síly nabývá 27 stupňů po horní úvrati při expanzním zdvihu.

$$F_{bm} = 1911,7 \text{ N}$$

Maximální hodnota měrného tlaku na plášť pístu

Maximální hodnota měrného tlaku na plášť pístu je dána maximální hodnotou normálové síly působící na píst a nosnou plochou pláště pístu. Nosná plocha pláště pístu je vypočítána vynásobením nosné výšky a nosné šířky pláště pístu.

Nosná výška pláště pístu: $L_{pl} = 66 \text{ mm}$

Nosná šířka pláště pístu: $D_{pl} = 44,2 \text{ mm}$

$$p_{pl} = \frac{F_{bm}}{D_{pl} \cdot L_{pl}} \tag{35}$$

$$p_{pl} = \frac{1911,7}{0,0442 \cdot 0,066} = 655320 \text{ Pa}$$

$$p_{pl} = 0,655 \text{ MPa}$$

Doporučená hodnota maximálního měrného tlaku je 0,6 až 1,4 MPa, vypočítaný maximální tlak je tedy vyhovující. [1]

5.1.4 Nejslabšího místa pláště pístu namáhané tlakem

Nejslabším místem pláště pístu je příčný průřez přes drážku pro stírací kroužek. Toto místo je zeslabeno drážkou a zároveň vyvrtanými otvory pro odtok oleje. Je namáháno tlakem od působení silových účinku tlaku plynů nad pístem.

Maximální síla působící na píst od tlaku plynů

$$F_{pmax} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot p_{max} \quad (36)$$

$$F_{pmax} = \frac{\pi \cdot 0,0732^2}{4} \cdot 6,94 \cdot 10^6 = 29206N$$

$$F_{pmax} = 29200N$$

D [m] – průměr vrtání válců

p_{max} [Pa] – maximální tlak plynů ve spalovacím prostoru

Minimální plocha příčného průřezu

$$S_x = 928,2mm^2$$

Zjištěno z modelu programu Autodesk Inventor 2013, plocha je zobrazena na obr. 13.



Obr. 13 Minimální plocha příčného průřezu

Bakalářská práce
Píst zážehového motoru závodní verze škoda 110
Jakub Gerák

Maximální napětí v tlaku

$$\sigma_{tlmax} = \frac{F_{pmax}}{S_x} \quad (37)$$

$$\sigma_{tlmax} = \frac{29200}{0,0009282} = 31458737Pa$$

$$\sigma_{tlmax} = 31,5MPa$$

F_{pmax} [N] – maximální síla působící na píst od tlaku plynů

S_x [m²] – minimální plocha příčného průřezu

Dovolená hodnota napětí pro hliníkové slitiny je 30 až 40MPa, vypočítané napětí tady vyhovuje. [1]

5.1.5 Nejslabšího místa pláště pístu namáhané tahem

K nebezpečnému namáhání tahem dochází ve stejném průřezu jako při namáhání tlakem a to na konci výfuku plynů. Na korunu pístu nad příčným průřezem působí setrvačná síla způsobena záporným zrychlením.

Maximální úhlová rychlost klikového hřídele

$$\omega_{max} = \frac{\pi \cdot n_{max}}{30} \quad (38)$$

$$\omega_{max} = \frac{\pi \cdot 8000}{30} = 837,76s^{-1}$$

$$\omega_{max} = 837,8s^{-1}$$

n_{max} [min⁻¹] – maximální otáčky motoru

Hmotnost koruny pístu nad řešeným průřezem

$$m_x = 108g = 0,108kg$$

Zjištěno z modelu pomocí programu Autodesk Inventor 2013, koruna pístu je na obrázku 10.

Setrvačná síla působící na korunu pístu

$$F_{sx} = m_x \cdot r_k \cdot \omega_{max}^2 \cdot (1 + \lambda_0) \quad (39)$$

$$F_{sx} = 0,108 \cdot 0,034 \cdot 837,8^2 \cdot (1 + 0,2556) = 3235,9717N$$

$$F_{sx} = 3236N$$

m_x [kg] – hmotnost koruny pístu nad řešeným průřezem

r_k [m] – poloměr klikového hřídele

ω_{max} [s⁻¹] – maximální úhlová rychlost klikového hřídele

λ_0 [-] – ojnicní poměr

Tahové napětí v průřezu

$$\sigma_t = \frac{F_{sx}}{S_x} \quad (40)$$

$$\sigma_t = \frac{3236}{0,0009282} = 3,4863MPa$$

$$\sigma_t = 3,49MPa$$

S_x [m²] – minimální plocha příčného průřezu

Maximální dovolené napětí v tahu pro hliníkové slitiny je 4 až 10MPa, takže napětí σ_t vyhovuje. [1]

5.2 Kontrola pístu

5.2.1 Kontrola mechanického poškození vadného pístu

Na třetím můstku mezi drážkami pro pístní kroužky je několik desítek milimetrů dlouhá rýha způsobena pravděpodobně nástrojem při soustružení drážky pro třetí stírací kroužek. Podle tvaru a směru rýhy, zřejmě došlo při této operaci k uvolnění uchycení pístu ve stroji. Píst pak musel být znovu uchycen.

Rýha od nástroje je zachycena na obr. 14.



Obr. 14 Poškození pístu od nástroje

Kontrola sousostí drážek pro kroužky a pláště pístu

Proměření ukazuje, že drážka pro třetí pístní kroužek má osu shodnou s osou pláště pístu. Drážky pro první a druhý pístní kroužek jsou vyoseny o 0,4mm od osy pláště pístu. Vyosení bylo zřejmě způsobeno opětovným upnutím obrobku. Nesousost prvních dvou drážek pístních kroužků a pláště pístu způsobuje proměnou hloubku drážek.

5.2.2 Pevnostní výpočet druhého můstku v místě největší hloubky drážek

V místě největší hloubky drážek je napětí v namáhaném můstku vyšší než napětí spočítané pro konstantní hloubku drážek. Drážky dosahují maximální hloubky právě v místě, ve kterém došlo k odlomení druhého můstku. Pro zjednodušení výpočtu je proměnná hloubka drážky nahrazena konstantní o velikosti maximální hloubky.

Náhradní průměr drážky

$$d_{m2} = d_m - 2 \cdot x \tag{41}$$

$$d_{m2} = 0,0662 - 2 \cdot 0,0004 = 0,0654m$$

$$d_{m2} = 65,4mm$$

d_m [m] – průměr pístu v drážce pro pístní kroužek

x [m] – vyosení drážek pro pístní kroužky

Bakalářská práce
Píst zážehového motoru závodní verze škoda 110
Jakub Gerák

Síla na druhý náhradní můstek od tlaku plynů

$$F_{m2} = \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d_{m2}^2) \cdot 0,68 \cdot p_{max} \quad (42)$$

$$F_{m2} = \frac{\pi}{4} \cdot (0,0732^2 - 0,0654^2) \cdot 0,68 \cdot 6,94 \cdot 10^6 = 4006,97N$$

$$F_{m2} = 4007N$$

D [m] – průměr vrtání válců

d_{m2} [m] – náhradní průměr pístu v drážce pro pístní kroužek

p_{max} [Pa] – maximální tlak plynů ve spalovacím prostoru

Ohybový moment působící na druhý náhradní můstek

$$M_{o2} = F_{m2} \cdot \frac{D - d_{m2}}{4} \quad (43)$$

$$M_{o2} = 4007 \cdot \frac{0,0732 - 0,0654}{4} = 7,81365Nm$$

$$M_{o2} = 7,81Nm$$

Modul odporu v ohybu druhého náhradního můstku

$$W_{o2} = \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot d_{m2} \cdot H_{m2}^2 \quad (44)$$

$$W_{o2} = \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot 0,0654 \cdot 0,0035^2 = 4,1948 \cdot 10^{-7}m^3$$

$$W_{o2} = 4,19 \cdot 10^{-7}m^3$$

H_{m2} [m] – výška druhého můstku

Bakalářská práce
Píst zážehového motoru závodní verze škoda 110
Jakub Gerák

Ohybové napětí náhradního můstku

$$\sigma_{o2} = \frac{M_{o2}}{W_{o2}} \quad (45)$$

$$\sigma_{o2} = \frac{7,81}{4,19 \cdot 10^{-7}} = 18,639 \text{MPa}$$

$$\sigma_{o2} = 18,64 \text{MPa}$$

M_{o2} [Nm] – ohybový moment působící na druhý náhradní můstek

W_{o2} [m³] – Modul odporu v ohybu druhého náhradního můstku

Průřez v místě vetknutí náhradního můstku

$$S_{v2} = \pi \cdot d_{m2} \cdot H_{m2} \quad (46)$$

$$S_{v2} = \pi \cdot 0,0654 \cdot 0,0035 = 7,1911 \cdot 10^{-4} \text{m}^2$$

$$S_{v2} = 7,19 \cdot 10^{-4} \text{m}^2$$

d_{m2} [m] – náhradní průměr pístu v drážce pro pístní kroužek

H_{m2} [m] – výška druhého můstku

Smykové napětí náhradního můstku

$$\tau_2 = \frac{F_{m2}}{S_{v2}} \quad (47)$$

$$\tau_2 = \frac{4007}{7,19 \cdot 10^{-4}} = 5,573 \text{MPa}$$

$$\tau_2 = 5,57 \text{MPa}$$

F_{m2} [N] – síla na druhý náhradní můstek od tlaku plynů

Výsledné redukované napětí

$$\sigma_{red2} = \sqrt{(\sigma_{o2}^2 + 3 \cdot \tau_2^2)} \quad (48)$$

$$\sigma_{red2} = \sqrt{(18,64^2 + 3 \cdot 5,57^2)} = 20,9887MPa$$

$$\sigma_{red2} = 21MPa$$

σ_{o2} [Pa] – ohybové napětí náhradního můstku

τ_2 [Pa] – smykové napětí náhradního můstku

Při zvýšeném namáhání z důvodu změny geometrie drážky, napětí nepřesahuje doporučenou maximální hodnotu 60 až 80MPa. [1]

5.2.3 Detailní kontrola geometrie drážky pro první pístní kroužek

Při zběžném prohlédnutí drážek pro pístní kroužky se zdá být rádius mezi vetknutým můstkem a pláštěm pístu na dně drážky téměř nulový. Doporučený minimální rádius je přitom 0,3mm. Příliš malý rádius zvyšuje koncentraci napětí a mohl by způsobit odlomení nejvíce zatíženého můstku.

Kontrola rádiusu

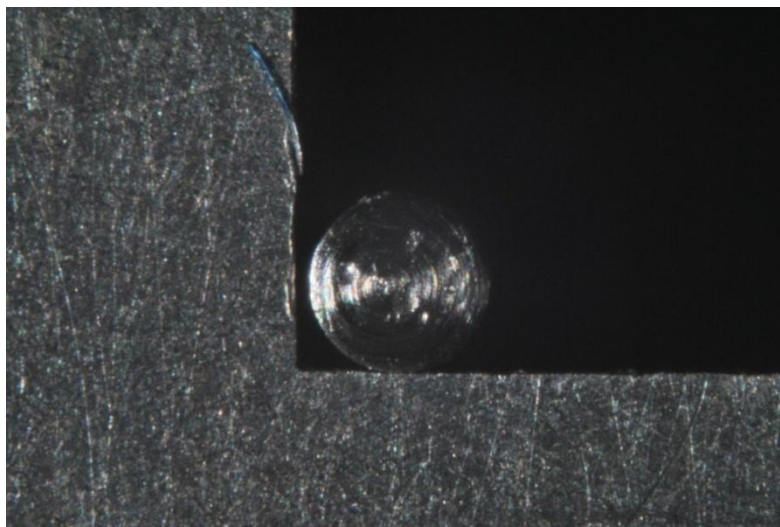
Jako průkazné znázornění profilu drážky je zvoleno pořízení makrofotografie vzorku.

Píst je připraven pro vzorek podélným řezem a následnou úpravou povrchu řezu broušením. Konečné broušení je provedeno vodním brusným papírem se zrnitostí P2000. Pro porovnání skutečného rádiusu s doporučenou minimální hodnotou je do drážky vložen do těsné blízkosti vetknutí předmět kruhového tvaru o poloměru 0,3mm. Z takto připraveného vzorku je pořízena fotografie zachycující oblast o rozměrech přibližně 2,65x1,75mm.

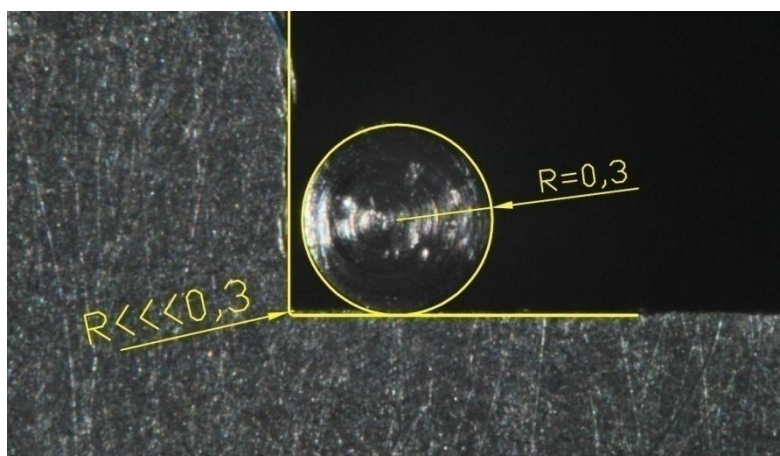
Použité fotografické zařízení: digitální zrcadlový fotoaparát Nikon D3000, objektiv Pentacon 1.8/50, 2x convertor 1:2, makrokroužky o celkové délce 77mm, redukce závitu 42mm na bajonet Nikon F, externí blesk se spojovacím kabelem.

Fotografie je vyobrazena na obr. 15 a 16.

Bakalářská práce
Píst zážehového motoru závodní verze škoda 110
Jakub Gerák



Obr. 15 Místo vetknutí



Obr. 16 Místo vetknutí s popisem

Hodnocení fotografie

Z fotografie je zcela zřejmé, že rádius je mnohem menší, než je minimální doporučená hodnota. Skutečná hodnota rádiusu je asi 0,01mm. V tomto místě tedy dochází k výraznému zvýšení koncentrace napětí, které způsobí odlomení části nebo celého můstku mezi prvním a druhým stíracím kroužkem.

6 Závěr

Hlavním cílem mé práce bylo zjistit příčinu závady pístu Metalex pro závodní Škodu 110 a provést kontrolu pevnostním výpočtem ostatních nejvíce namáhaných částí pístu. Závada pístu se projevila odlomením části můstku mezi prvním a druhým stíracím kroužkem.

Práce je složena ze dvou základních částí. A to z části popisující konkrétní závodní Škodu 110, u které došlo k závadě pístu a na část zabývající se kontrolními výpočty spojenými se zjištěním původu závady.

Kontrolní výpočty nejvíce namáhaných částí pístu ukazují, že píst je navržen a zkonstruován tak, aby odolal namáhání i u motoru s vysokým navýšením výkonu jako je tento. Zároveň však napětí od namáhání se u většiny kontrolovaných částí blíží k hranici maximálního doporučeného napětí. Z tohoto důvodu není možné navrhnout změny vedoucí k významnému snížení hmotnosti pístu.

Kontrolní výpočty nepotvrdily nedostatečnou výšku nejvíce namáhaného můstku, právě naopak. Můstek by měl namáhání odolávat s dostatečnou bezpečností. Kontrola poškození ukázala, že je píst poškozen pravděpodobně od nástroje při soustružení drážek pro pístní kroužky, kdy mohlo dojít k uvolnění pístu. Opětné uchycení způsobuje vyosení drážek, které způsobuje zvýšené namáhání části můstku právě v místě poškození. Redukované napětí je však v nejvíce namáhaném místě zvýšeno pouze o 22%, což zdaleka nepřekračuje maximální hodnotu doporučeného napětí. Tato závada tedy nemůže způsobit odlomení části můstku.

Při detailní kontrole drážky bylo zjištěno nedodržení minimálního doporučeného rádiusu v místě vetknutí můstku. Minimální doporučený rádius 0,3 mm způsobuje koncentraci napětí, která je předpokladem zahrnutým v hodnotě maximálního doporučeného napětí ve vetknutí můstku. Skutečný rádius je ale přibližně 0,01 mm, což způsobuje mnohonásobné zvýšení koncentrace napětí, které způsobuje tvorbu trhlin a následné odlomení pístního můstku. Toto základní porušení geometrie drážky pro pístní kroužek je zjištěno u všech čtyř pístů.

Vzhledem ke značným zkušenostem firmy Metalex ve výrobě závodních motorů je možnost pochybení při návrhu konstrukce pístu velmi malá. K porušení základních konstrukčních zásad došlo pravděpodobně při výrobě.

Pro přesnější pevnostní kontrolu pístu je možno použít metodu konečných prvků v simulačním programu. Tato metoda ale není v zadání mé práce a nepatří do rozsahu mého dosavadního studia. Splnil jsem všechny body zadání práce.

7 Seznam použité literatury

- [1] RAUSCHER, Jaroslav. *Ročníkový projekt: Učební texty vysokých škol*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2005.
- [2] RAUSCHER, Jaroslav. *Vozidlové motory: Učební texty vysokých škol*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2004.
- [3] KOŽOUŠEK, Josef. *Výpočet a konstrukce spalovacích motorů II*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1983. ISBN 04-222-83.
- [4] BAŤA, Vincenc. *Údržba a opravy vozů Škoda 100, 100L, 110L, 110LS a 110R*. Čtvrté, upravené a doplněné vydání. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1983. ISBN 04-226-83.
- [5] KOLEKTIV VÚNM A ČKD. *Naftové motory čtyřdobé: I.díl*. Druhé vydání. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1962. ISBN 04-274-62.
- [6] Wikimedia.commons.org. [online]. [cit. 2013-05-16]. Dostupné z:
<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Skoda-110LS.jpg?uselang=cs>

8 Seznam použitých symbolů

a	[ms^{-2}]	Zrychlení pístu
A_i	[J]	Práce cyklu z indikátorového diagramu
D	[mm]	Průměr vrtání válců
d_m	[mm]	Průměr pístu v drážce pro pístní kroužek
d_{m2}	[mm]	Náhradní průměr pístu v drážce pro pístní kroužek
D_{pl}	[mm]	Nosná šířka pláště pístu
$F_{b \max}$	[N]	Maximální normálová síla působící na píst
F_{bi}	[N]	Normálová síla působící na píst
F_{ci}	[N]	Celková síla působící na píst ve směru pohybu pístu
F_m	[N]	Síla na druhý můstek od tlaku plynů
F_{m2}	[N]	Síla na náhradní druhý můstek od tlaku plynů
$F_{p \max}$	[N]	Síla na píst od tlaku plynů
$F'_{p \max}$	[N]	Maximální síla působící na píst od tlaku plynů
F_{pi}	[N]	Síla působící na píst od tlaku plynů
F_{si}	[N]	Setrvačná síla působící na píst
F_{sx}	[N]	Setrvačná síla působící na korunu pístu
l_o	[mm]	Délka ojnice
L_{pl}	[mm]	Nosná výška pláště pístu
M_o	[Nm]	Ohybový moment působící na druhý můstek
m_o	[g]	Hmotnost ojnice
$M'_{o \max}$	[Nm]	Maximální ohybový moment desky
M_{o2}	[Nm]	Ohybový moment působící na náhradní druhý můstek
m_{or}	[g]	Redukovaná hmotnost rotační části ojnice ve dvoubodové redukci
m_{ot}	[g]	Redukovaná hmotnost translační části ojnice ve dvoubodové redukci
m_p	[g]	Hmotnost pístu
$m_{p\check{c}}$	[g]	Hmotnost pístního čepu
m_{pk}	[g]	Hmotnost pístních kroužků
m_{ps}	[g]	Hmotnost pístní skupiny
m_x	[g]	Hmotnost koruny pístu nad řešeným průřezem
n	[min^{-1}]	Jmenovité otáčky motoru
n_{\max}	[min^{-1}]	Maximální otáčky motoru
p_E	[MPa]	Střední efektivní tlak
p_i	[MPa]	Střední indikovaný tlak
p_{\max}	[MPa]	Maximální tlak plynů ve spalovacím prostoru

Bakalářská práce
Píst zážehového motoru závodní verze škoda 110
Jakub Gerák

P_{\max}	[kW]	Maximální výkon motoru
r_k	[mm]	Poloměr klikového hřídele
S	[m ²]	Plocha dna pístu
s	[m]	Poloha pístu
S_v	[m ²]	Průřez v místě vetknutí
S_{v2}	[m ²]	Průřez v místě vetknutí náhradního druhého můstku
S_x	[mm ²]	Minimální plocha příčného průřezu
v	[ms ⁻¹]	Rychlost pístu
W_o	[m ³]	Modul odporu v ohybu druhého můstku
W_{o2}	[m ³]	Modul odporu v ohybu náhradního druhého můstku
α	[°]	Úhel natočení klikového hřídele
α_i	[°]	Úhel natočení klikového hřídele
β_i	[°]	Úhel odklonění ojnice
λ_o	[-]	Ojniční poměr
σ_o	[MPa]	Ohybové napětí
σ_{o2}	[MPa]	Ohybové napětí náhradního druhého můstku
σ_{red}	[MPa]	Redukované napětí
$\sigma_{\text{red}2}$	[MPa]	Redukované napětí náhradního druhého můstku
σ_t	[MPa]	Napětí v tahu
$\sigma_{t \max}$	[MPa]	Napětí v tlaku
τ	[MPa]	Smykové napětí
τ_2	[MPa]	Smykové napětí náhradního druhého můstku
ω	[s ⁻¹]	Jmenovitá úhlová rychlost
ω_{\max}	[s ⁻¹]	Maximální úhlová rychlost