



**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 redukovaných hmotností v třibodové redukci.....	27
4.5.4	Výpočet redukovaných 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 zádi 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, nepřepřehňovaný, řadový čtyřválec s osmy ventily a rozvodem OHV. Zdvihový objem motoru je 1107cm<sup>3</sup> 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<sup>-1</sup> 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 obložением 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 cm<sup>3</sup> na 1145 cm<sup>3</sup>, i po úpravě motor zůstává ve stejné objemové kategorii do 1150 cm<sup>3</sup>.

### **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 chladícího 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<sup>-1</sup>] – 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  $\alpha$ .

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

Vztah pro výpočet rychlosti pohybu pístu v závislosti na úhlu natočení klikového hřídele  $\alpha$ .

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

Vztah pro výpočet zrychlení působící na píst v závislosti na úhlu natočení klikového hřídele  $\alpha$ .

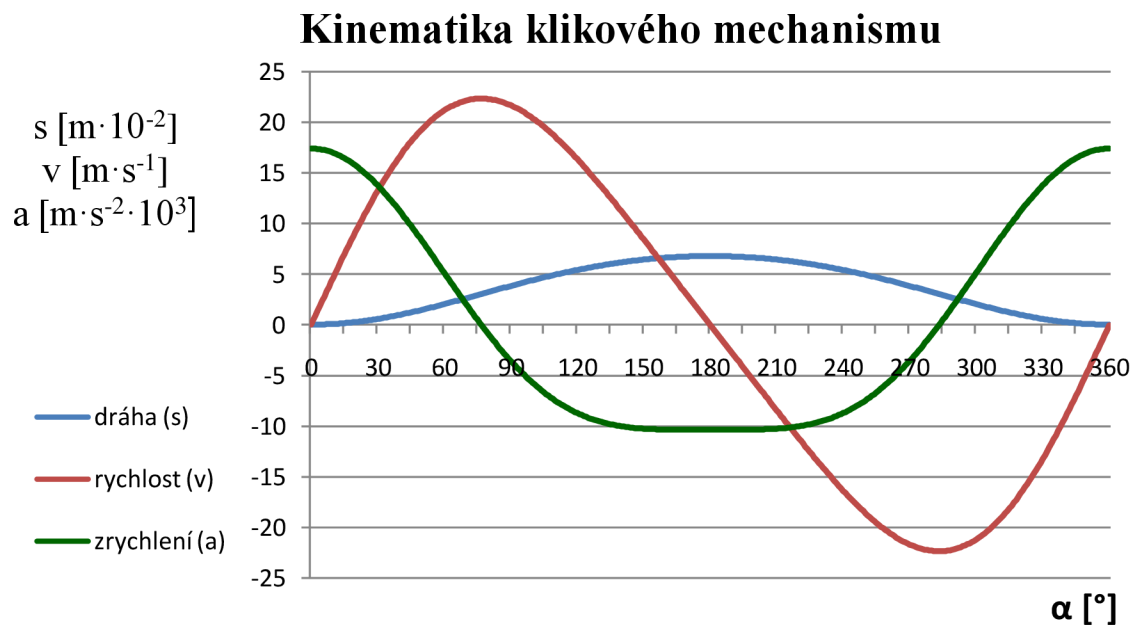
$$a(\alpha) = r_k \cdot \omega^2 \cdot (\cos \alpha + \lambda_o \cdot \cos 2 \cdot \alpha)$$

$r_k$  [m] – poloměr klikového hřídele

$\omega$  [ $s^{-1}$ ] – jmenovitá úhlová rychlost

$\alpha$  [ $^\circ$ ] – úhel natočení klikového hřídele

$\lambda_o$  [-] – 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 [m<sup>3</sup>] – zdvihový objem motoru

τ [-] – taktost motoru

n [min<sup>-1</sup>] – 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<sub>se</sub> [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  $270^\circ$  a  $450^\circ$  úhlu natočení klikového hřídele ( $\alpha$ ), 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  $\alpha$  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**

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

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

$$S = 4208mm^2$$

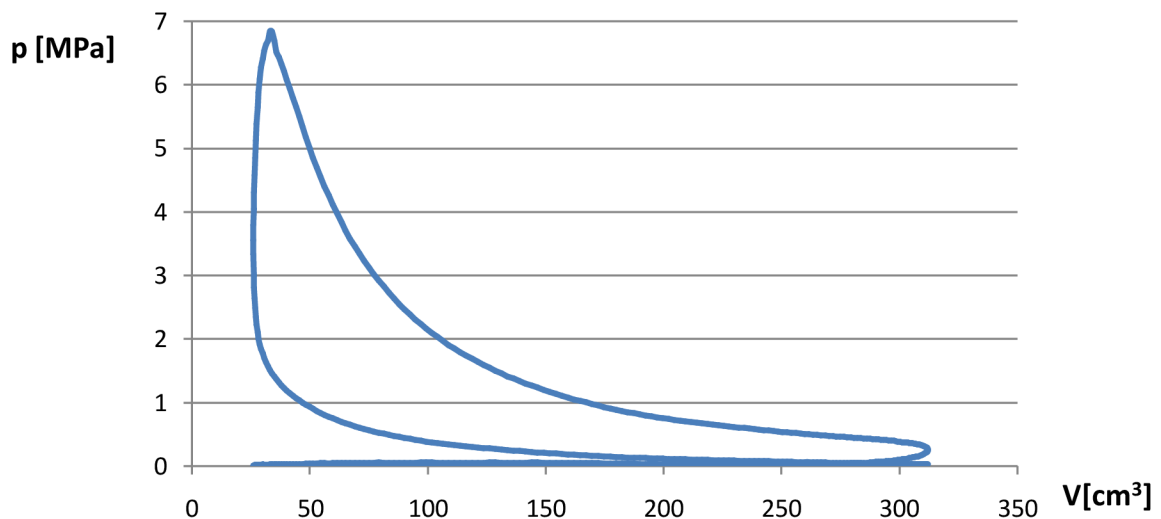
D [m] – průměr vrtání válců

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*

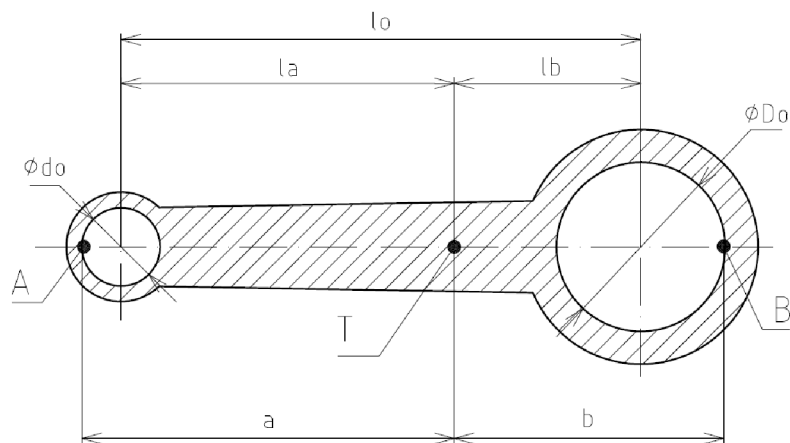
## 4.5 Rozdělení hmotnosti ojnice

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**

$$a = L - b \tag{12}$$

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

$$a = 107,262mm$$

L [m] – vzdálenost bodu A a B

b [m] – vzdálenost bodu B od těžiště T

**Vzdálenost těžiště od osy pístního čepu**

$$l_a = a - \frac{d_o}{2} \tag{13}$$

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

$$l_a = 97,262mm$$

d<sub>o</sub> [m] – průměr oka ojnice pro pístní čep

**Vzdálenost těžiště od osy čepu klikového hřídele**

$$l_b = b - \frac{D_o}{2} \tag{14}$$

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

$$l_b = 35,738mm$$

D<sub>o</sub> [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**

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

$$m_{ot} = 0,0,3289 + 0,04225 \cdot \frac{0,097262}{0,133} = 0,3598kg$$

$$m_{or} = 360g$$

$m_B$  [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]

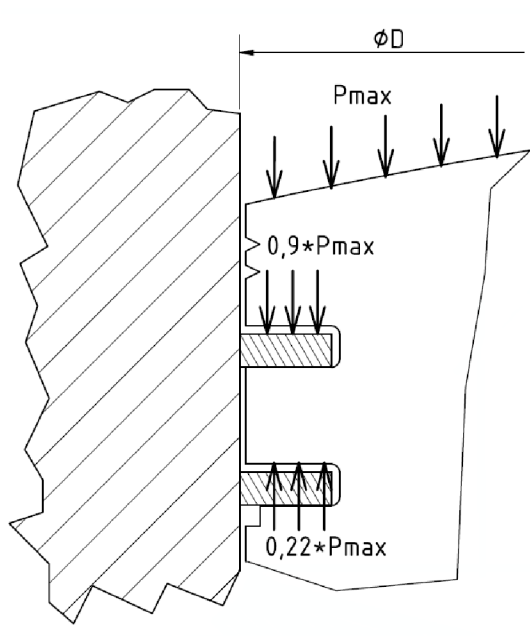


*Obr. 8 Druhý můstek v místě poškození*

**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

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

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

$$F_m = 3617 N$$

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<sub>m</sub> [m] – průměr pístu v drážce pro pístní kroužek

F<sub>m</sub> [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<sub>m2</sub> [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**

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

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

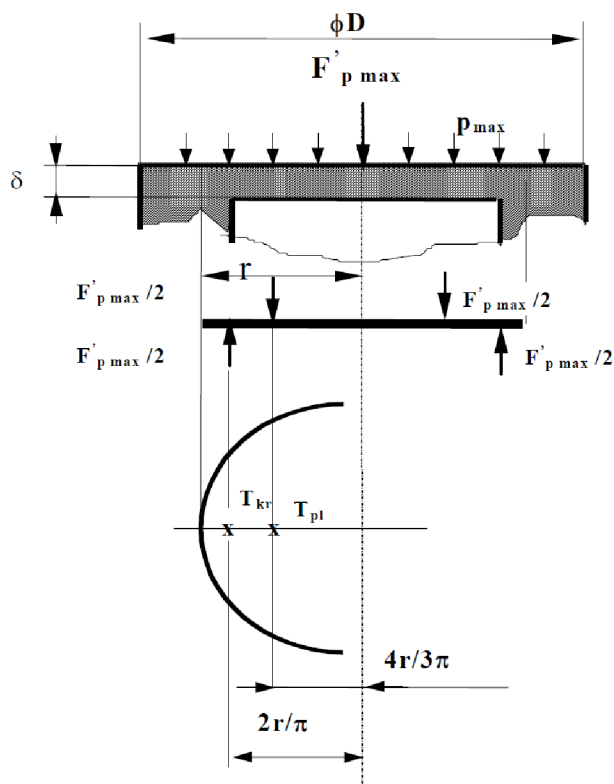
$$\sigma_{red} = 17,2 MPa$$

$\sigma_o$  [m] – ohybové napětí můstku

Při zohlednění vrubových účinků a snížení pevnosti při tepelném zatížení by redukované napětí hlinkové 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.

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

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

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

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

$r$  [m] – poloměr vetknutí

### Průřezový modul v ohybu

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

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

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

$\delta$  [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

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

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

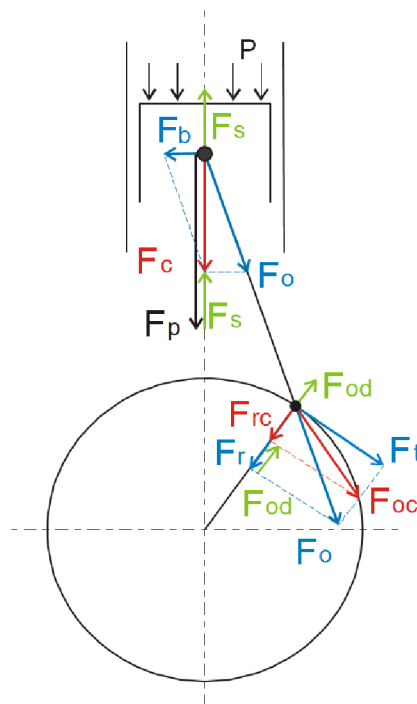
$$\sigma'_{o \max} = 43,35 \text{ MPa}$$

$\sigma'_o$  [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:

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

$\lambda_o$  [-] – ojniční poměr

$\alpha$  [°] – 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 [m<sup>2</sup>] – 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<sub>ps</sub> [kg] – hmotnost pístní skupiny

m<sub>ot</sub> [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**

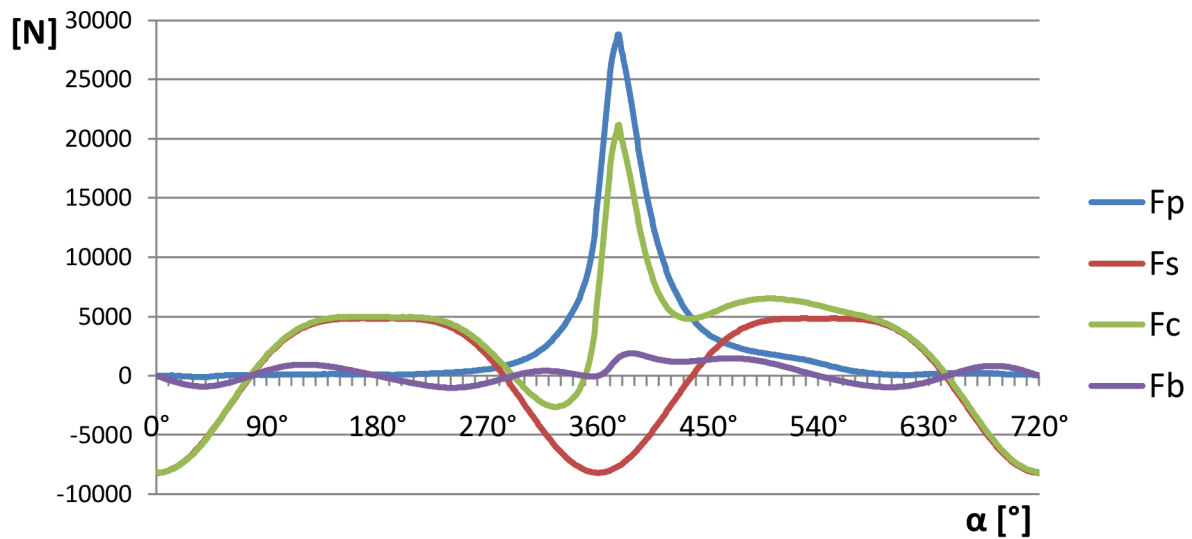
Normálová síla je závislá na velikosti celkové síly působící ve směru pohybu pístu a na úhlu odklonění ojnice. Tato závislost je vyjádřena vztahem:

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

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<sub>max</sub> [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

$S_x$  [m<sup>2</sup>] – 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<sup>-1</sup>] – 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.



**Bakalářská práce**  
**Píst zážehového motoru závodní verze škoda 110**  
**Jakub Gerák**

---

### 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

$\omega_{max}$  [ $s^{-1}$ ] – maximální úhlová rychlost klikového hřídele

$\lambda_0$  [-] – ojnicní poměr

### Tahové napětí v průřezu

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

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

$$\sigma_t = 3,49MPa$$

$S_x$  [ $m^2$ ] – minimální plocha příčného průřezu

Maximální dovolené napětí v tahu pro hliníkové slitiny je 4 až 10MPa, takže napětí  $\sigma_t$  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 sousosti 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. Nesouosost 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<sub>m2</sub> [m] – náhradní průměr pístu v drážce pro pístní kroužek

p<sub>max</sub> [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<sub>m2</sub> [m] – výška druhého můstku

**Bakalářská práce**  
**Píst zážehového motoru závodní verze škoda 110**  
**Jakub Gerák**

---

**Ohybové napětí náhradního můstku**

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

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

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

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

$W_{o2}$  [m<sup>3</sup>] – Modul odporu v ohybu druhého náhradního můstku

**Průřez v místě vetknutí náhradního můstku**

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

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

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

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

$H_{m2}$  [m] – výška druhého můstku

**Smykové napětí náhradního můstku**

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

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

$$\tau_2 = 5,57 MPa$$

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

### Výsledné redukované napětí

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

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

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

$\sigma_{o2}$  [Pa] – ohybové napětí náhradního můstku

$\tau_2$  [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.

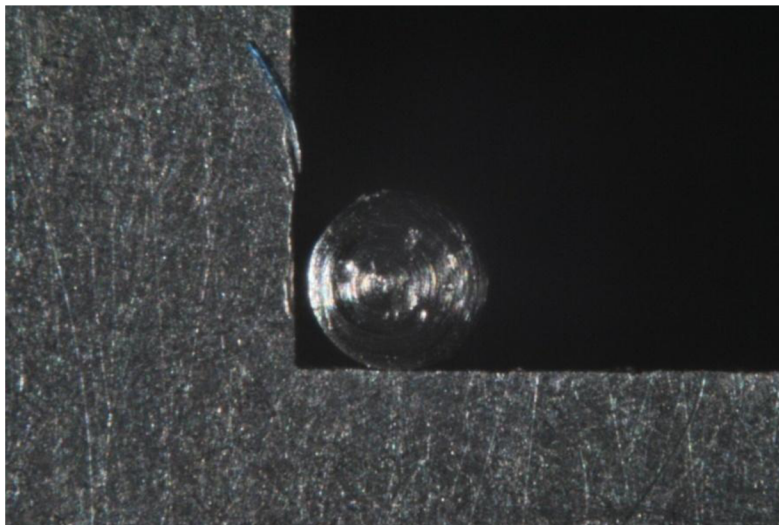
Píst je připraven pro vzorek podélným řezem a následnou úpravou povrchu řezu broušením. Konečné broušení je provedeno vodním brusným papírem se zrnitostí P2000. Pro porovnání skutečného rádiusu s doporučenou minimální hodnotou je do drážky vložen do těsné blízkosti vetknutí předmět kruhového tvaru o 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.

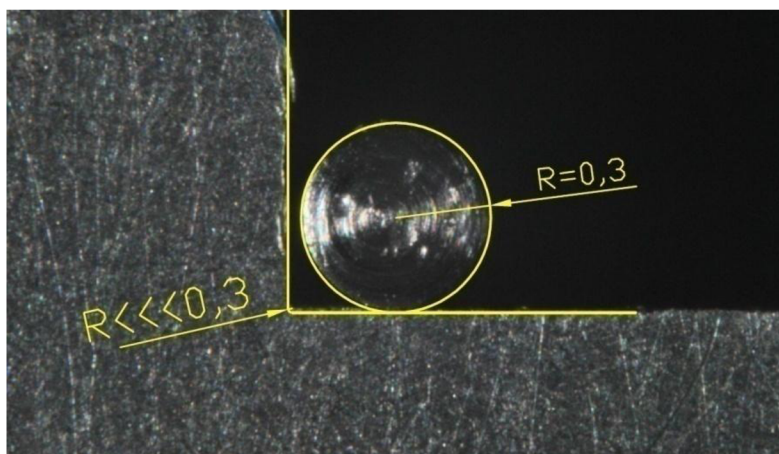
Fotografie je vyobrazena na obr. 15 a 16.

**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. Opětovné 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 <sup>-2</sup> ]	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
$m_{pč}$	[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 <sup>-1</sup> ]	Jmenovité otáčky motoru
$n_{max}$	[min <sup>-1</sup> ]	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 <sup>2</sup> ]	Plocha dna pístu
$s$	[m]	Poloha pístu
$S_v$	[m <sup>2</sup> ]	Průřez v místě vetknutí
$S_{v2}$	[m <sup>2</sup> ]	Průřez v místě vetknutí náhradního druhého můstku
$S_x$	[mm <sup>2</sup> ]	Minimální plocha příčného průřezu
$v$	[ms <sup>-1</sup> ]	Rychlost pístu
$W_o$	[m <sup>3</sup> ]	Modul odporu v ohybu druhého můstku
$W_{o2}$	[m <sup>3</sup> ]	Modul odporu v ohybu náhradního druhého můstku
$\alpha$	[°]	Úhel natočení klikového hřídele
$\alpha_i$	[°]	Úhel natočení klikového hřídele
$\beta_i$	[°]	Úhel odklonění ojnice
$\lambda_o$	[-]	Ojniční poměr
$\sigma_o$	[MPa]	Ohybové napětí
$\sigma_{o2}$	[MPa]	Ohybové napětí náhradního druhého můstku
$\sigma_{\text{red}}$	[MPa]	Redukované napětí
$\sigma_{\text{red}2}$	[MPa]	Redukované napětí náhradního druhého můstku
$\sigma_t$	[MPa]	Napětí v tahu
$\sigma_{tl \max}$	[MPa]	Napětí v tlaku
$\tau$	[MPa]	Smykové napětí
$\tau_2$	[MPa]	Smykové napětí náhradního druhého můstku
$\omega$	[s <sup>-1</sup> ]	Jmenovitá úhlová rychlost
$\omega_{\max}$	[s <sup>-1</sup> ]	Maximální úhlová rychlost