



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

ZÁŽEHOVÝ TŘÍVÁLCOVÝ HVĚZDICOVÝ LETECKÝ MOTOR

PETROL THREE-CYLINDER RADIAL AIRCRAFT ENGINE

PŘÍLOHY K DIPLOMOVÉ PRÁCI

DIPLOMA THESIS APPENDICES

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Marek Břečka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.

BRNO 2019

OBSAH

Příloha 1 – Kinematika druhého vedlejšího pístu.....	3
Příloha 2 – Fourierův rozklad rychlost a zrychlení pístů.....	4
Příloha 3 – Fourierův rozklad úhlová rychlost a zrychlení ojníc	6
Příloha 4 – Příprava modelu pro 3D tisk	8
Příloha 5 – Render a 3D tisk modelů.....	11

PŘÍLOHA 1 – KINEMATIKA DRUHÉHO VEDLEJŠÍHO PÍSTU

Dráha druhého vedlejšího pístu se vypočítá ze vztahu:

$$s_t = r_k \cdot \cos(\beta_{ct}) + r_l \cdot \cos(\beta_m - \varphi_t) + l_t \cdot \cos(\beta_t) \text{ [mm]}, \quad (\text{P1})$$

kde l_t je délka vedlejší ojnice, r_l je délka vedlejší ojnicní kliky, β_{ct} je úhel natočení klikového hřídele vůči ose druhého vedlejšího válce, β_t je úhel odklonu druhé vedlejší ojnice vůči ose druhého vedlejšího válce. Úhel φ_t udává rozdíl mezi úhlem odklonu druhé vedlejší ojnicní kliky a úhlem odklonu osy druhého vedlejšího válce. Vypočítá se ze vztahu:

$$\varphi_t = \delta_{to} - \delta_t = -7 [^\circ]. \quad (\text{P2})$$

Úhel natočení klikového hřídele vůči ose prvního vedlejšího válce:

$$\beta_{ct} = \delta_t - \alpha [^\circ]. \quad (\text{P3})$$

Úhel odklonu první vedlejší ojnice vůči ose prvního vedlejšího válce:

$$\beta_s = \arcsin \left[\frac{r_k \cdot \sin(\beta_{ct}) + r_l \cdot \sin(\beta_m - \varphi_t)}{l_t} \right] [^\circ]. \quad (\text{P4})$$

$$\max(s_t) = 180,35 \text{ [mm]},$$

$$\min(s_t) = 83,23 \text{ [mm]}.$$

Spalovací prostor vedlejšího válce

Zdvih vedlejšího pístu Z_t :

$$Z_t = \max(s_t) - \min(s_t) = 97,12 \text{ [mm]}. \quad (\text{P5})$$

Výška kompresního objemu Z_{kt} :

$$Z_{kt} = Z - \max(s_t) - Z_{píst} = 10,44 \text{ [mm]}. \quad (\text{P6})$$

Kompresní objem V_{kt} :

$$V_{kt} = Z_{kt} \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{4} = 48,01 \text{ [cm}^3\text{]}. \quad (\text{P7})$$

Zdvihový objem V_{zt} :

$$V_{zt} = Z_t \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{4} = 446,5 \text{ [cm}^3\text{]}. \quad (\text{P8})$$

Kompresní poměr vedlejšího válce:

$$\varepsilon_t = \frac{V_{zt} + V_{kt}}{V_{kt}} = 10,3009 [-]. \quad (\text{P9})$$

PŘÍLOHA 2 – FOURIERŮV ROZKLAD RYCHLOST A ZRYCHLENÍ PÍSTŮ

Tabulka P1 - Fourierovy členy pro rychlost a zrychlení pístů

	A1	A2	A3	A4
Hlavní válec	0,000	0,000	0,000	0,000
1. vedlejší válec	42,691	-9,277	0,239	-0,001
2. vedlejší válec	-42,691	9,277	-0,239	0,001
	B1	B2	B3	B4
Hlavní válec	43,746	3,842	0,336	0,313
1. vedlejší válec	-18,298	1,502	0,046	0,484
2. vedlejší válec	-18,298	1,502	0,046	0,484

Rovnice pro výpočet dráhy jednotlivých pístů po dosazení:

$$s_m = 43,746 \cdot \cos(\alpha) + 3,842 \cdot \cos(2\alpha) + 0,336 \cdot \cos(3\alpha) + 0,313 \cdot \cos(4\alpha) [mm], \quad (P10)$$

$$s_s = 42,691 \cdot \sin(\alpha) - 18,298 \cdot \cos(\alpha) - 9,277 \cdot \sin(2\alpha) + 1,502 \cdot \cos(2\alpha) + 0,239 \cdot \sin(3\alpha) + 0,046 \cdot \cos(3\alpha) - 0,001 \cdot \sin(4\alpha) + 0,484 \cdot \cos(4\alpha) [mm], \quad (P11)$$

$$s_t = -42,691 \cdot \sin(\alpha) - 18,298 \cdot \cos(\alpha) + 9,288 \cdot \sin(2\alpha) + 1,502 \cdot \cos(2\alpha) - 0,239 \cdot \sin(3\alpha) + 0,046 \cdot \cos(3\alpha) + 0,001 \cdot \sin(4\alpha) + 0,484 \cdot \cos(4\alpha) [mm]. \quad (P12)$$

Rychlost pístů:

$$v_m = (-43,746 \cdot \sin(\alpha) - 2 \cdot 3,842 \cdot \sin(2\alpha) - 3 \cdot 0,336 \cdot \sin(3\alpha) - 4 \cdot 0,313 \cdot \sin(4\alpha)) \cdot \omega [m \cdot s^{-1}], \quad (P13)$$

$$v_s = (42,691 \cdot \cos(\alpha) + 18,298 \cdot \sin(\alpha) - 2 \cdot 9,277 \cdot \cos(2\alpha) - 2 \cdot 1,502 \cdot \sin(2\alpha) + 3 \cdot 0,239 \cdot \cos(3\alpha) - 3 \cdot 0,046 \cdot \sin(3\alpha) - 4 \cdot 0,001 \cdot \cos(4\alpha) - 4 \cdot 0,484 \cdot \sin(4\alpha)) \cdot \omega [m \cdot s^{-1}], \quad (P14)$$

$$v_t = (-42,691 \cdot \cos(\alpha) + 18,298 \cdot \sin(\alpha) + 2 \cdot 9,277 \cdot \cos(2\alpha) - 2 \cdot 1,502 \cdot \sin(2\alpha) - 3 \cdot 0,239 \cdot \cos(3\alpha) - 3 \cdot 0,046 \cdot \sin(3\alpha) + 4 \cdot 0,001 \cdot \cos(4\alpha) - 4 \cdot 0,484 \cdot \sin(4\alpha)) \cdot \omega [m \cdot s^{-1}]. \quad (P15)$$

Zrychlení pístů:

$$a_m = (-43,746 \cdot \cos(\alpha) - 4 \cdot 3,842 \cdot \cos(2\alpha) - 9 \cdot 0,336 \cdot \cos(3\alpha) - 16 \cdot 0,313 \cdot \cos(4\alpha)) \cdot \omega^2 [m \cdot s^{-2}], \quad (P16)$$

$$a_s = (-42,691 \cdot \sin(\alpha) + 18,298 \cdot \cos(\alpha) + 4 \cdot 9,277 \cdot \sin(2\alpha) - 4 \cdot 1,502 \cdot \cos(2\alpha) - 9 \cdot 0,239 \cdot \sin(3\alpha) - 9 \cdot 0,046 \cdot \cos(3\alpha) + 16 \cdot 0,001 \cdot \sin(4\alpha) - 16 \cdot 0,484 \cdot \cos(4\alpha)) \cdot \omega^2 [m \cdot s^{-2}], \quad (P17)$$

$$a_t = (42,691 \cdot \sin(\alpha) + 18,298 \cdot \cos(\alpha) - 4 \cdot 9,277 \cdot \sin(2\alpha) - 4 \cdot 1,502 \cdot \cos(2\alpha) + 9 \cdot 0,239 \cdot \sin(3\alpha) - 9 \cdot 0,046 \cdot \cos(3\alpha) - 16 \cdot 0,001 \cdot \sin(4\alpha) - 16 \cdot 0,484 \cdot \cos(4\alpha)) \cdot \omega^2 [m \cdot s^{-2}]. \quad (P18)$$

První harmonická složka zrychlení:

$$a_{m1} = (-43,746 \cdot \cos(\alpha)) \cdot \omega^2 [m \cdot s^{-2}], \quad (P19)$$

$$a_{s1} = (-42,691 \cdot \sin(\alpha) + 18,298 \cdot \cos(\alpha)) \cdot \omega^2 [m \cdot s^{-2}], \quad (P20)$$

$$a_{t1} = (42,691 \cdot \sin(\alpha) + 18,298 \cdot \cos(\alpha)) \cdot \omega^2 [m \cdot s^{-2}]. \quad (P21)$$

Druhá harmonická složka zrychlení:

$$a_{m2} = (-4 \cdot 3,842 \cdot \cos(2\alpha)) \cdot \omega^2 [m \cdot s^{-2}], \quad (P22)$$

$$a_{s2} = (4 \cdot 9,277 \cdot \sin(2\alpha) - 4 \cdot 1,502 \cdot \cos(2\alpha)) \cdot \omega^2 [m \cdot s^{-2}], \quad (P23)$$

$$a_{t2} = (-4 \cdot 9,277 \cdot \sin(2\alpha) - 4 \cdot 1,502 \cdot \cos(2\alpha)) \cdot \omega^2 [m \cdot s^{-2}]. \quad (P24)$$

PŘÍLOHA 3 – FOURIERŮV ROZKLAD ÚHLOVÁ RYCHLOST A ZRYCHLENÍ OJNIC*Tabulka P2 - Fourierovy členy pro úhlovou rychlost a zrychlení ojníc*

	A1	A2	A3	A4
Hlavní válec	0,3186	0,0000	-0,0014	0,0000
1. vedlejší válec	0,4624	-0,0096	0,0092	0,0001
2. vedlejší válec	0,4624	-0,0096	0,0092	0,0001
	B1	B2	B3	B4
Hlavní válec	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
1. vedlejší válec	0,4620	-0,0013	-0,0085	0,0016
2. vedlejší válec	-0,4620	0,0013	0,0085	-0,0016

Rovnice pro výpočet natočení jednotlivých ojníc po dosazení:

$$\beta_m = 0,3186 \cdot \sin(\alpha) - 0,0014 \cdot \sin(3\alpha) \text{ [mm]}, \quad (\text{P25})$$

$$\begin{aligned} \beta_s = & 0,4624 \cdot \sin(\alpha) + 0,462 \cdot \cos(\alpha) - 0,0096 \cdot \sin(2\alpha) - 0,0013 \cdot \cos(2\alpha) \\ & + 0,0092 \cdot \sin(3\alpha) - 0,0085 \cdot \cos(3\alpha) + 0,0001 \cdot \sin(4\alpha) + 0,0016 \cdot \cos(4\alpha) \text{ [mm]}, \end{aligned} \quad (\text{P26})$$

$$\begin{aligned} \beta_t = & 0,4624 \cdot \sin(\alpha) - 0,462 \cdot \cos(\alpha) - 0,0096 \cdot \sin(2\alpha) + 0,0013 \cdot \cos(2\alpha) \\ & + 0,0092 \cdot \sin(3\alpha) + 0,0085 \cdot \cos(3\alpha) + 0,0001 \cdot \sin(4\alpha) - 0,0016 \cdot \cos(4\alpha) \text{ [mm]}. \end{aligned} \quad (\text{P27})$$

Úhlová rychlost ojníc:

$$\omega_m = (0,3186 \cdot \cos(\alpha) - 3 \cdot 0,0014 \cdot \cos(3\alpha)) \cdot \omega \text{ [rad} \cdot \text{s}^{-1}\text{]}, \quad (\text{P28})$$

$$\begin{aligned} \omega_s = & (0,4624 \cdot \cos(\alpha) - 0,462 \cdot \sin(\alpha) - 2 \cdot 0,0096 \cdot \cos(2\alpha) + 2 \cdot 0,0013 \cdot \sin(2\alpha) \\ & + 3 \cdot 0,0092 \cdot \cos(3\alpha) + 3 \cdot 0,0085 \cdot \sin(3\alpha) + 4 \cdot 0,0001 \cdot \cos(4\alpha) - 4 \cdot 0,0016 \cdot \sin(4\alpha)) \cdot \omega \text{ [rad} \cdot \text{s}^{-1}\text{]}, \end{aligned} \quad (\text{P29})$$

$$\begin{aligned} \omega_t = & (0,4624 \cdot \cos(\alpha) + 0,462 \cdot \sin(\alpha) - 2 \cdot 0,0096 \cdot \cos(2\alpha) - 2 \cdot 0,0013 \cdot \sin(2\alpha) \\ & + 3 \cdot 0,0092 \cdot \cos(3\alpha) - 3 \cdot 0,0085 \cdot \sin(3\alpha) + 4 \cdot 0,0001 \cdot \cos(4\alpha) + 4 \cdot 0,0016 \cdot \sin(4\alpha)) \cdot \omega \text{ [rad} \cdot \text{s}^{-1}\text{]}. \end{aligned} \quad (\text{P30})$$

Úhlové zrychlení ojníc:

$$\varepsilon_{um} = (-0,3186 \cdot \sin(\alpha) + 9 \cdot 0,0014 \cdot \sin(3\alpha)) \cdot \omega^2 [\text{rad} \cdot \text{s}^{-2}], \quad (\text{P31})$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{us} = & (-0,4624 \cdot \sin(\alpha) - 0,462 \cdot \cos(\alpha) + 4 \cdot 0,0096 \cdot \sin(2\alpha) + 4 \cdot 0,0013 \\ & \cdot \cos(2\alpha) - 9 \cdot 0,0092 \cdot \sin(3\alpha) + 9 \cdot 0,0085 \cdot \cos(3\alpha) - 16 \cdot 0,0001 \\ & \cdot \sin(4\alpha) - 16 \cdot 0,0016 \cdot \cos(4\alpha)) \cdot \omega^2 [\text{rad} \cdot \text{s}^{-2}], \end{aligned} \quad (\text{P32})$$

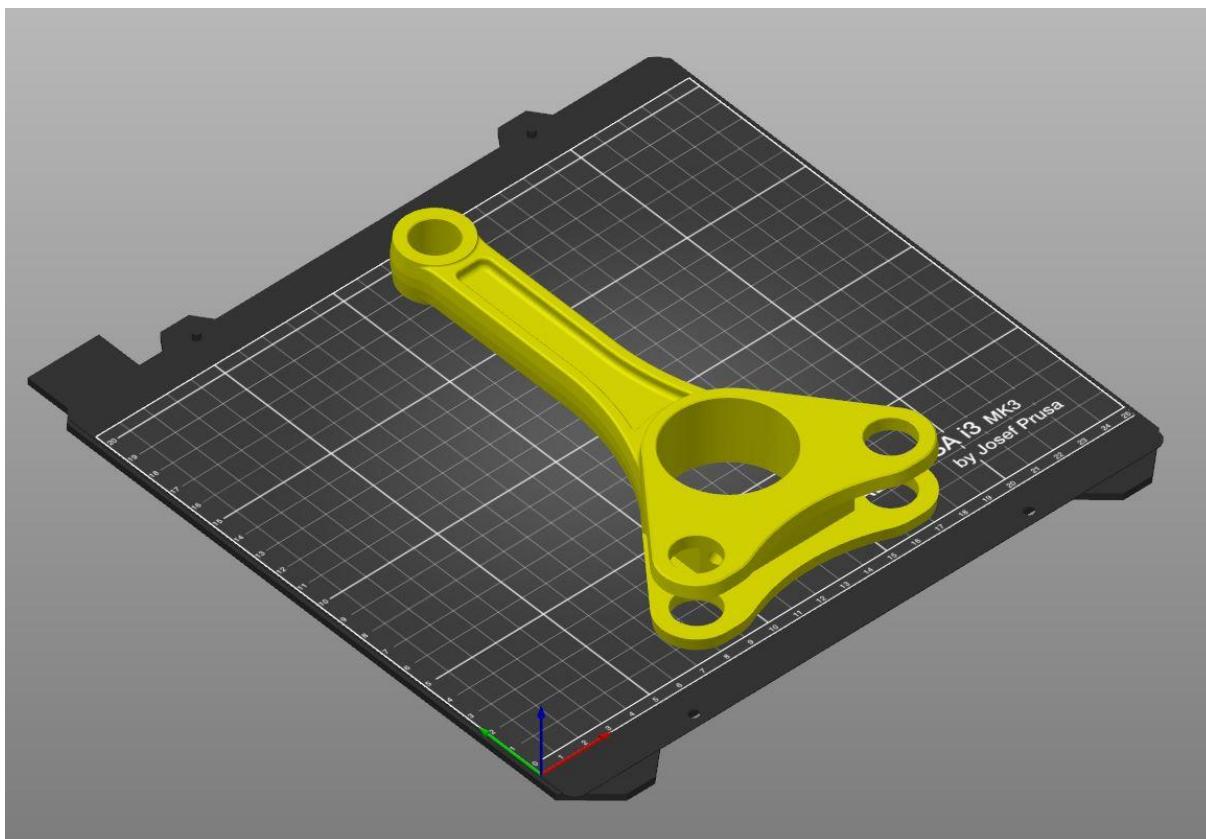
$$\begin{aligned} \varepsilon_{ut} = & (-0,4624 \cdot \sin(\alpha) + 0,462 \cdot \cos(\alpha) + 4 \cdot 0,0096 \cdot \sin(2\alpha) - 4 \cdot 0,0013 \\ & \cdot \cos(2\alpha) - 9 \cdot 0,0092 \cdot \sin(3\alpha) - 9 \cdot 0,0085 \cdot \cos(3\alpha) - 16 \cdot 0,0001 \\ & \cdot \sin(4\alpha) + 16 \cdot 0,0016 \cdot \cos(4\alpha)) \cdot \omega^2 [\text{rad} \cdot \text{s}^{-2}]. \end{aligned} \quad (\text{P33})$$

PŘÍLOHA 4 – PŘÍPRAVA MODELU PRO 3D TISK

Pro přípravu modelů k 3D tisku byl využit program Slic3rPE-1.42.0. V následující kapitole bude popsán postup přípravy hlavní ojnice. Postup pro ostatní modely byl obdobný.

Nejdříve je potřeba v 3D modelovacím programu uložit požadovaný model do formátu STL, který je schopný Slic3rPE přečíst. K tomu byl využit program Solid Edge.

Po otevření STL v programu Slic3rPE je nutné zvolit orientaci modelu a jeho umístění na podložce (viz obrázek 1).



Obrázek 1 – Import geometrie do programu Slic3rPE

Do takto připraveného modelu je potřeba zadat vstupní parametry pro tisk (viz obrázek 2). Volí se:

- tloušťka tisknuté vrstvy,
- materiál filamentu, ze kterého bude model vytištěn,
- verze použité tiskárny,
- umístění podpor,
- výplň uvnitř vytištěného modelu.

■ Simple ■ Advanced ■ Expert

Print settings :

0.20mm QUALITY MK3 (modified)

Filament :

Prusament PLA

Printer :

Original Prusa i3 MK3S

Supports: Everywhere

Infill: 15% Brim: ☐

Obrázek 2 – Nastavení vstupních parametrů hlavní ojnice

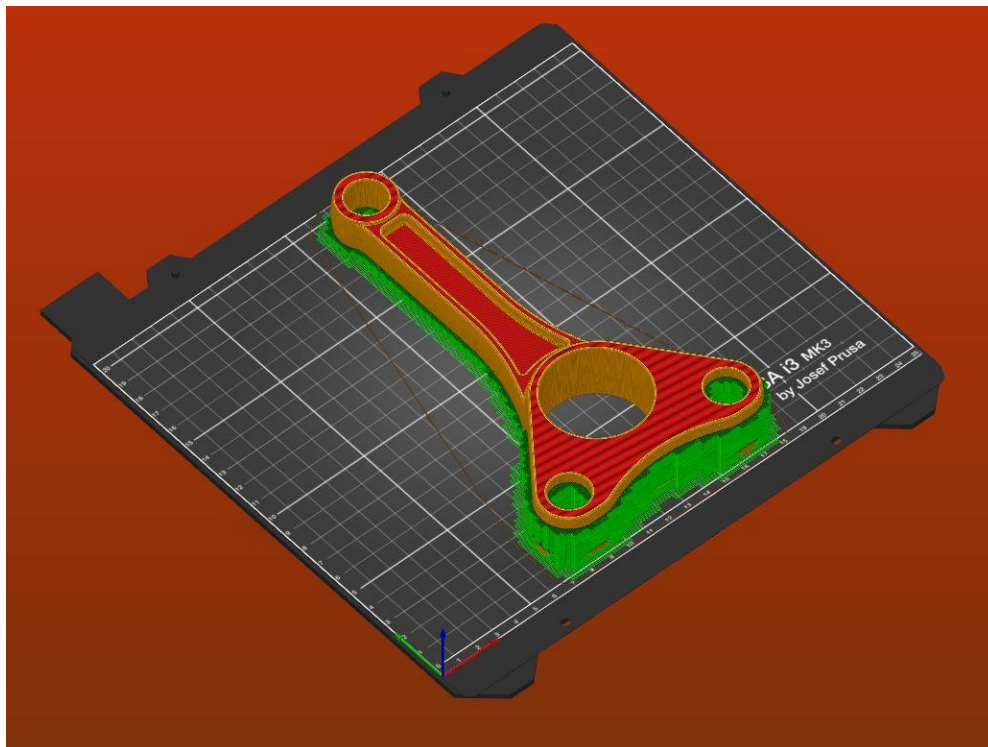
Z důvodu velikosti tištěných dílů, a z toho vyplývající časové náročnosti tisku, byla zvolena tloušťka vrstvy 0,20 mm. Za materiál filamentu zvoleno PETG. Všechny modely byly tištěny na tiskárně Prusa i3 MK3S. Pro co nejlepší zachování tvaru byly zvoleny podpory všude. Výplň uvnitř modelu byla zvolena na 15 % opět z důvodu časové náročnosti tisku.

Po zadání všech vstupních parametrů program spočítá čas tisku, délku a hmotnost spotřebovaného materiálu a při správném nastavení vstupních hodnot také cenu tisku (viz obrázek 3).

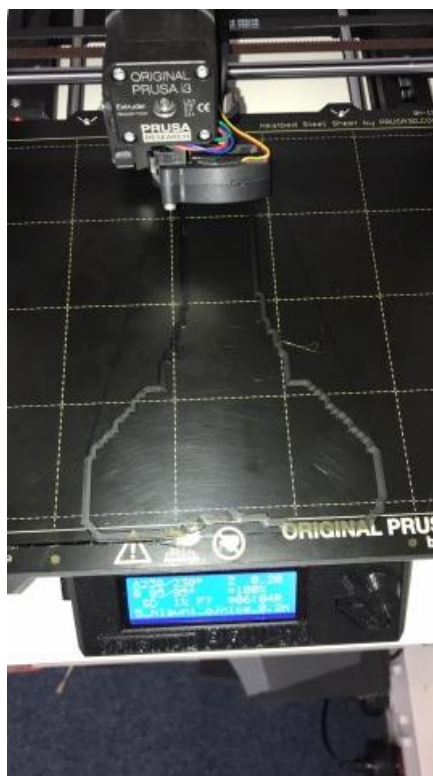
Sliced Info	
Used Filament (m)	22.62
Used Filament (mm ³)	54403.08
Used Filament (g)	67.46
Cost	1.69
Estimated printing time :	
- normal mode	6h 1m 26s
- silent mode	6h 7m 44s
Slice now	

Obrázek 3 – Informace o tisku hlavní ojnice

Poté, co je model se všemi vstupními parametry připravený, se použije funkce *Slice now*, která vytvoří náhled vytištěného modelu se všemi podporami (viz obrázek 4). Pokud navržené řešení vyhovuje požadavkům, je možné vygenerovat *G-code*, který se následně nahraje do 3D tiskárny a podle kterého tiskárna následně pracuje.



Obrázek 4 - Návrh vytištěného modelu hlavní ojnice



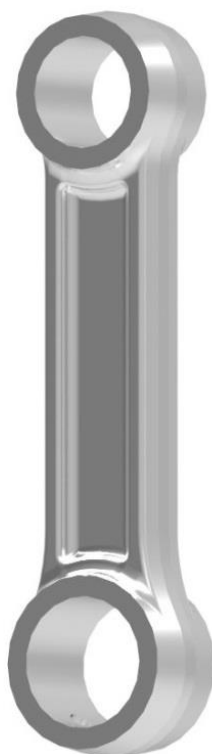
Obrázek 5 - Začátek tisku hlavní ojnice

PŘÍLOHA 5 – RENDER A 3D TISK MODELŮ

Vedlejší ojnice:



Obrázek 6 – Render vedlejší ojnice



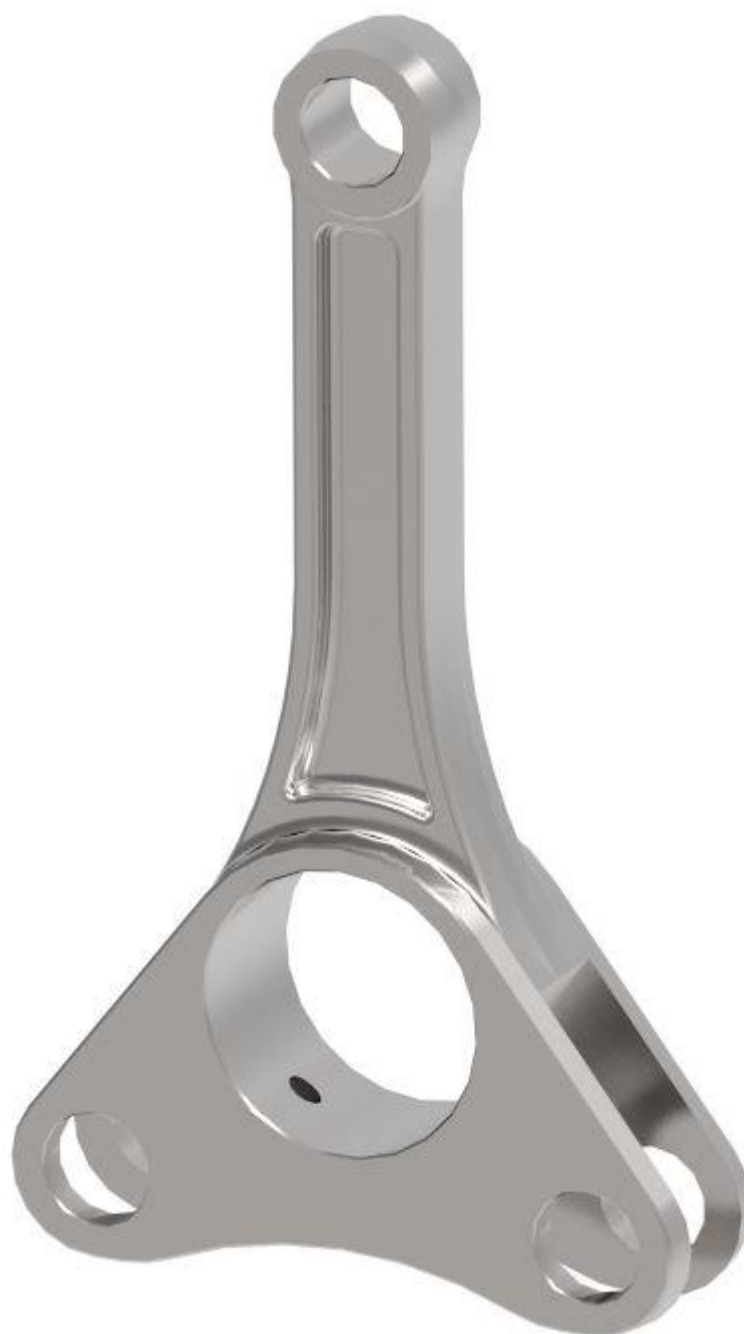
Obrázek 7 – Render vedlejší ojnice

Doba tisku:	2 x 1h 26m 32s
Materiál:	PETG
Spotřeba materiálu:	2 x 14,38 g
Tiskárna:	Prusa i3



Obrázek 8 - Vytiskněné modely vedlejších ojníc

Hlavní ojnice:



Obrázek 9 – Render hlavní ojnice

Doba tisku:	6h 1m 26s
Materiál:	PETG
Spotřeba materiálu:	67,46 g
Tiskárna:	Prusa i3



Obrázek 10 - Vytištěný model hlavní ojnice

Vedlejší čep:



Obrázek 11 – Render vedlejšího čepu

Doba tisku:	2 x 36m 11s
Materiál:	PETG
Spotřeba materiálu:	2x 4,17 g
Tiskárna:	Prusa i3

Kluzná ložiska:



Obrázek 12 – Render kluzná ložiska

Doba tisku:	1h 2m 58s
Materiál:	PETG
Spotřeba materiálu:	8,78 g
Tiskárna:	Prusa i3

Na obrázku 13 je zobrazená sestava hlavní ojnice a vedlejších ojnic spolu s kluznými ložisky, vedlejšími čepy a pojistnými kroužky.

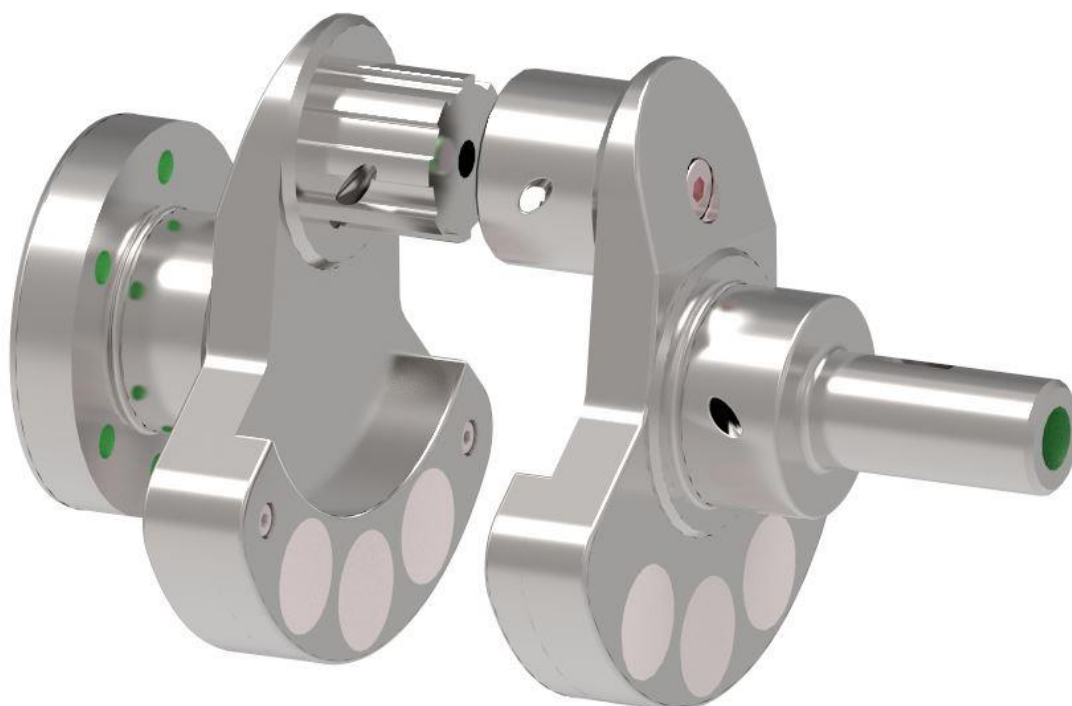


Obrázek 13 – Vytisktřená sestava hlavní a vedlejších ojnic před montáží

Kliková hřídel:



Obrázek 14 – Render klikové hřídele bez vývažků



Obrázek 15 – Render klikové hřídele s vývažky

Doba tisku:	26h 2m 27s
Materiál:	PETG
Spotřeba materiálu:	277,95 g
Tiskárna:	Prusa i3



Obrázek 16 – Vytiskněné zalomení klikové hřídele s podporami



Obrázek 17 – Zalomení klikové hřídele se zalisovanými jádry

Pístní skupina:



Obrázek 18 – Render pístní skupiny

Doba tisku:	3 x 6h 39m 31s
Materiál:	PETG
Spotřeba materiálu:	3 x 68,22 g
Tiskárna:	Prusa i3



Obrázek 19 – Vytištěná pístní skupina



Obrázek 20 – Render sestavy klikového mechanismu tříválcového zážehového hvězdicového motoru



Obrázek 21 – Vytištěná sestava hlavní a vedlejších ojníc s pístními skupinami

Celková doba tisku:	62h 13m 19s
Materiál:	PETG
Celková spotřeba materiálu:	649,83 g
Tiskárna:	Prusa i3