

WP08: Snižování mechanických ztrát pohonných jednotek

Vedoucí konsorcia podílející se na pracovním balíčku

Vysoké učení technické v Brně – doc. Ing. Pavel Novotný, Ph.D.

Další členové týmu – Ing. Ondřej Maršálek, Ph.D., Ing. Peter Raffai, Ing. Josef Dlugoš

Členové konsorcia podílející se na pracovním balíčku

České vysoké učení technické v Praze – Ing. Miroslav Emrich, Ph.D.

Technická univerzita v Liberci – Ing. Robert Voženílek, Ph.D.

Hlavní cíl balíčku

Výzkum, vývoj a realizace výpočtových a experimentálních přístupů vhodných ke kompletnímu řešení mechanických ztrát s následnými návrhy pro snížení spotřeby paliv a emisí CO₂ budoucích pohonných jednotek na bázi spalovacích motorů, elektromotorů nebo hybridních pohonů.

Dílčí cíle balíčku pro nejbližší období

Dokončení vývoje výpočtových a experimentálních metod. Aplikace nových poznatků s cílem zvýšit mechanickou účinnost pohonných jednotek.

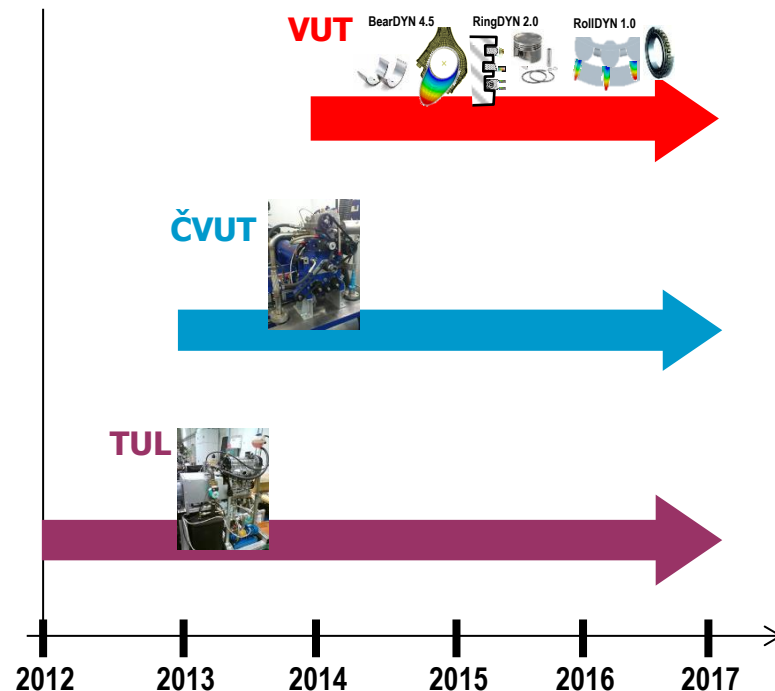
WP08: Snižování mechanických ztrát pohonných jednotek

▪ Probíhající činnosti

T WP08A05: Výzkum a vývoj výpočtových metod pro řešení mechanických ztrát mazací soustavy.
(2014 – 2017)

 WP08A04: Vývoj a aplikace pokročilých experimentálních metod určování mechanických ztrát.
(2013 – 2017)

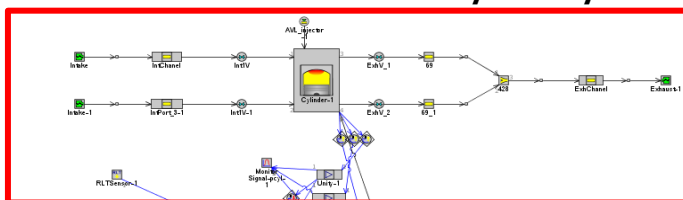
 WP08A03: Experimentální výzkumné práce s komplexním vyhodnocením výsledků.
(2012 – 2017)



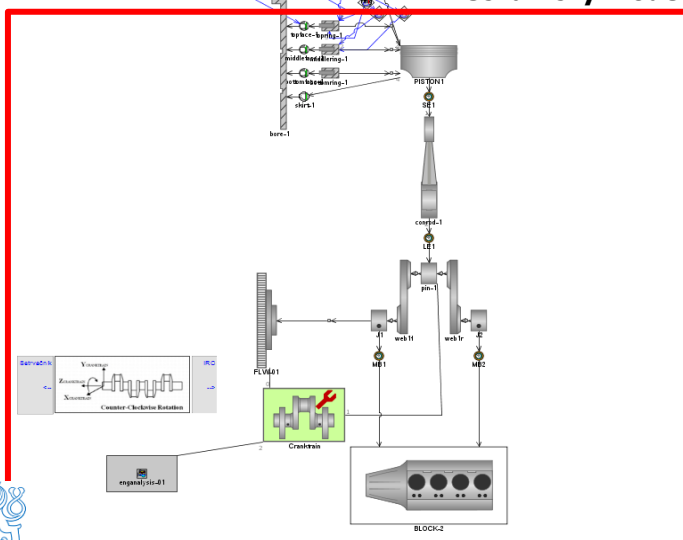
WP08: Snižování mechanických ztrát pohonných jednotek

- **Vývoj a aplikace pokročilých experimentálních metod určování mechanických ztrát (ČVUT)**
 - Rozšíření mechanického modelu o termodynamický model pro zpřesnění teplot dílů/teplot oleje

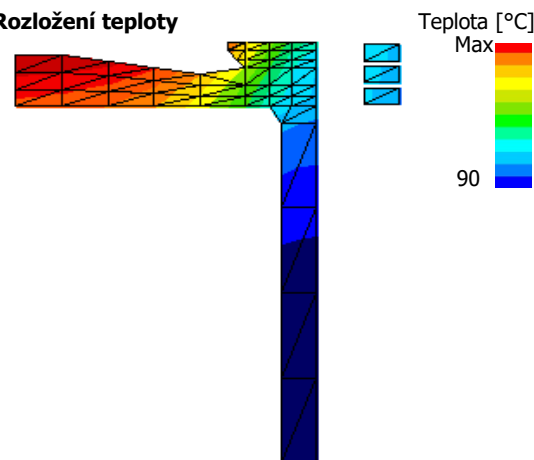
Termodynamický model



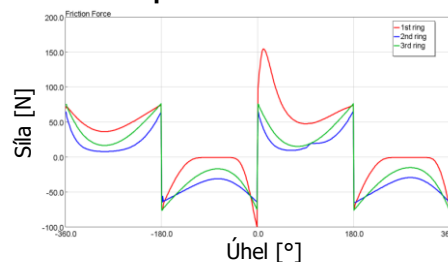
Mechanický model



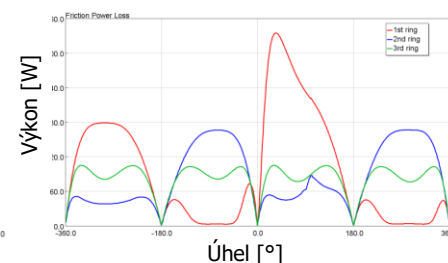
Rozložení teploty



Třecí síla pístních kroužků



Výkonové ztráty pístních kroužků

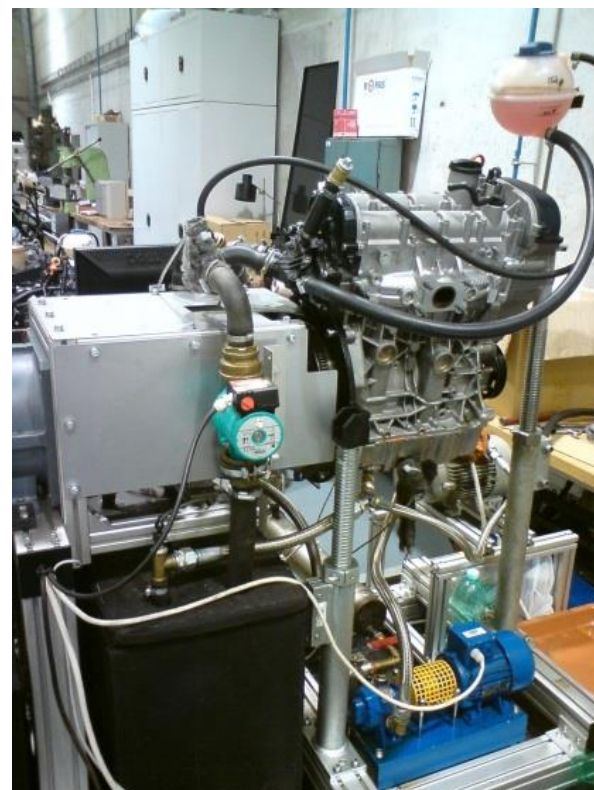


WP08: Snižování mechanických ztrát pohonných jednotek

▪ WP08A03: Experimentální výzkumné práce s komplexním vyhodnocením výsledků (TUL)

- Vývoj systému pro zvýšení tlaku ve válcích makety čtyřválcového spalovacího motoru.
- Protáčení motoru s různě vysokým tlakem (počátečním nebo maximálním) ve válci poskytne možnost zjistit proměnlivost třecích ztrát pístové skupiny (včetně třecích ztrát ložisek v klikovém mechanismu) v závislosti na tlaku ve válci motoru.

Maketa čtyřválcového spalovacího motoru



WP08: Snižování mechanických ztrát pohonných jednotek

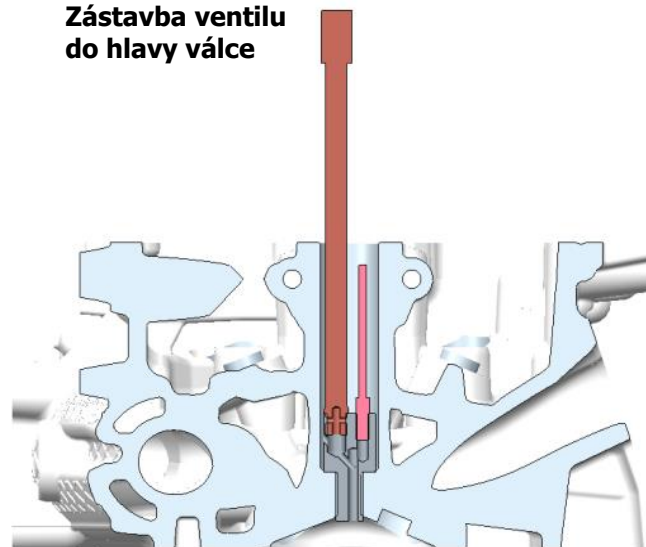
▪ WP08A03: Experimentální výzkumné práce s komplexním vyhodnocením výsledků (TUL)

- Konstrukční návrh speciálního jednocestného ventilu pro zvýšení hmotnostní náplně válce vzduchem až na hodnotu zvoleného (potřebného) počátečního tlaku v DÚ (v zobrazeném případě na tlak 200 kPa)
- Umístění ventilu do otvoru pro zapalovací svíčku
- Umístění tlakového snímače pro vysokotlakou indikaci při protáčení

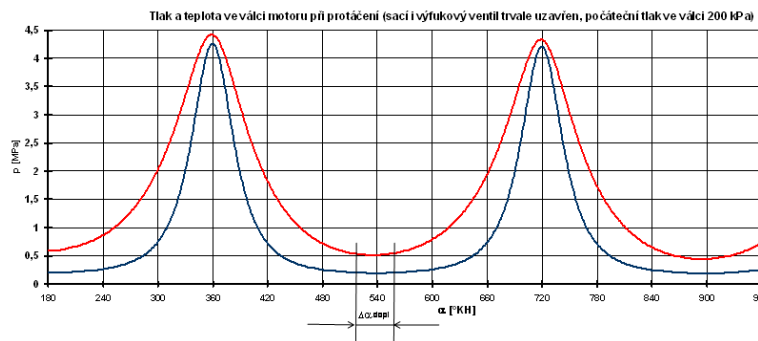
Vzorek jednocestného ventilu



Zástavba ventilu do hlavy válce



Tlak a teplota plynu ve válci

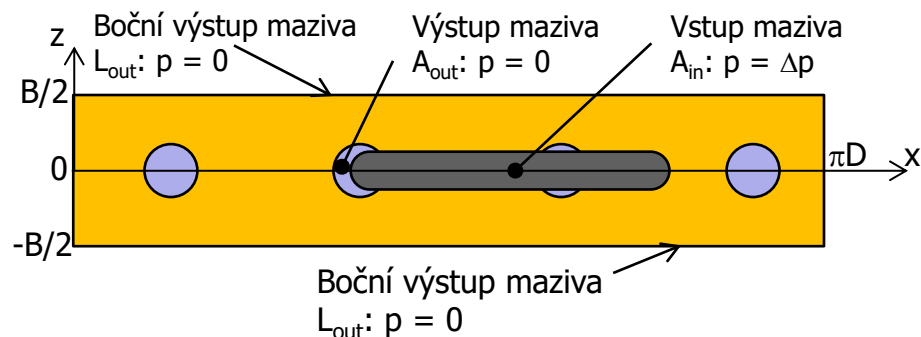
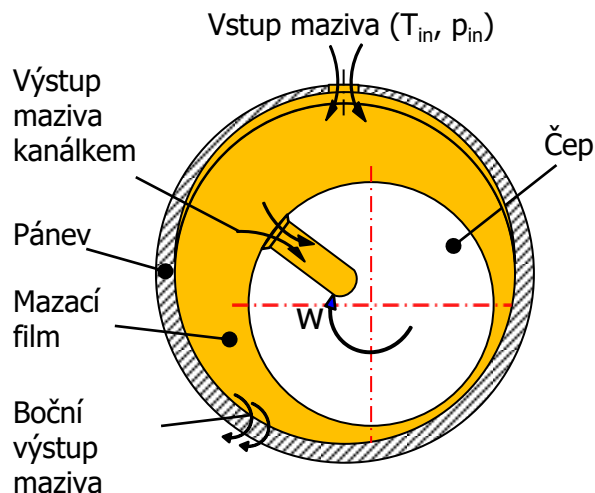


WP08: Snižování mechanických ztrát pohonných jednotek

▪ Výzkum a vývoj výpočtových metod pro řešení mechanických ztrát mazací soustavy: Kluzná ložiska (VUT v Brně)

- Modelování hydrodynamických ložisek rotorů turbodmychadel při simulaci otáčekových rozběhů nebo radiálních ložisek při simulaci jízdních cyklů (NEDC, WLTP atd.) a tribologické ohodnocení
- Vývoj modelu pro rychlé řešení dynamiky a tribologie kluzných ložisek (separátní HD výpočet)
- Zahrnutí vlivu vtokových a výtokových otvorů na tlak a průtok
- Vliv oteplení olejové vrstvy

Rychlý model radiálního ložiska



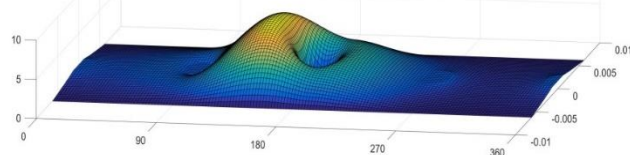
WP08: Snižování mechanických ztrát pohonných jednotek

▪ Výzkum a vývoj výpočtových metod pro řešení mechanických ztrát mazací soustavy: Kluzná ložiska (VUT v Brně)

– Současné hydrodynamické řešení

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\rho h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial z} \right) - \underbrace{\frac{U}{2} \frac{\partial(\rho h)}{\partial x}}_{\text{Superpozice}} - \frac{\partial(\rho h)}{\partial t} = 0$$

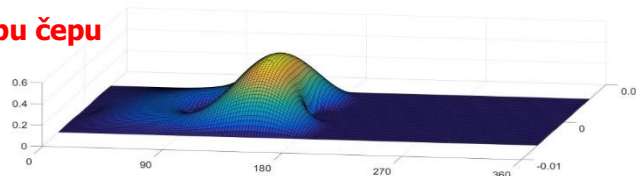
Hydrodynamický tlak
B = 12,4 mm, D = 15 mm, p_{in} = 0,85 MPa



– Separátní hydrodynamické řešení (včetně vstupních a výstupních otvorů)

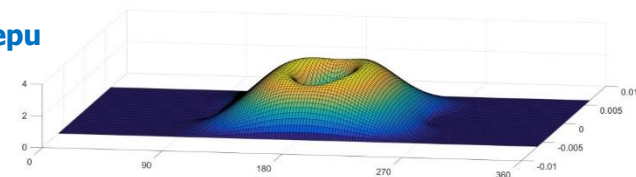
1) Bezrozměrný tlak vlivem tangenciálního pohybu čepu

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\rho h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial z} \right) - \frac{U}{2} \frac{\partial(\rho h)}{\partial x} = 0$$



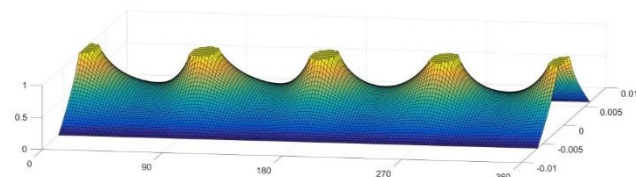
2) Bezrozměrný tlak vlivem radiálního pohybu čepu

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\rho h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial z} \right) - \frac{\partial(\rho h)}{\partial t} = 0$$



3) Bezrozměrný tlak vlivem vstupujícího oleje

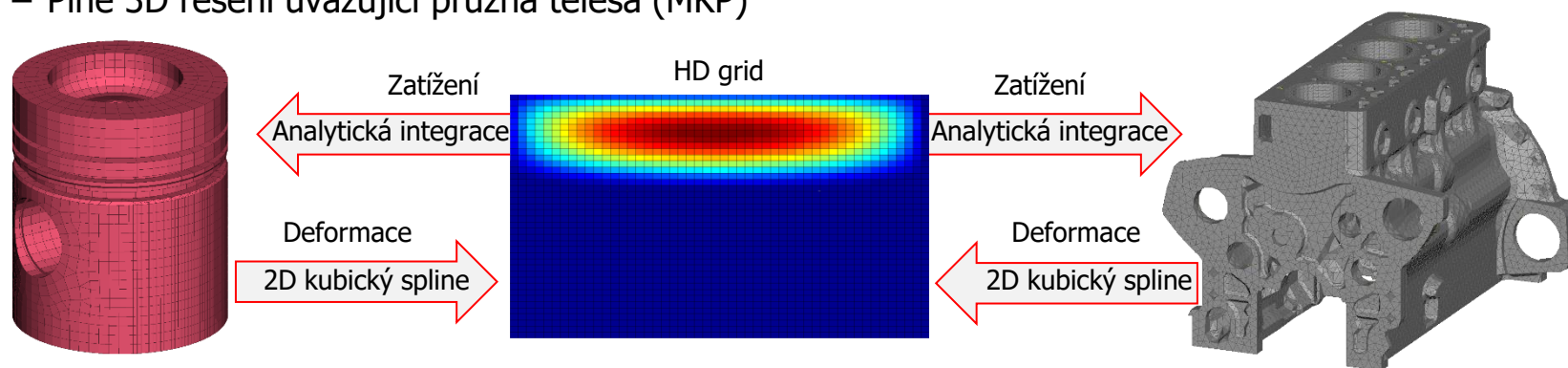
$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\rho h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 0$$



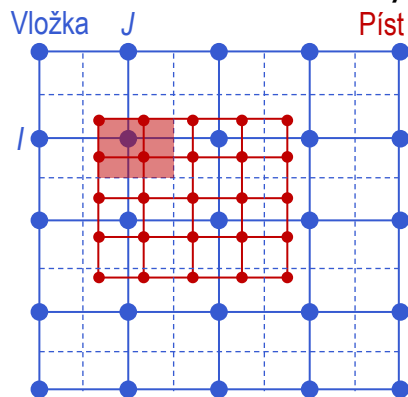
WP08: Snižování mechanických ztrát pohonných jednotek

▪ Výzkum a vývoj výpočtových metod pro řešení mechanických ztrát mazací soustavy: 3D kontakt píst – vložka válce (VUT v Brně)

– Plně 3D řešení uvažující pružná tělesa (MKP)



– Rozložení tlaku a analytická integrace

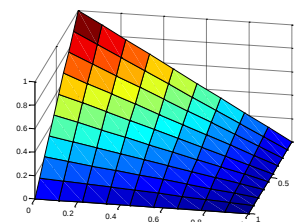


$$N^{00} = (1 - \eta)(1 - \xi)$$

$$N^{01} = (1 - \eta)(\xi)$$

$$N^{10} = (\eta)(1 - \xi)$$

$$N^{11} = (\eta)(\xi)$$



$$p(\eta, \xi) = p^{00}N^{00}(\eta, \xi) + p^{01}N^{01}(\eta, \xi) + p^{10}N^{10}(\eta, \xi) + p^{11}N^{11}(\eta, \xi)$$

WP08: Snižování mechanických ztrát pohonných jednotek

▪ Výzkum a vývoj výpočtových metod pro řešení mechanických ztrát mazací soustavy: Pístní kroužky a stanovení spotřeby oleje (VUT v Brně)

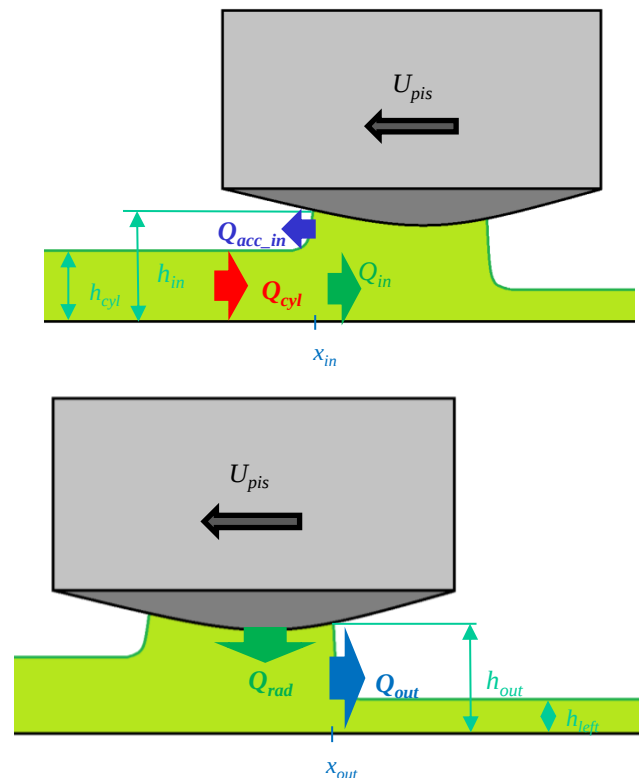
– Modul programu RingDYN

– Rovnováha toku oleje na vstupní hraně (rovnice kontinuity)

- Vtok po vložce $\longrightarrow Q_{cyl} = U_{pis} h_{cyl}$
- Tok vstupující do zaplavené části $\longrightarrow Q_{in} = -\phi_x \frac{h_{in}^3}{12 \mu} \frac{dp}{dx} + \frac{U_{pis}}{2} (h_{in} + \sigma \phi_s)$
- Tok ulpívající na vstupní hraně $\longrightarrow Q_{acc_in} = Q_{cyl} - Q_{in} = \frac{dx_{in}}{dt} (h_{in} - h_{cyl})$

– Rovnováha toku oleje na výstupní hraně

- Tok vyvolaný radiálním pohybem kroužku $\longrightarrow Q_{rad} = \int_{x_{in}}^{x_{out}} \frac{dh}{dt} dx$
- Tok opouštějící zaplavenou část $\longrightarrow Q_{out} = Q_{in} - Q_{rad}$
- Tok ulpívající na výstupní hraně $\longrightarrow Q_{acc_out} = \frac{dx_{out}}{dt} h_{out}$



WP08: Snižování mechanických ztrát pohonných jednotek

▪ Výzkum a vývoj výpočtových metod pro řešení mechanických ztrát mazací soustavy: Pístní kroužky a stanovení spotřeby oleje (VUT v Brně)

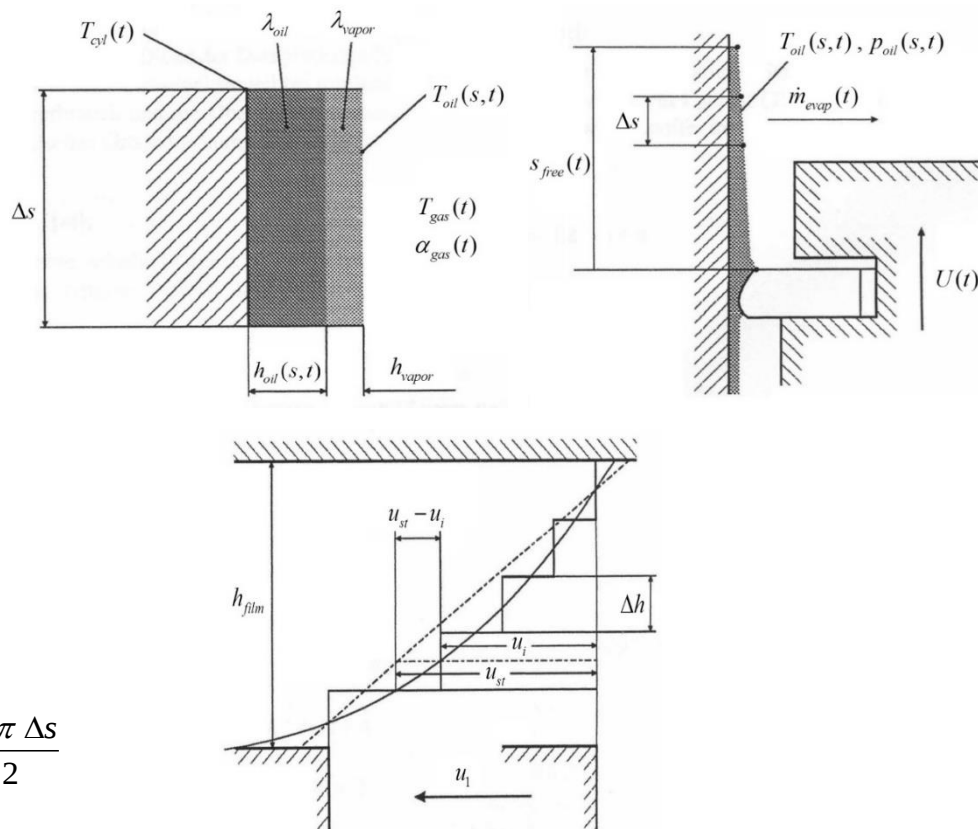
- Modul programu RingDYN
- Vypařování oleje z povrchu vložky válce
 - Nízké otáčky a vysoké zatížení
 - Vysoké teploty
 - Difuzní proces

$$\dot{m}_{\text{evap}}(t) = A_{\text{free}}(t) \frac{\beta(s,t) p_{\text{oil}}(s,t)}{R T_{\text{oil}}(s,t)}$$

- Vyhození oleje do prostoru válce
 - Vysoké otáčky a nízké zatížení
 - Vliv setrvačnosti

$$\dot{m}_{\text{scr}} = \rho \frac{\Delta V_{\text{scr}}}{\Delta t}$$

$$V_{\text{scr}}(t) = \left[(h_s + h_{s+\Delta s})_{\text{up}} - (h_s + h_{s+\Delta s})_{\text{down}} \right] \frac{D \pi \Delta s}{2}$$



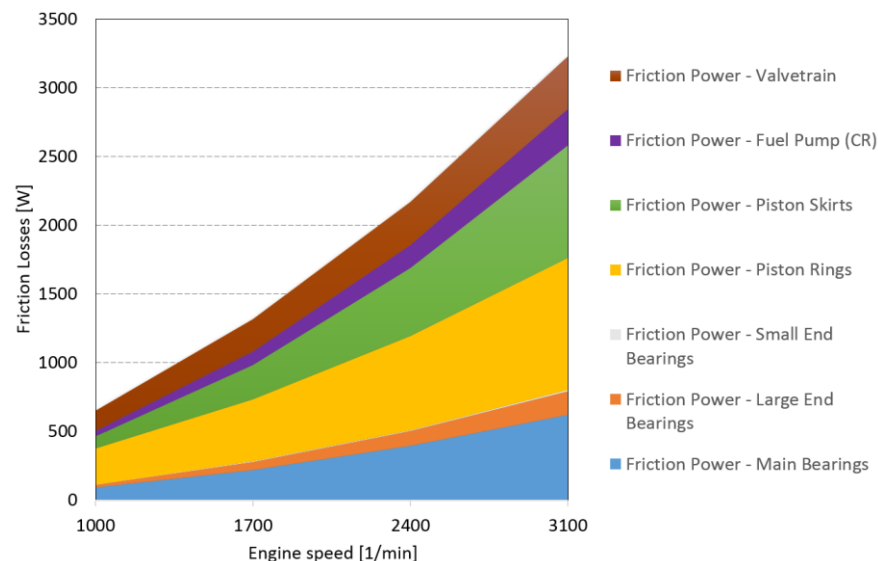
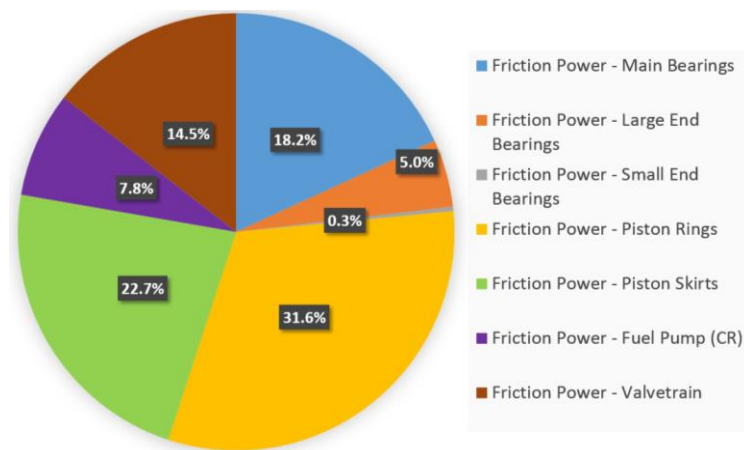
WP08: Snižování mechanických ztrát pohonných jednotek

▪ Dílčí výsledky: Aplikace matematického modelu pro predikci pasivních odporů zážehového motoru (ČVUT)

- Kalibraci matematického modelu pro predikci pasivních odporů → ověření pomocí experimentů na jednoválcovém motoru
- Výpočtově-experimentální přístup pro určení dílčích pasivních odporů třecích dvojic (technický experiment + GT Suite)

Rozložení mechanických ztrát motoru

Plné zatížení, $n = 2\,400\text{ min}^{-1}$

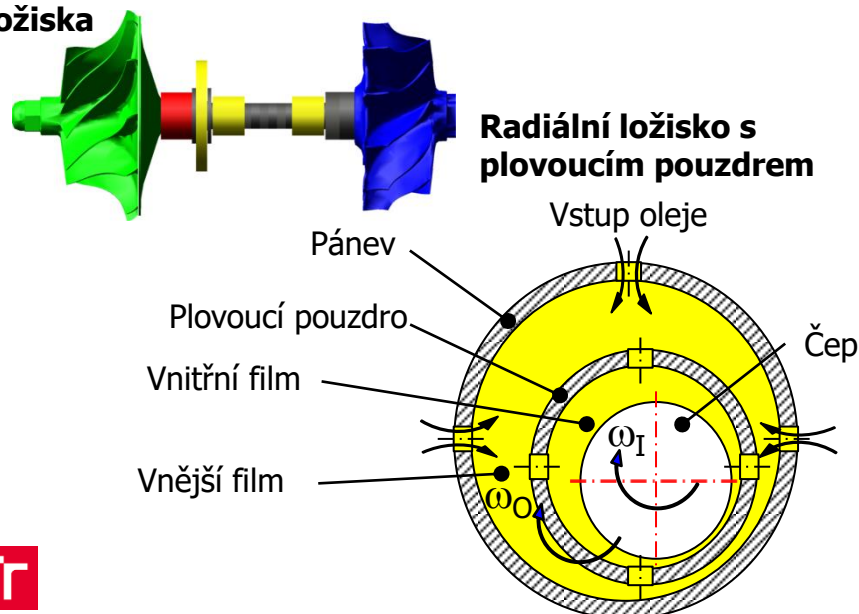


WP08: Snižování mechanických ztrát pohonných jednotek

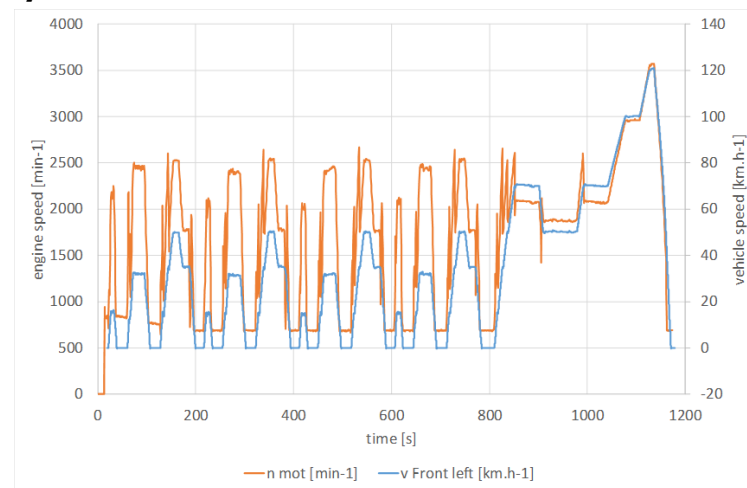
▪ Dílčí výsledky: Softwarový nástroj zahrnující rychlý model radiálních kluzných ložisek (VUT v Brně)

- Aplikace pro hydrodynamická ložiska rotorů turbodmychadel pro simulaci otáčkových rozběhů (WP06)
- Aplikace pro simulaci jízdních cyklů (NEDC, WLTP atd.)

Model rotor turbodmychadla včetně radiálního ložiska



Jízdní cyklus NEDC – otáčky motoru v závislosti na rychlosti vozidla



WP08: Snižování mechanických ztrát pohonných jednotek

▪ Dílčí výsledky: Experimentální stav pro stanovení třecí síly pístních kroužků (VUT v Brně)

- Ověření vlivu povrchových úprav a hodnocení opotřebení
- Základní parametry stavu
 - Zdvih $z = 0,25 \div 203,2$ mm
 - Max. síla $F = 8,8$ kN
 - Přesnost měření sil $0,13\%$ z aktuálně měřené hodnoty
- Provozní podmínky
 - Rychlost pohybu $f = 5 \div 100$ Hz ($n = 300 \div 6000$ min⁻¹)
 - Suché (smíšené mazání)
 - Teplotní rozsah $T = 20 \div 200$ °C (komponenty a olej)

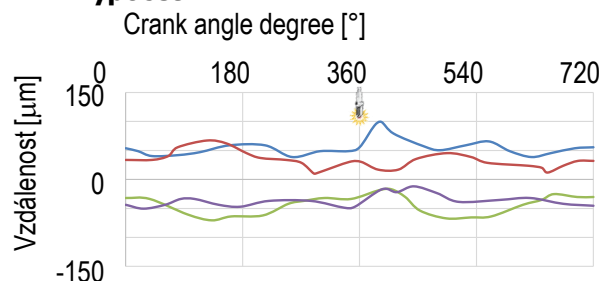


WP08: Snižování mechanických ztrát pohonných jednotek

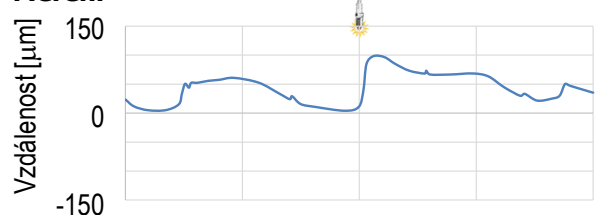
▪ Dílčí výsledky: Softwarový nástroj pro analýzu pohybu pístu a tvorby olejové vrstvy (VUT v Brně)

- Ověření dle experimentu a literatury
- Varianty modelu tloušťky olejové vrstvy (1,2,3)

EHD výpočet*

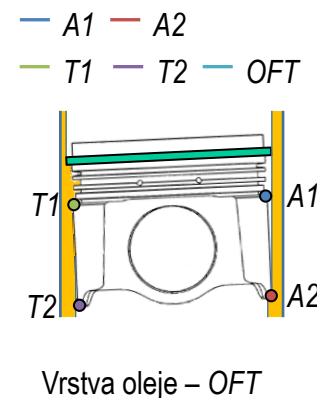


Měření*

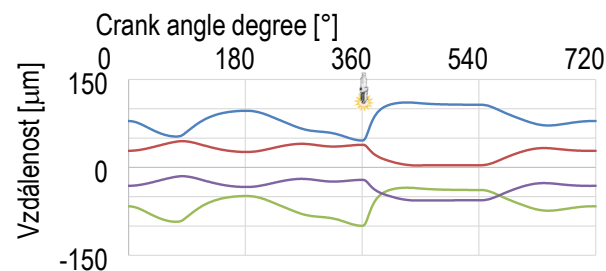


*Offner, G., Herbst, H., and Pribsch, H. A Methodology to Simulate Piston Secondary Movement under Lubricated Contact Conditions. SAE Technical Paper 2001-01-0565, 2001, doi:10.4271/2001-01-0565.

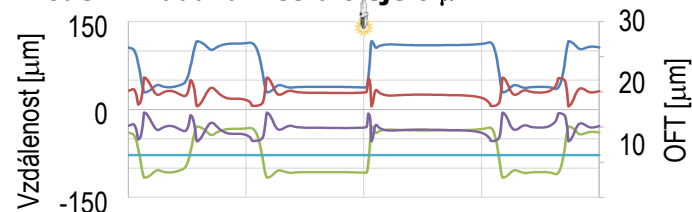
Schéma a označení



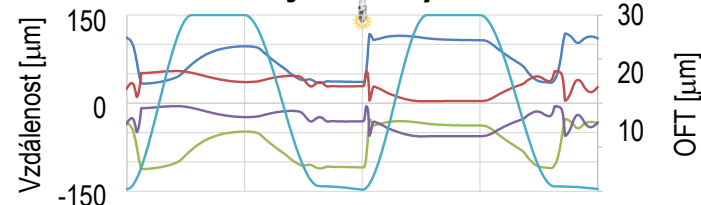
Model 1: Plně zaplavená mezera (Fully Flooded)



Model 2: Zadaná vrstva oleje 6 μm



Model 3: Tvorba olejové vrstvy



WP08: Snižování mechanických ztrát pohonných jednotek

▪ Výsledky dle RIV

- Příprava článku do časopisu MECCA, číslo IV/2016 (ČVUT)

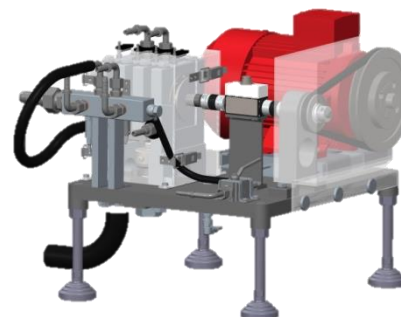
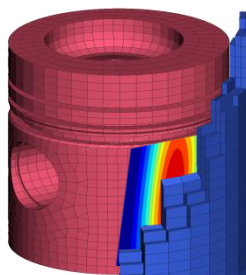
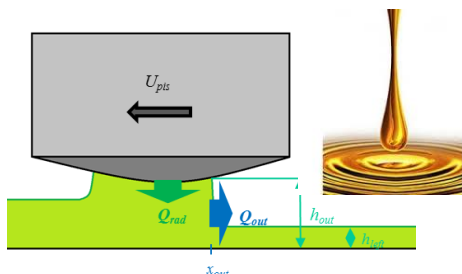
▪ Další dosažené výsledky

- Vlček, J.: Konstrukce pístních kroužků pro snížení pasivních odporů. Diplomová práce. 2016 (ČVUT)

WP08: Snižování mechanických ztrát pohonných jednotek

▪ Výhled činností v roce 2017

- Výpočtový nástroj pro stanovení spotřeby oleje → disertační práce Peter Raffai (VUT)
- Výpočtový nástroj pro řešení dynamiky a tribologie pístní skupiny (VUT)
- Dokončení experimentálního stavu pro ohodnocení třecích ztrát kluzných ložisek (VUT)



▪ Výhled výsledků v roce 2017

- Aplikace vyvinutých výpočtových nástrojů zlepšení parametrů tribologických dvojic
- Návrh konstrukčních zásad pro ložiska, kontakty pístu/kroužků a vložky válců
- Ověření vybraných konstrukčních řešení



WP08: Snižování mechanických ztrát pohonných jednotek

- **Děkuji za pozornost.**

WP08: Snižování mechanických ztrát pohonných jednotek

Hlavní výstupy 2016

Specializované výpočtové přístupy

- Pístní kroužky v kontaktu s vložkou válce
- Stanovení spotřeby oleje
- Podmínky smíšeného mazání
- Kontakty nerovností
- Vliv nerovností na mazání



Specializované elementární experimentální zařízení

- Měřicí stav pro stanovení třecí síly pístních kroužků
- Ověření vlivu povrchových úprav nebo tepelného zpracování
- Ověření výpočtových modelů



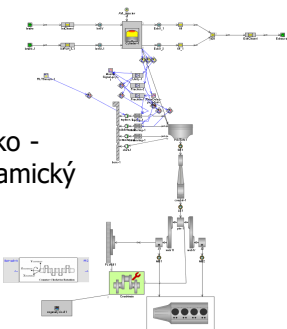
Specializované experimentální zařízení – makety motorů

- Ověření nových konstrukčních prvků spalovacích motorů
- Porovnání konstrukčních variant
- Ověření výpočtových modelů



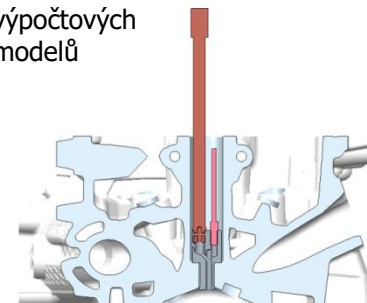
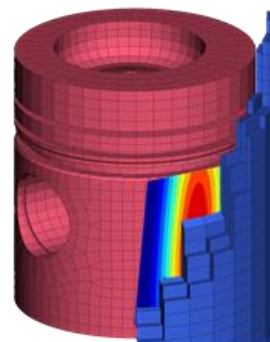
Výpočtové přístupy na bázi diskrétních modelů v GT Crank

- Rozšířený mechanicko-termodynamický model



3D výpočtové přístupy na bázi MBS

- Dynamika tuhých a pružných těles (3D)
- Podmínky smíšeného mazání
- Obecný pohyb
- Vliv na dynamiku a NVH



WP08: Reducing of Powertrain Mechanical Losses

Main Results 2016

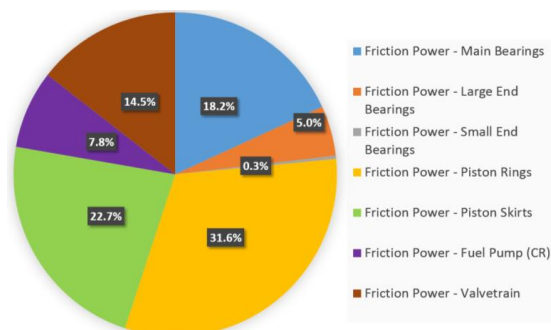
Specialized computational approaches

- Mixed lubrication conditions
- Surface roughness contacts
- Lubrication influenced by surface roughness



Discrete computational approaches based on GT Crank

- Extended mechanical-thermal model



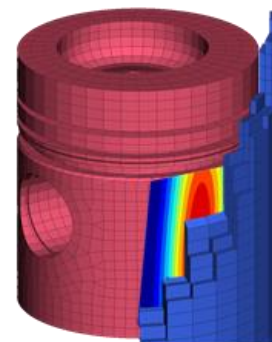
Specialized elementary experimental test benches

- Single purpose equipment
- Validation of surface modifications or chemical-heat treatments
- Validation of computational models



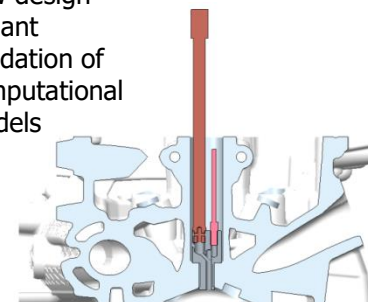
3D computational models based on MBS

- Flexible bodies based on FEM discretisation
- Mixed lubrication conditions



Specialized experimental motor benches

- Verifications and comparisons of new design variant
- Validation of computational models



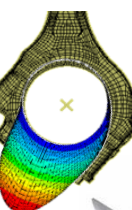
WP08: Snižování mechanických ztrát pohonných jednotek

Hlavní výstupy 2012 – 2016

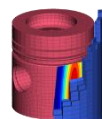
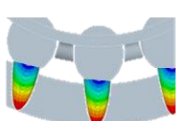
Specializované výpočtové přístupy

- Detailní řešení pro kluzná a valivá ložiska, pístní kroužky, píst, profuky pístní skupinou atd.
- Podmínky smíšeného mazání
- Kontakty nerovností
- Vliv nerovností na mazání
- Proměnné vlastnosti maziv

BearDYN 4.5



RoliDYN 1.0

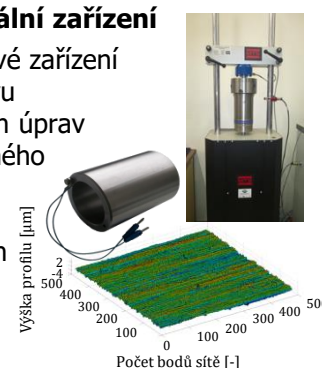


RingDYN 2.0



Specializované elementární experimentální zařízení

- Jednúčelové zařízení
- Ověření vlivu povrchových úprav nebo tepelného zpracování
- Ověření výpočtových modelů



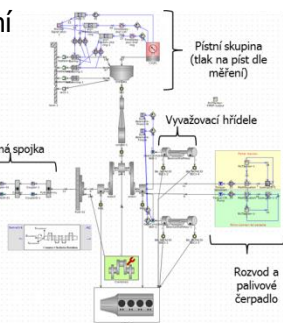
Specializované experimentální zařízení – makety motorů

- Ověření nových konstrukčních prvků spalovacích motorů
- Porovnání konstrukčních variant
- Ověření výpočtových modelů



Výpočtové přístupy na bázi diskrétních modelů v GT Crank

- Rychlé, robustní řešení
- Podmínky smíšeného mazání
- Multi-fyzikální modely
- Koordinace s technickými experimenty



3D výpočtové přístupy na bázi MBS

- Dynamika tuhých a pružných těles (3D)
- Podmínky smíšeného mazání
- Obecný pohyb
- Vliv na dynamiku a NVH



Jednóválcový experimentální motor

- Vývoj dílčích konstrukčních skupin v reálných podmínkách
- Porovnání konstrukčních variant
- Ověření výpočtových modelů



Metodika pro sériové motory

- Ověření finálních řešení
- Dlouhodobé zkoušky
- Ověření výpočtových modelů

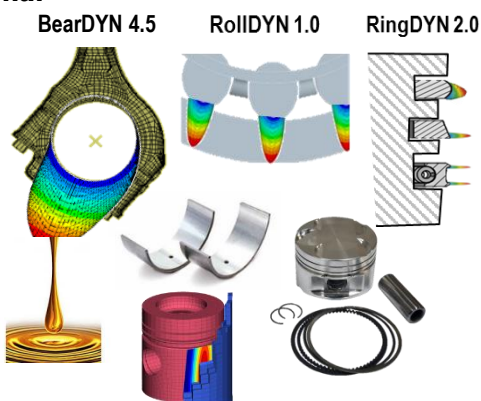


WP08: Reducing of Powertrain Mechanical Losses

Main Results 2012 – 2016

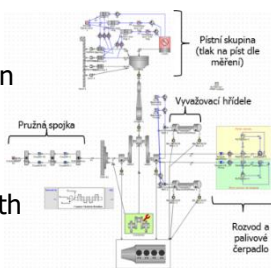
Specialized computational approaches

- Detailed solution of slide and rolling bearings, piston rings, piston assembly, blow-by etc.
- Mixed lubrication conditions
- Surface roughness contacts
- Lubrication influenced by surface roughness



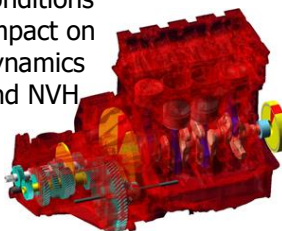
Discrete computational approaches based on GT Crank

- Fast and robust solution
- Mixed lubrication conditions
- Multi-physical solutions
- Coordination with technical experiments



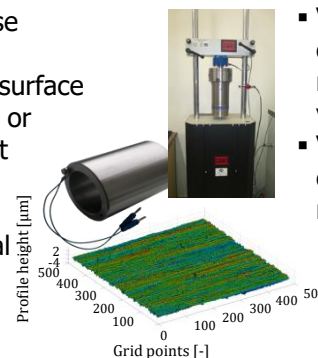
3D computational approaches based on MBS

- General dynamics of 3D flexible bodies
- Mixed lubrication conditions
- Impact on dynamics and NVH



Specialized elementary experimental test benches

- Single purpose equipment
- Validation of surface modifications or chemical-heat treatments
- Validation of computational models



Specialized experimental motor benches

- Verifications and comparisons of new design variant
- Validation of computational models



Tests on single-cylinder experimental engine

- Research and development of engine subsystems in real conditions
- Comparison of design variants
- Validation of computational models



Methodology for series engines

- Validations of final solutions
- Long term tests
- Validations of computational models

