



**MEZNÍ A DEGRADAČNÍ PROCESY MAGNETOREOLOGICKÝCH  
TLUMIČŮ ODPRUŽENÍ**

**Ing. Jakub Roupec**

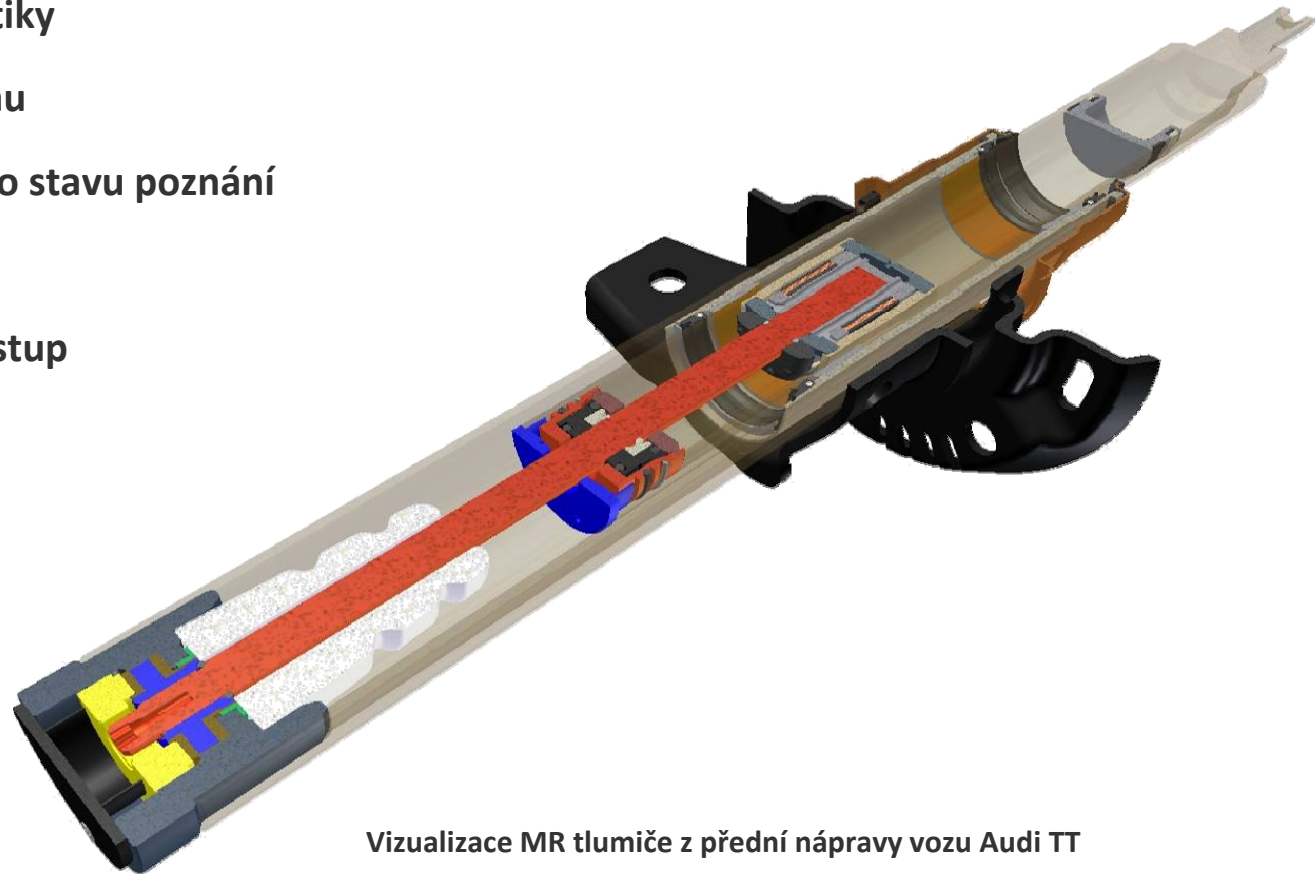
**ústav  
konstruování**

**Školitel: Doc. Ing. Ivan Mazůrek, CSc.**

**Obhajoba disertační práce**

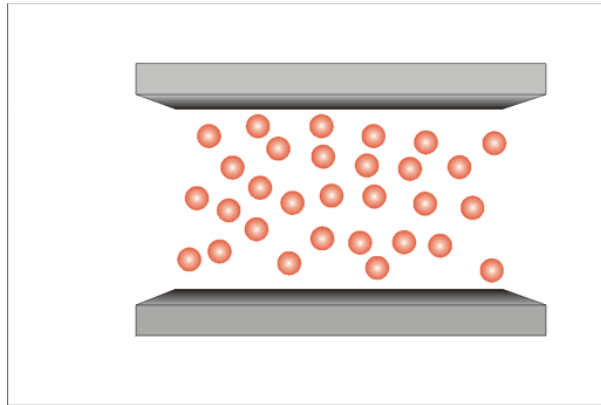
**23. listopad 2011, FSI VUT v Brně, Česká republika**

- úvod do problematiky
- formulace problému
- přehled současného stavu poznání
- cíl disertační práce
- experimentální přístup
- výsledky
- závěr
- publikace
- projekty

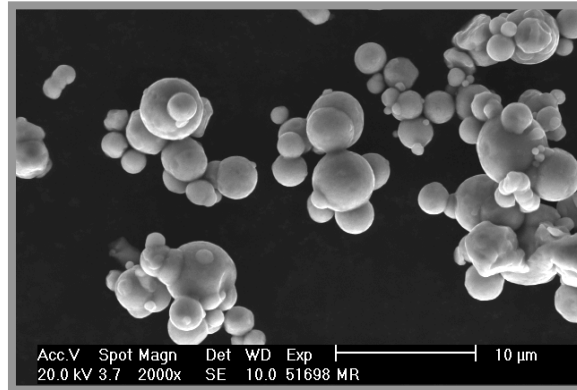


Vizualizace MR tlumiče z přední nápravy vozu Audi TT

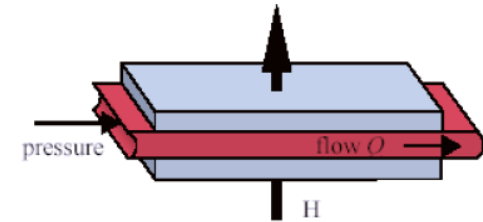
# Úvod do problematiky – MR kapalina



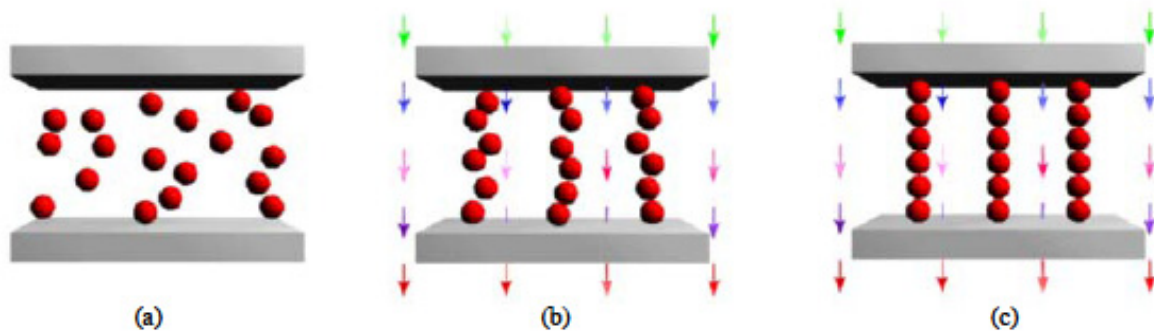
MR efekt



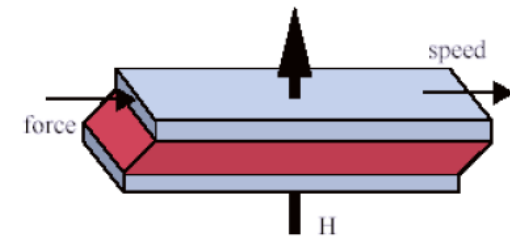
snímek Fe-částic z elektronového mikroskopu  
(2 000x zvětšeno)



Axiální tlakové proudění  
(ventilový mód)



Jeong-Hoi Koo (2003)



Tangenciální beztlakové proudění  
(smykový mód)

# Úvod do problematiky – aplikace MR kapaliny



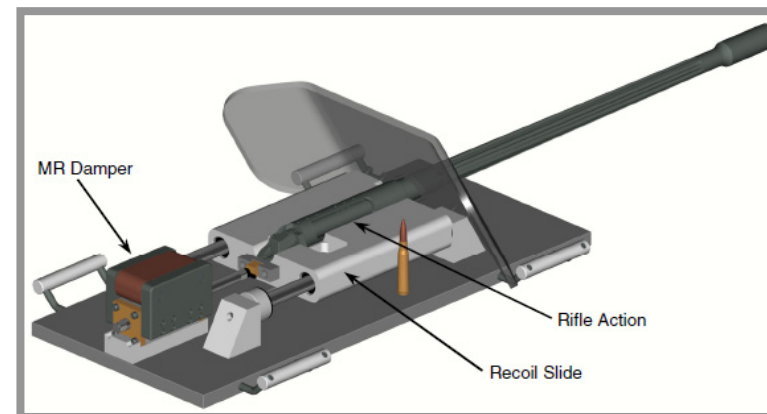
Magnetic Ride – tlumič  
Corvette C5 [1]



Detail MR ventilu [1]



Tlumení protězy [2]



Tlumení zpětného rázu děla [2]

- 2002 – General Motors (Escalade, Corvette, ...)
- 2006 – Audi (TT a R8)
- 2007 – BMW
- 2010 – Porsche (GT2 a GT3)
- 2011 – Honda (Acura)

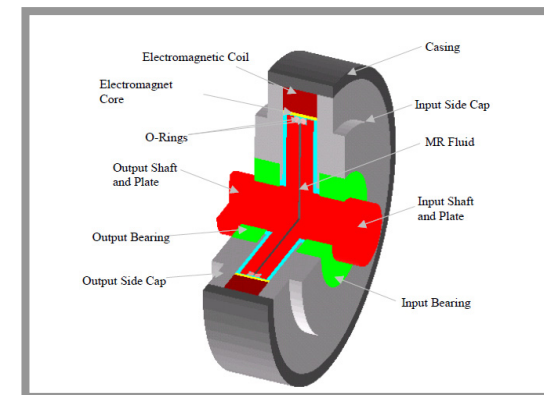
[1] Halverson, H. (2002)

[2] Poynor, J. (2001)

[3] <http://www.lord.com> (cit. 2011)



Tlumení sedadla nákladního vozu [3]



MR spojka [2]

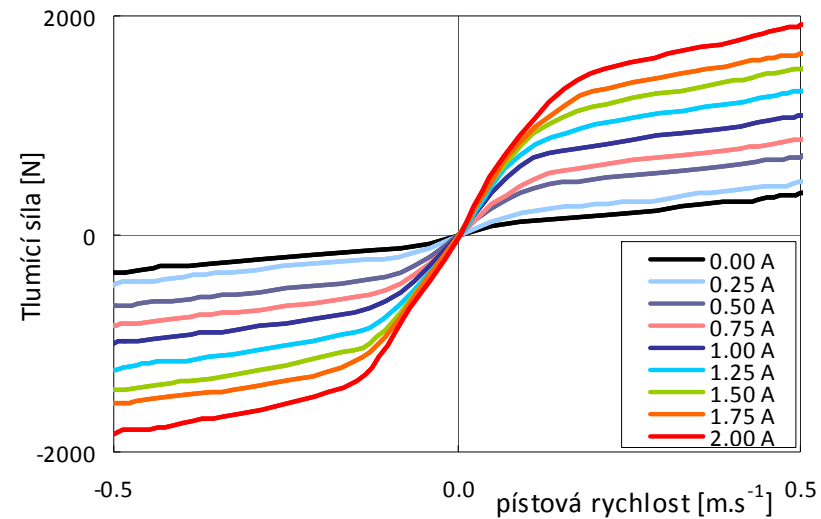
# Úvod do problematiky – aplikace MR kapaliny



Magnetic Ride – tlumič  
Corvette C5 [1]



Detail MR ventilu [1]



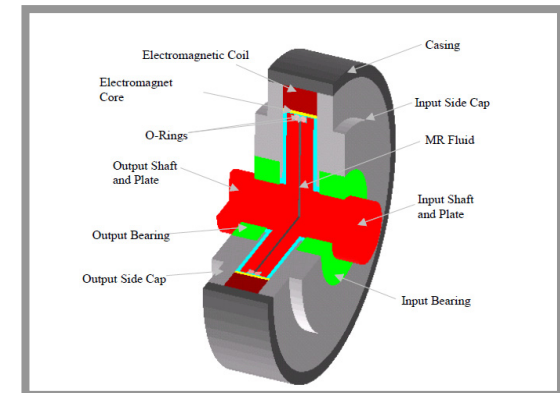
F-v charakteristika MR tlumiče z přední nápravy Audi TT

- 2002 – General Motors (Escalade, Corvette, ...)
- 2006 – Audi (TT a R8)
- 2007 – BMW
- 2010 – Porsche (GT2 a GT3)
- 2011 – Honda (Acura)

- [1] Halverson, H. (2002)  
[2] Poynor, J. (2001)  
[3] <http://www.lord.com> (cit. 2011)



Tlumení sedadla nákladního vozu [3]



MR spojka [2]

# Formulace problému

- popis Neneutonského chování MR kapaliny

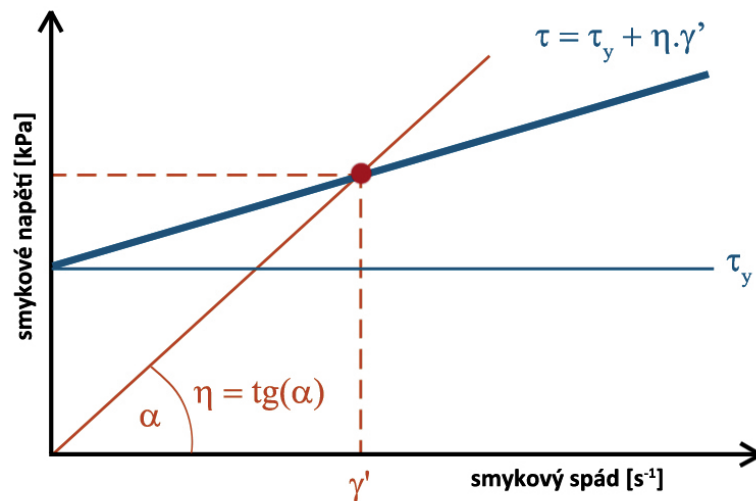
- zdánlivá viskozita  $\tau = \eta \frac{du}{dx}$

- reologická stavová rovnice (Binghamův model) – matematický popis

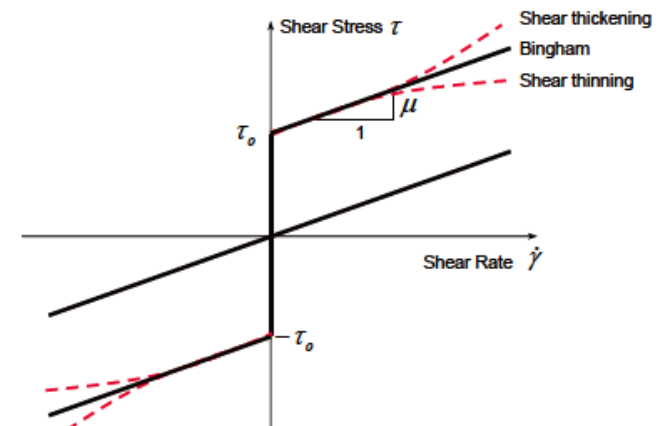
- změna parametrů stavové rovnice během dlouhodobého zatěžování

$$\tau = \pm \tau_0 + \eta \cdot \dot{\gamma}'$$

mez kluzu                      viskozita



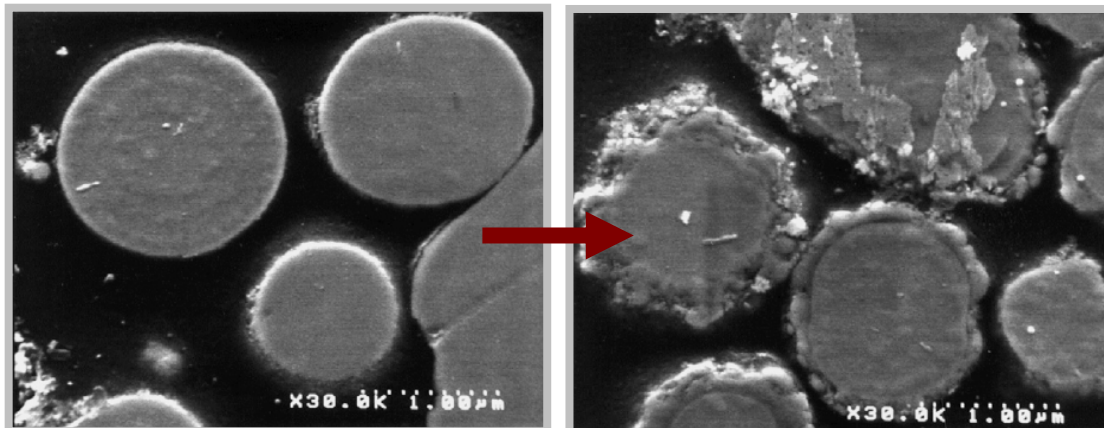
**zdánlivá viskozita není v případě Neneutonské kapaliny materiálová konstanta**



Goncalves, Fernando D. (2005)

## Přehled současného stavu poznání – provozní houstnutí

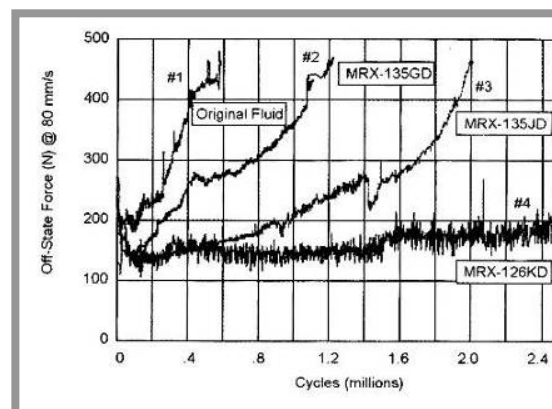
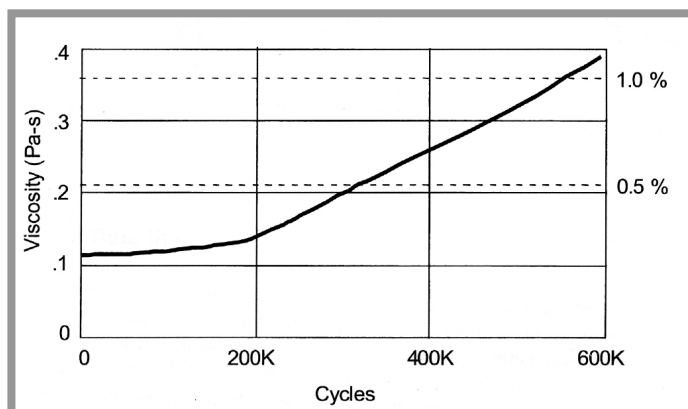
- „In-Use-Thickening“
- průvodní jev – oxidace
- nárůst konzistence v „off-state“
- vliv teploty ??
- vliv smykového spádu ??



ULICNY, J.C. et al. Magnetorheological fluid durability test – Iron analysis. *Material Science and Engineering*, June 2006, vol. 443, no. 1-2, p. 16-24



**popis pomocí zdánlivé viskozity => popis chování pouze v jednom bodě tokové křivky**



Carlson, J. D. Critical factors for MR fluids in vehicle systems, *International Journal of Vehicle Design*, 2003

# Přehled současného stavu poznání – degradace MR efektu

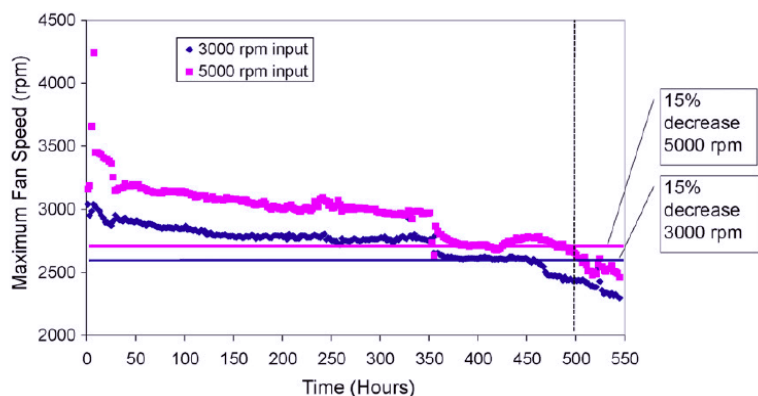
- průvodní jev - oxidace
- nižší magnetické nasycení částic
- vyšší magnetická remanence



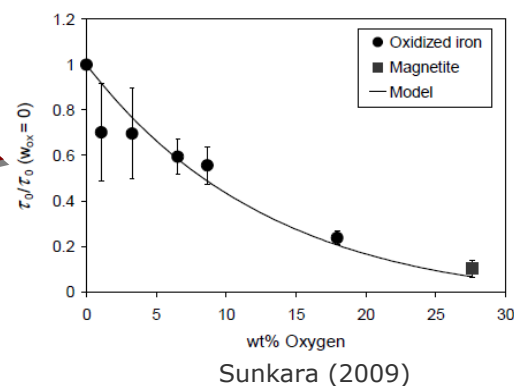
pokles meze kluzu v aktivovaném stavu



**smykový mód (MR spojka)**



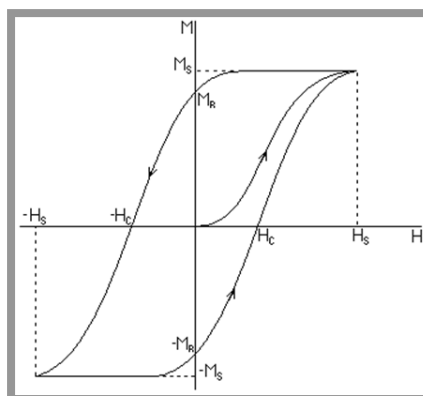
Ulicny, J. (2006)



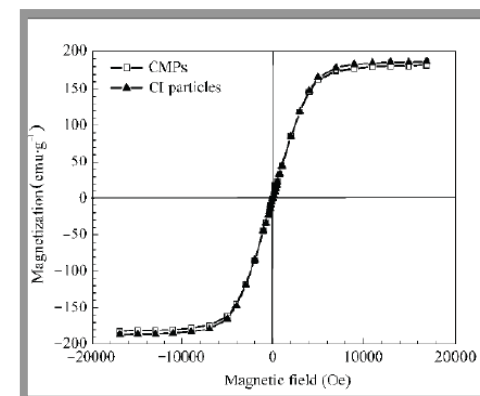
Sunkara (2009)

Sample	$M_s / (\text{emu} \cdot \text{g}^{-1})$	$\Delta M_s / M_s H_c / \text{Oe}$	$\Delta H_c / H_c$	$M_r / (\text{emu} \cdot \text{g}^{-1})$	$\Delta M_r / M_r$
CI particles	186.6	4.07	0.1871		
B'	175.6	-5.9%	9.12 +124.1%	0.5670	+203.0%

CHENG Hai-Bin (2008)



Ilustrační hysterézní křivka



Reálná hysterézní křivka  
CHENG Hai-Bin (2008)



**pro predikci poklesu meze kluzu je nutné stanovit míru oxidace v průběhu zatěžování**

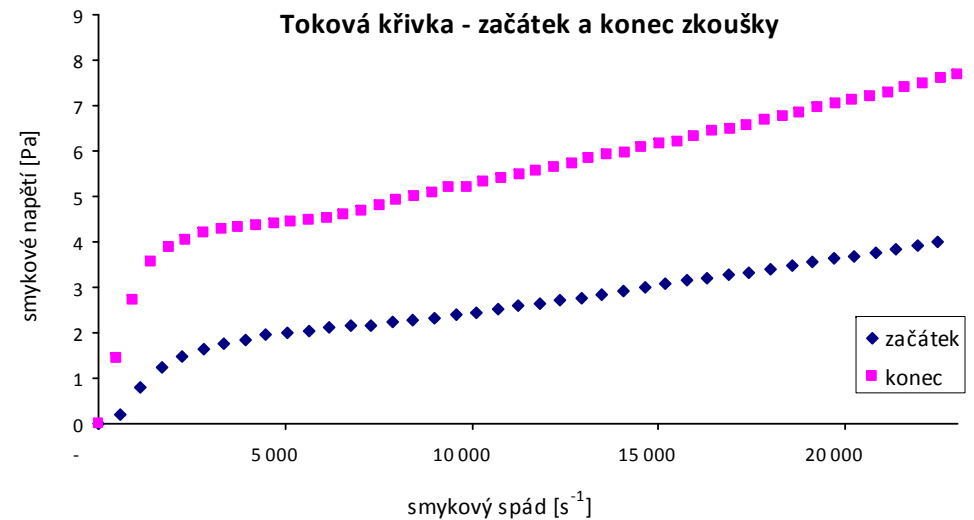
# Cíl disertační práce

**Analýza změny chování MR kapaliny ve vysokých smykových rychlostech v průběhu dlouhodobého zatěžování a sledování vlivu teploty na toto chování**

- v neaktivovaném stavu (provozní houstnutí)
- v aktivovaném stavu (MR efekt)



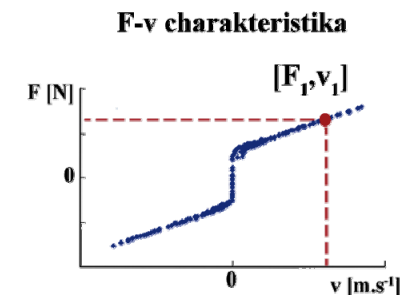
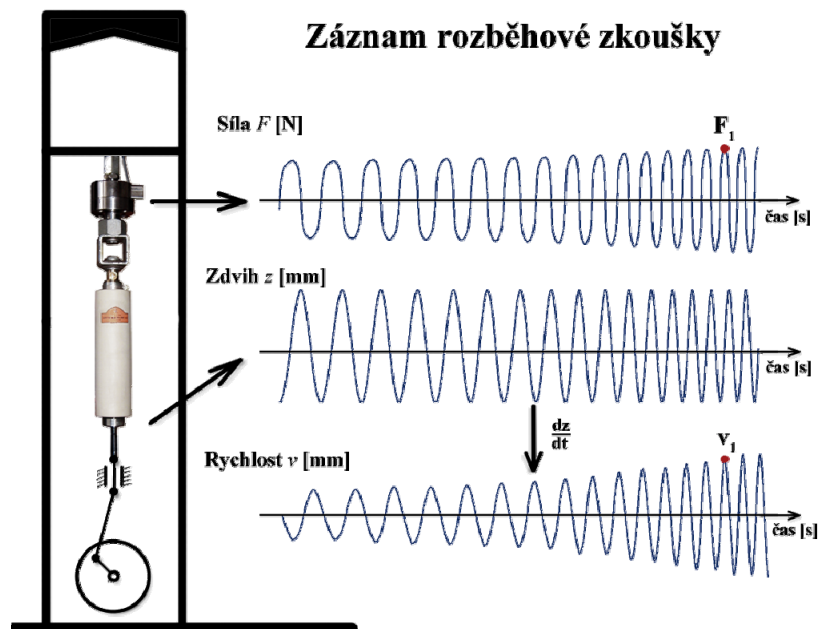
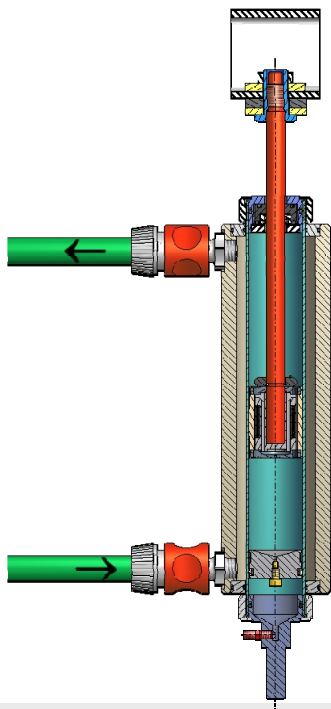
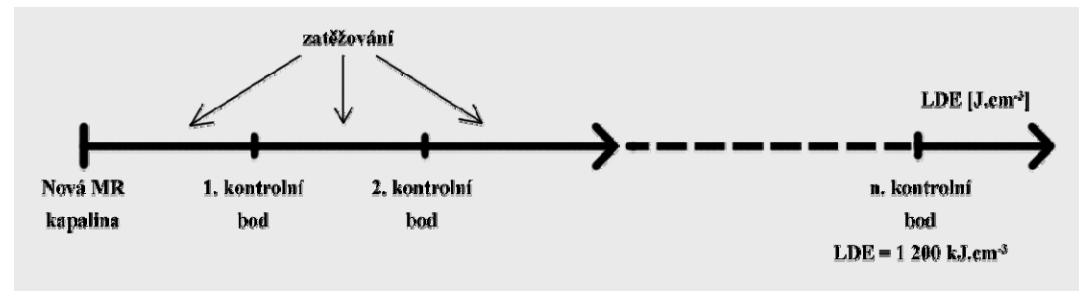
MR kapalina před a po dlouhodobém zatěžování



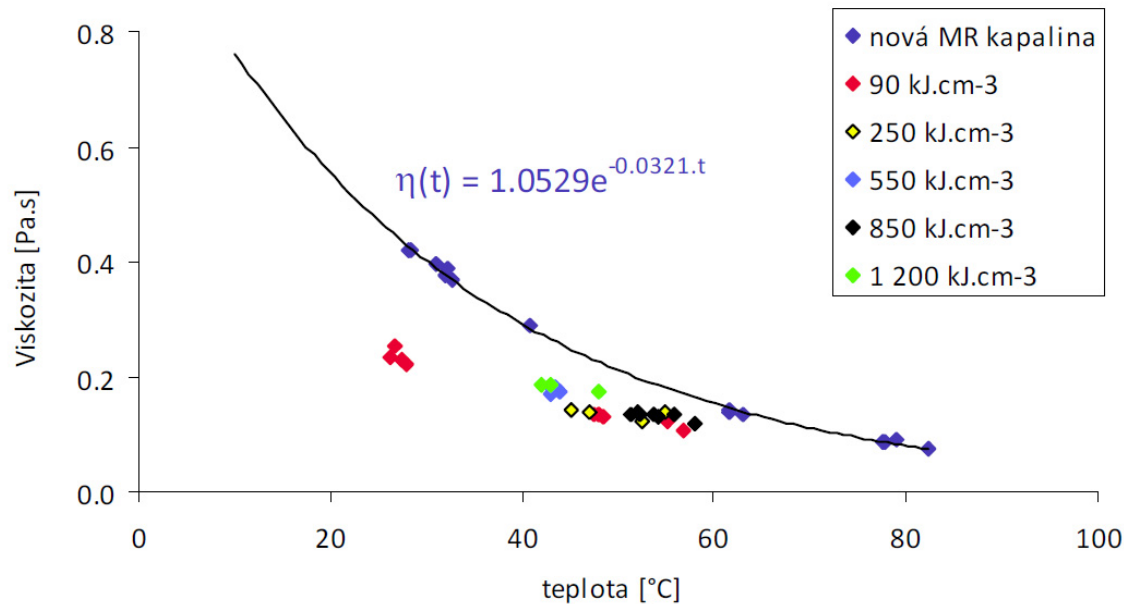
# Experimentální přístup

## Metody:

- konverze  $F$ - $v$  charakteristiky na tokovou křivku
  - $F \rightarrow \tau$
  - $v \rightarrow \dot{\gamma}$
- popis tokové křivky pomocí Binghamského modelu
  - viskozita  $\eta$
  - mez kluzu  $\tau_y$



# Výsledky – neaktivovaný stav - viskozita

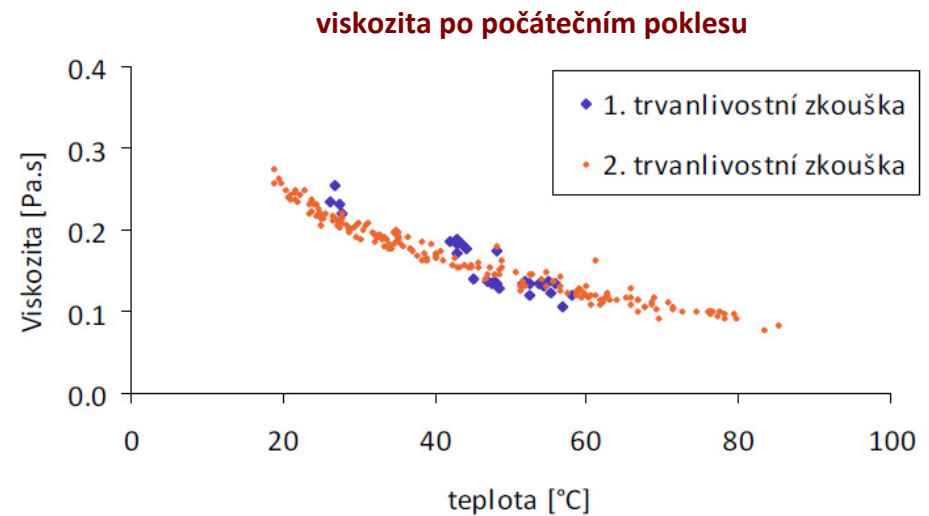


1. trvanlivostní zkouška  
střední teplota 50°C

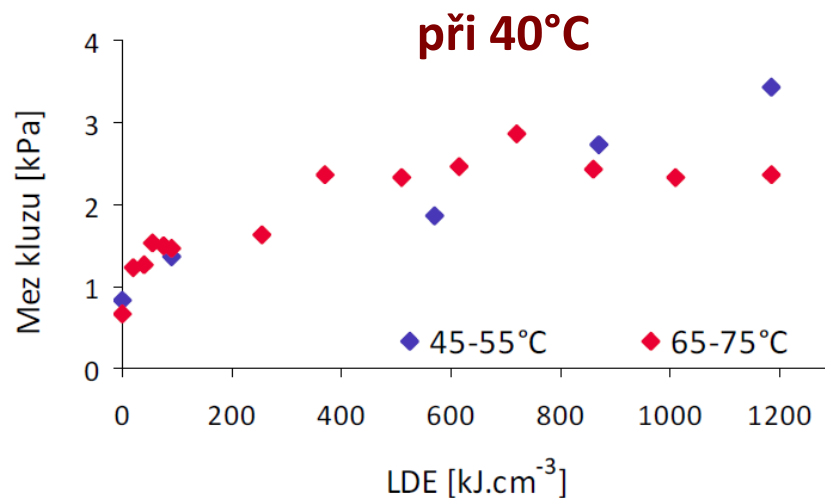
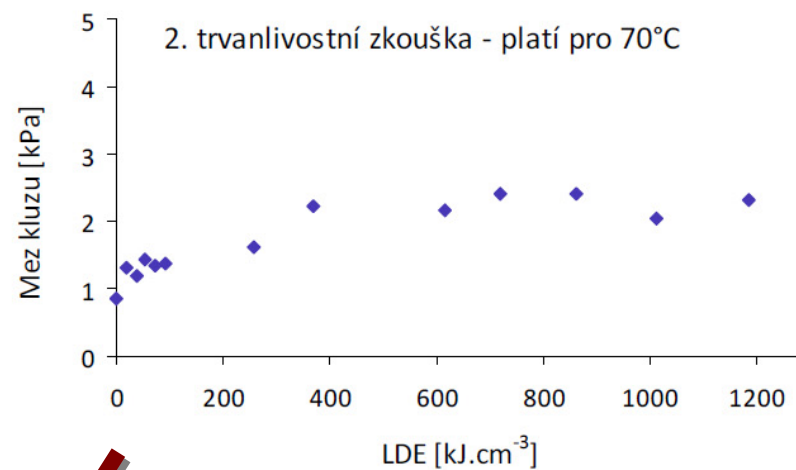
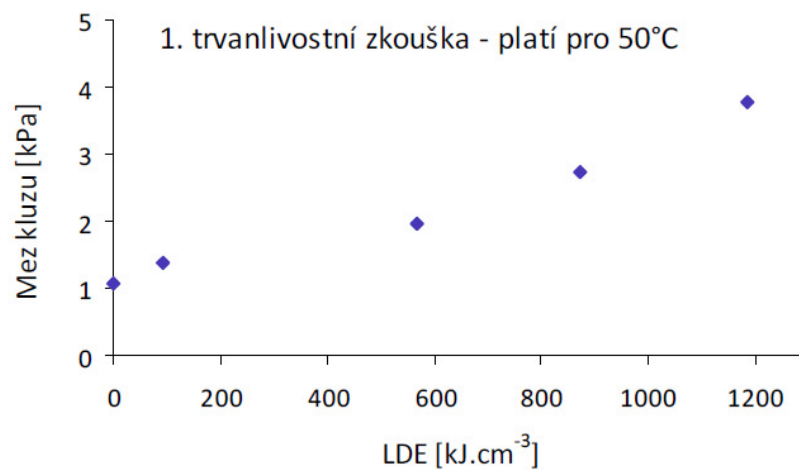
pokles již od 14 kJ.cm<sup>-3</sup>

## porovnání zatěžovacích teplot

- 1. trvanlivostní zkouška 50°C
- 2. trvanlivostní zkouška 70°C

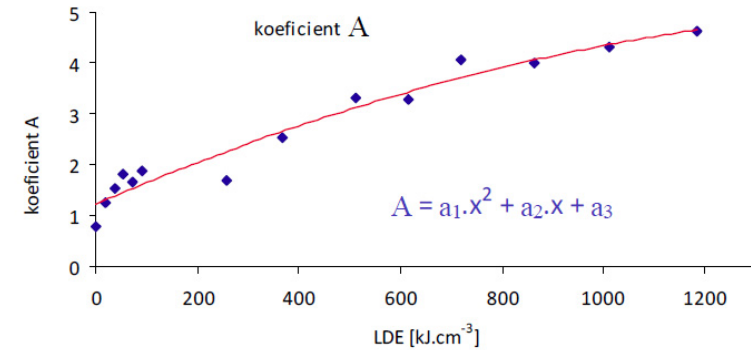
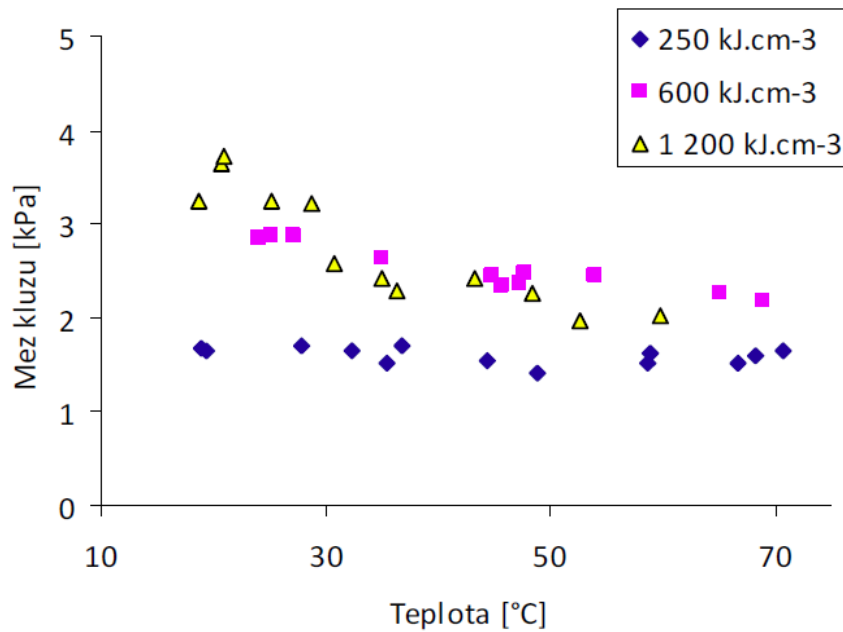


## Výsledky – neaktivovaný stav – mez kluzu

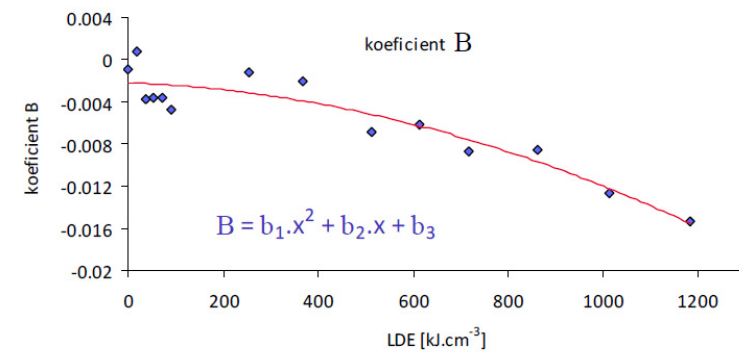


vyšší teplota  
↓  
nižší viskozita  
↓  
menší mechanické zatížení  
↓  
méně „odlomených“ oxidů  
↓  
menší mez kluzu  
↓  
„tekutější“ konzistence

# Výsledky – neaktivovaný stav – mez kluzu



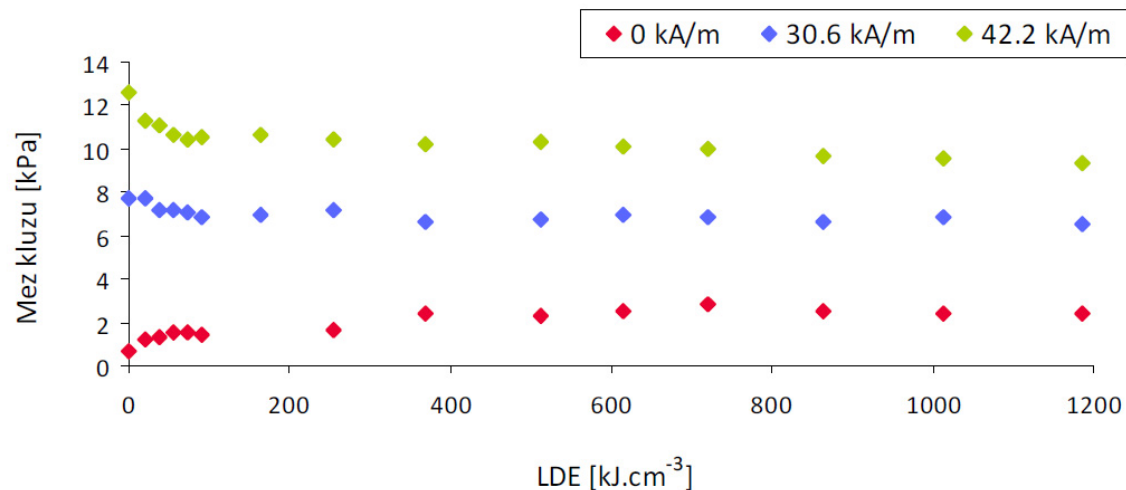
$$\tau_y(t) = A \cdot e^{Bt}$$



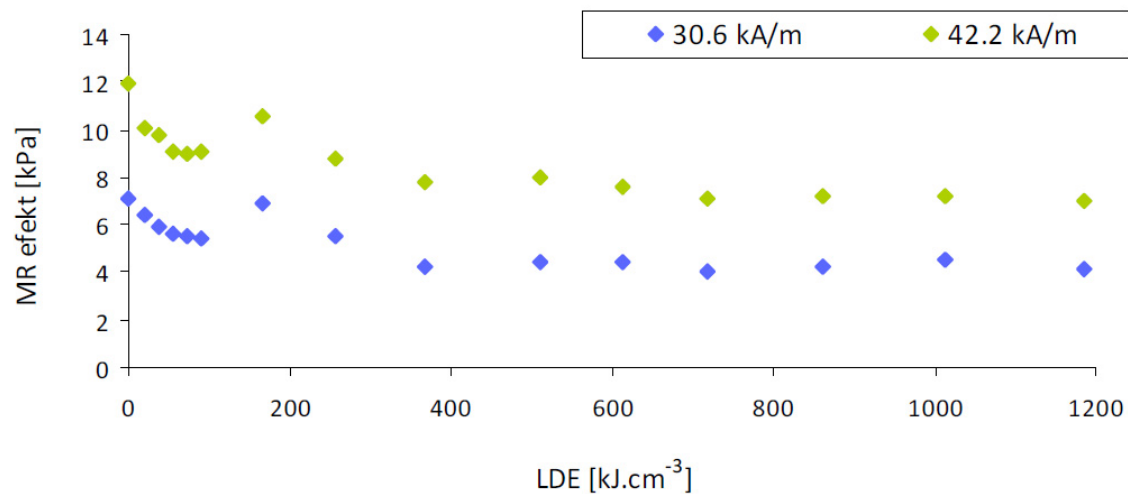
$$\tau_y(LDE, t) = (a_1 \cdot LDE^2 + a_2 \cdot LDE + a_3) \cdot e^{(b_1 \cdot LDE^2 + b_2 \cdot LDE + b_3) \cdot t}$$

Pozn.: platí pro zatěžovací teplotu 70°C

## Výsledky – aktivovaný stav – MR efekt



! v aktivovaném stavu se v mezi kluzu projevuje i provozní houstnutí (neaktivovaný stav)



! pokles MR efektu o 40%

## Prezentované výsledky

- Byla popsána změna parametrů Binghamského modelu v průběhu dlouhodobého zatěžování ve vysokých smykových rychlostech (**dosud nepublikováno**)
  - v neaktivovaném stavu
  - v aktivovaném stavu

## Neprezentované výsledky

- navržení diagnostické metody pro bezdemontážní stanovení provozního stavu MR kapaliny
- zpřesnění parametrů MR kapaliny udávaných výrobcem
- popis tepelné degradace MR kapaliny
- vývoj reometrické zatěžovací jednotky (patent)

tepelná degradace MR kapaliny



## Publikace autora k dané problematice

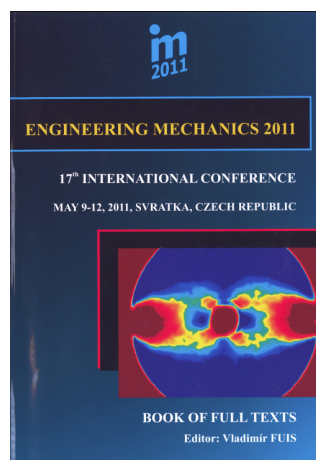
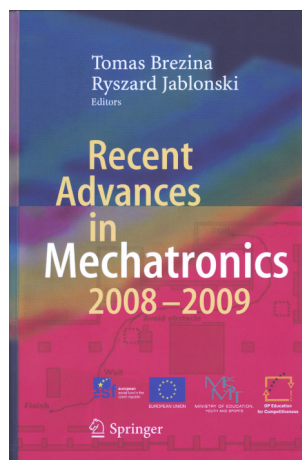
MAZŮREK, I.; ROUPEC, J.; KLAPKA, M.; STRECKER, Z. Load and rheometric unit for the test of magnetorheological fluid. *Meccanica*. stav: po 1. revizi - **Minor revisions needed**.

MAZŮREK, I. ROUPEC, J.; KLAPKA, M.; STRECKER, Z. Slit flow rheometer for high shear rate. *Engineering Mechanics*. stav: **po korekci u recenzenta**.

ROUPEC, J.; MAZŮREK, I.; Stability of magnetorheological effect during long term operation. In *Mechatronics*. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag. 2011. p. 561 - 567. ISBN 978-3-642-23243-5.

ROUPEC, J.; MAZŮREK, I.; STRECKER, Z. Changing the behavior of MR fluids during long term operation. In *Engineering Mechanics 2011*. 17th international Conference. Brno, IT ASCR. 2011. p. 519 - 522. ISBN 978-80-87012-33-8.

ROUPEC, J.; MAZŮREK, I.; KLAPKA, M.; ČÍŽ, P. Identification of MR Fluids properties in Mechatronic Damping Elements. In *Recent Advances in Mechatronics 2008 - 2009*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2009. p. 115 - 120. ISBN 978-3-642-05021-3.



Obhajoba disertační práce

23. listopad 2011, FSI VUT v Brně, Česká republika

16/17

 ústav  
konstruování

## Řešené projekty autora k dané problematice

### 2008

Studium a měření tokových křivek magnetoreologických kapalin s pomocí adaptovaného MR hydraulického tlumiče (řešitel)

### 2009

Reometr pro demonstraci chování magnetoreologických kapalin (řešitel)

### 2010

Degradační procesy magnetoreologických tlumících prvků (řešitel)

### 2011

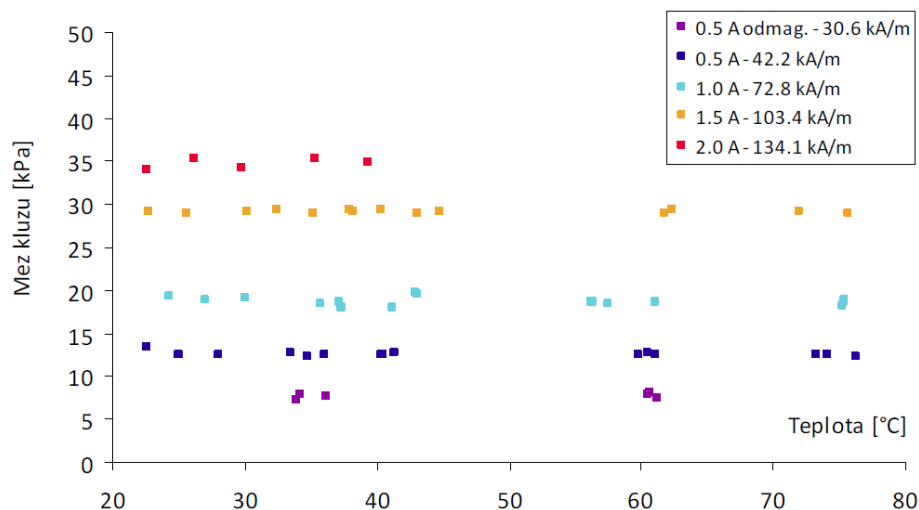
Vliv degradačních procesů na reologické vlastnosti MR kapaliny (spoluřešitel)  
Demonstrace funkčního vývoje tlumení závěsu kol (spoluřešitel)

**Děkuji za pozornost!**

Na straně 45 je uvedeno, že k měření teploty kapaliny „byla s úspěchem využita závislost odporu vinutí cívky na teplotě“ a na straně 66 je uvedeno, že „MR kapalina byla měřena při rozběhových zkouškách v intervalu teplot 20-75°C“. V rámci obhajoby žádám autora o zdůvodnění zvolení teplotního intervalu 20-75°C.

- 20°C je stabilní teplota ve zkušebně
- 75°C je max. provozní teplota původního MR tlumiče

Na str. 84 obr. 6.16 autor uvádí závislost meze skluzu MR v aktivovaném stavu na teplotě. Při obhajobě žádám autora o stanovisko k uvedené závislosti.



Obr. 6.16 Závislost meze skluzu MR kapaliny v aktivovaném stavu na teplotě a proudu

- mez kluzu je nezávislá na teplotě
- mez kluzu je generovaná působením magnetických sil => v daném intervalu v podstatě nezávislá na teplotě



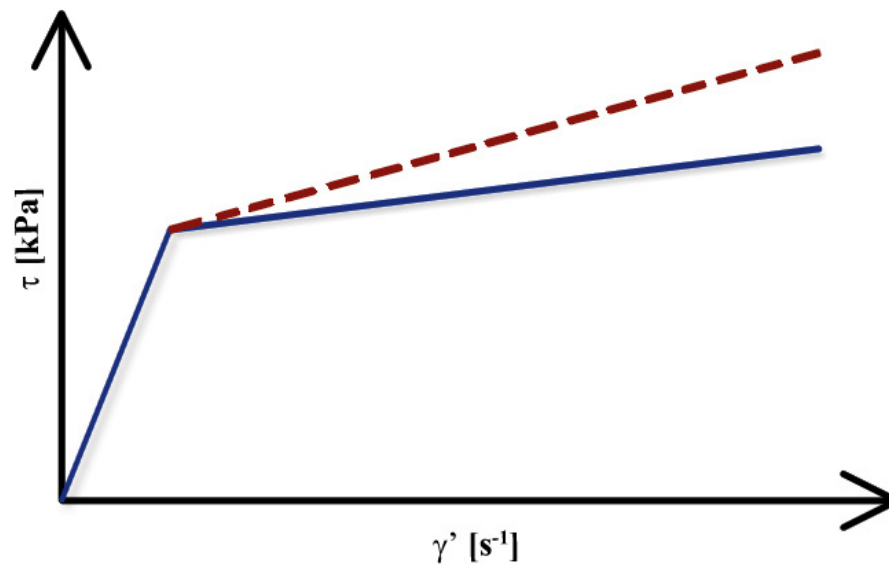
**nová MR kapalina**

Umožňuje sestrojený reometr, bez konstrukčních úprav, měřit kapaliny při nižších teplotách než při zvolených 20 °C?

- umožňuje – studená voda ve vodovodním řádu do cca 8 °C
- nižší teploty – uzavřený chladicí okruh s kapalným médiem s nižší teplotou tuhnutí

Existuje způsob jak po dlouhodobém zatěžování opět u MR kapaliny zvýšit její viskozitu? Pokud ano, je to vhodné?

- zvýšení viskozity oleje po přidání příslušného aditiva
  - po přidání aditiva by musela být otestována stabilita parametrů modelu chování MR kapaliny v průběhu dlouhodobého zatěžování, tzn. určit čas vyprchání účinnosti aditiva
  - studium vlivu aditiva na ostatní chování nosné složky MR kapaliny (viskozitní index, antioxidační schopnosti, detergentní vlastnosti, atd.)
- zvýšení viskozity vlivem oxidace oleje, ale! Kyslík vykazuje daleko vyšší afinitu k čistému železu než k uhlovodíkovým řetězcům, takže by napřed muselo dojít k úplnému zoxidování Fe-částic
- bylo by to vhodné, pokud by bylo třeba výrazněji odlišit smykové napětí při nízkých a vysokých smykových spádech



Na straně 34 je konstatováno, že není známo, jaký bude mít vliv zvýšení remanentního magnetizmu částic. Jestliže se vyjde z toho, že před magnetizací jsou částice bez remanence natočeny náhodně, je výsledkem nulová magnetizace. V případě remanence bude převažovat jeden směr natočení, takže remanence může mít vliv na citlivost reologické kapaliny na magnetické pole.

- v disertační práci bylo uvedeno, že není zřejmý dopad zvýšené remanence částic na reakční čas MR kapaliny. Je opravdu možné, že se zvětší citlivost a zkrátí se reakční doba MR kapaliny. Hypoteticky by se mohly remanentně zmagnetované částice natočit svými dipóly ve směru magnetických siločar aplikovaného pole rychleji než částice odemagnetované. Tím by mohlo dojít k jejich rychlejšímu nasycení a vyvolání MR efektu.
- tento předpoklad vyžaduje měření rychlosti sycení Fe částic
- problematikou simulace pohybu částic MR kapaliny při průchodu magnetickým polem se zabývá Prof. Pochylý a nejde o jednoduchou záležitost.

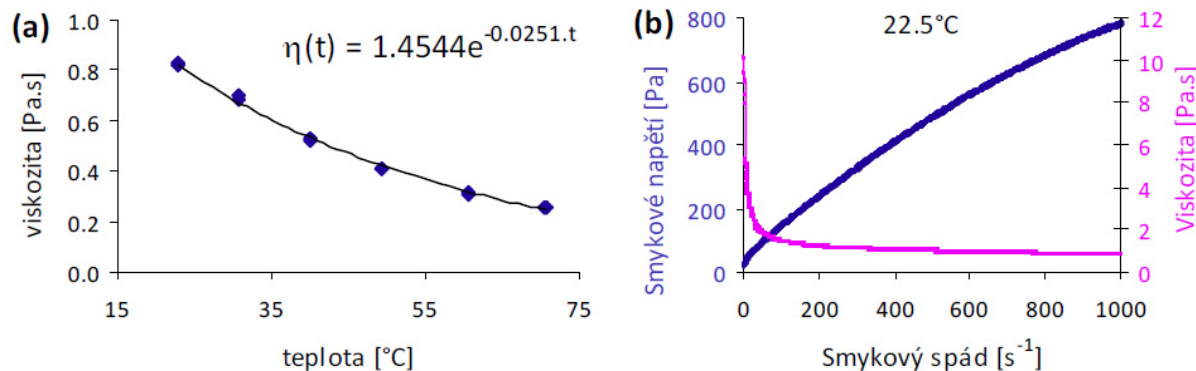
Na str. 35 je konstatování, že následkem oxidace se sníží permeabilita a jsou nižší otáčky při konstantním proudu. Není to naopak, zvýšená permeabilita má za následek snížení otáček!?

- jedná se o MR spojku, kde vyšší magnetická indukce uvnitř spojky zajistí lepší sepnutí, popř. menší prokluz
- nižší permeabilita = nižší magnetická indukce

Na straně 54 je výčet monitorovaných veličin. Vysvětlete pojmy okamžitý výkon a celkový výkon v návaznosti na deklarovaný časový úsek.

- došlo k překlepu, správně: celková práce
- pojem okamžitý výkon má vyjadřovat výkon ve velice krátkém časovém intervalu 5s (z hlediska trvanlivostní zkoušky)

Na straně 101, v Tab. 6.2 hodnoty uváděné výrobcem a hodnoty naměřené autorem. Hodnoty se liší téměř o 100%. Autor práce to zdůvodnil lakonickým: „Z výsledků lze vyvodit závěr, že údaje poskytované výrobcem nejsou přesné.“ Je si autor tak jist přesností svého měření? V práci jsem nikde neviděl vyjádření nejistot měření.



Obr. 6.9 MR kapalina 140CG (a) závislost viskozity na teplotě; (b) sweep při teplotě 22,5°C

- nejistoty nebyly počítány
- měření probíhalo na velice přesném rotačním viskozimetru Rotovisco
- toková křivka v grafu je sestavena z 1000 naměřených hodnot. Je patrné, že náhodné chyby při měření jsou minimální
- větší chyba může být způsobena přepočtem smykového napětí z 22,5°C na 40°C. Celková chyba nebude větší než 10%

V magnetoreologické kapalině jsou obsaženy částice železa, které mají určité spektrum velikostí. A jak je správně uvedeno, aby se zabránilo jejich sedimentaci, musí být v kapalině speciální přísada. Setkal jste se s použitím těchto částic v nanometrických rozměrech?

- **v použití v MR zařízení jako jsou tlumiče, spojky nebo brzdy nesetkal**
  - vysoká výrobní cena nanočástic
  - částice nejsou z čistého železa – nižší permeabilita
  - nanočástice obsahují pouze jednu permanentní magnetickou doménu. Díky tomu a malé velikosti náhodně rotují – Brownův pohyb (zamezení sedimentace). Kvůli jedné doméně si ale udržují tekutost i při vystavení silnému magnetickému poli (Park, Fang, Choi – 2010)
- **použití ferrokapalin (obsahují nanočástice): dynamické těsnění, odvod tepla (např. transformátory), biomedicína – nosiče léků, kontrastní látka při magnetické rezonanci**

V práci je uvedeno, že základový olej zkoušené magnetoreologické kapaliny je PAO (polyalfaolefin). Nesetkal se autor s použitím ropných základových olejů nebo některého jiného syntetického oleje (např. polyglykolového) jako alternativy k uvedenému základovému oleji?

- **setkal při přípravách nových vzorků MR kapalin. Byly používány různé oleje, velice často i silikonové. Dokonce byly připravované MR kapaliny s vodou jako nosnou kapalinou. V komerčně dostupných MR kapalinách nebo v kapalinách v tlumičích od firmy Lord se ale používá PAO.**

Jaký vliv má případná změna tloušťky škrticí štěrbin v aktivní zóně ( $h_1$ ) na chování magnetoreologického tlumiče?

- zvýšení tlumící síly v aktivovaném i neaktivovaném stavu
- klesne magnetický odpor štěrbin a zvýší se magnetická indukce, tzn. že v aktivovaném stavu bude nárůst tlumící síly výraznější