

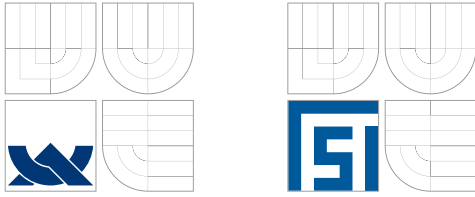
Fakulta strojního inženýrství
Ústav konstruování / Odbor konstruování strojů

Faculty of Mechanical Engineering
Institute of Machine and Industrial Design / Department of machine design

Mezní a degradační procesy magnetoreologických tlumičů odpružení

[Disertační práce]
[Dissertation thesis]

Autor práce: **Ing. Jakub Roupec**
Author



Fakulta strojního inženýrství
Ústav konstruování / Odbor konstruování strojů

Faculty of Mechanical Engineering
Institute of Machine and Industrial Design / Department of Machine Design

Mezní a degradační procesy magnetoreologických tlumičů odpružení

[Disertační práce]
[Dissertation thesis]

Autor práce: **Ing. Jakub Roupec**
Author

Vedoucí práce: **Doc. Ing. Ivan Mazůrek, CSc.**
Supervisor

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá výzkumem degradace magnetoreologické (MR) kapaliny v průběhu dlouhodobého zatěžování v podmínkách, které odpovídají reálnému zatížení v lineárních MR zařízeních, např. v tlumičích. Chování MR kapaliny je popsáno Binghamským modelem viskoplastické kapaliny. Parametry tohoto modelu jsou mez kluzu a viskozita. Jejich hodnoty jsou určovány při smykovém spádu 1 až $2,8 \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}$. Výsledky trvanlivostních zkoušek ukazují na výrazný pokles viskozity MR kapaliny, postupný růst meze kluzu v neaktivovaném stavu a výrazný pokles MR efektu. V práci je dále popsán vliv teploty na tyto parametry a je zde navržena metoda bezdemontážní diagnostiky stavu MR kapaliny v tlumiči pomocí parametru „Míra pulzací“.

KLÍČOVÁ SLOVA

Magnetoreologická kapalina, trvanlivostní zkouška, vysoký smykový spád, Binghamský model, magnetoreologický tlumič

ABSTRACT

This work deals with the research of degradation of magnetorheological (MR) fluid during long-term loading under conditions that correspond to the real load in the linear MR devices such as dampers. The behaviour of MR fluid is described by a Bingham model of viscoplastic fluid. The parameters of this model are the yield stress and viscosity. Their values are determined by the shear rate from 1 to $2,8 \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}$. Results of durability tests show a significant decrease in viscosity of MR fluid, a gradual increase in yield stress in the off-state and a significant decrease in MR effect. The paper also described the effect of temperature on these parameters and there is also designed a method of non-assembly diagnostic of the MR fluid state in the damper using the "rate of pulsation."

KEYWORDS

Magnetorheological fluid, durability test, high shear rate, Bingham model, magnetorheological damper

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ROUPEC, J. *Mezní a degradační procesy magnetoreologických tlumičů odpružení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 140 s. Vedoucí disertační práce Doc. Ing. Ivan Mazůrek, CSc

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že jsem předloženou disertační práci vypracoval samostatně na základě uvedené literatury a za podpory školitele Doc. Ing. Ivana Mazúrka, CSc.

V Brně dne 16. 9. 2011

.....

Jakub Roupec

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval svému školiteli doc. Ivanu Mazůrkovi za mnoho cenných rad a připomínek v průběhu řešení této disertační práce a po celou dobu doktorského studia. Také bych rád poděkoval svým rodičům za podporu při studiu.

OBSAH

1. ÚVOD	13
1.1 MOTIVACE.....	13
1.2 CÍLE.....	14
1.3 PŘÍSTUP.....	14
1.4 PŘÍNOS PRÁCE.....	15
2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	16
2.1 MAGNETOREOLOGICKÁ KAPALINA.....	16
2.2 REOLOGICKÉ MODEL Y MR KAPALINY.....	18
2.3 MR ZAŘÍZENÍ.....	22
2.3.1 Aplikace v automobilovém průmyslu.....	23
2.3.2 Aplikace ve stavebnictví.....	25
2.3.3 Další aplikace MR kapaliny.....	27
2.4 METODIKA NÁVRHU MR ZAŘÍZENÍ.....	28
2.5 DEGRADACE MR KAPALINY.....	29
2.5.1 Sedimentace.....	29
2.5.2 Provozní houstnutí – „In-Use-Thickening“.....	31
2.5.3 Degradace MR efektu.....	34
3. FORMULACE ŘEŠENÉHO PROBLÉMU A JEHO ANALÝZA	37
4. VYMEZENÍ CÍLŮ PRÁCE	38
5. METODICKÝ PŘÍSTUP K ŘEŠENÍ	39
5.1 NÁVRH SLIT-FLOW REOMETRU.....	40
5.1.1 Pistová skupina.....	43
5.1.2 Řešení ucpávek.....	44
5.1.3 Tlakování systému a odzdušnění.....	44
5.1.4 Měření teploty.....	45
5.1.5 Magnetické pole pistu.....	47
5.1.6 Zdroj napájení pistu.....	49
5.2 DATA-ACQUISITION SYSTÉM.....	50
5.2.1 Měřicí řetězec.....	50
5.2.2 SW pro záznam dat.....	51
5.3 ANALYTICKÝ SW PRO VYHODNOCENÍ TOKOVÝCH KŘIVEK.....	55
5.3.1 Matematický postup převodu F - v diagramu na τ - $\dot{\gamma}$	55
5.3.2 Korekce matematických vztahů s ohledem na reálné podmínky.....	57
5.3.3 Metoda konverze F - v diagramu na tokovou křivku.....	58
5.3.4 Kalibrace reometru.....	60
5.3.5 Vnitřní tření reometru.....	60
5.3.6 Maska programu MultiVisco MRQ.....	61
5.4 METODIKA MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ.....	64
5.4.1 Rozběhová zkouška.....	65
5.4.2 Měření během zatěžování.....	66
5.4.3 Metodika vyhodnocení tokových křivek.....	68

5.5 MĚŘENÍ MR KAPALINY V NÍZKÝCH SMYKOVÝCH SPÁDECH	73
6. ANALÝZA A INTERPRETACE ZÍSKANÝCH ÚDAJŮ.....	74
6.1 PARAMETRY NOVÉ MR KAPALINY	74
6.1.1 Parametry udávané výrobcem.....	74
6.1.2 Ověření složení MR kapaliny.....	75
6.1.3 Sedimentace MR kapaliny	76
6.1.4 MR kapalina v nízkých smykových spádech	77
6.1.5 Měření MR kapaliny ve vysokých smykových spádech.....	82
6.2 MR KAPALINA BĚHEM TRVANLIVOSTNÍHO TESTU V NEAKTIVOVANÉM STAVU	86
6.2.1 Vliv dlouhodobého zatěžování na viskozitu	87
6.2.2 Vliv dlouhodobého zatěžování na mez kluzu	93
6.3 MR KAPALINA BĚHEM TRVANLIVOSTNÍHO TESTU V AKTIVOVANÉM STAVU.....	99
6.3.1 Vliv dlouhodobého zatěžování na MR efekt.....	99
6.3.2 Vliv dlouhodobého zatěžování na sílu při 2A	100
6.4 DIAGNOSTICKÁ METODA PRO URČENÍ PROVOZNÍHO STAVU MR KAPALINY	101
7. ZÁVĚR	106
7.1 SPLNĚNÍ CÍLŮ PRÁCE	106
7.2 PRAKTICKÝ VÝZNAM DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ	108
7.3 DALŠÍ DOPORUČENÍ PRO ROZŠÍŘENÍ VÝZKUMU	108
LITERATURA.....	109
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	115
SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	117
SEZNAM TABULEK.....	120
PUBLIKACE AUTORA K DANÉ PROBLEMATICE	121
SEZNAM PŘÍLOH.....	123

1. ÚVOD

1

Účelem kapitoly je vysvětlit motivaci této práce a představit její cíle. Tato kapitola by měla uvést čtenáře do problematiky a vysvětlit, co autor bude na dalších stránkách řešit. Tato kapitola také obsahuje předběžné cíle, tak jak byly stanoveny na začátku výzkumu. Na závěr kapitoly je uveden očekávaný přínos práce.

1.1 Motivace

1.1

Magnetoreologické (MR) kapaliny nabízejí řešení mnoha technických problémů. Úspěšné zavedení MR kapalin do praxe je viditelné zejména v automobilovém průmyslu, ve stavebnictví nebo v biomedicinském inženýrství. Bylo publikováno mnoho studií, které ukazují na výhody použití MR zařízení v těchto i jiných oblastech.

MR kapaliny zaznamenaly velký úspěch díky schopnosti měnit ve velké míře svoje vlastnosti. Dnešní MR kapaliny jsou schopny dosáhnout meze kluzu až 80 kPa [1] a to v řádech milisekund. Navíc je tato schopnost stejně rychle reverzibilní. Tyto vlastnosti dávají MR kapalině velký potenciál v oblasti regulace díky širokému dynamickému rozsahu. Dnešní MR kapaliny navíc vykazují oproti dřívějším MR kapalinám zlepšenou stabilitu chování. To se projevilo zejména delší trvanlivostí a životností MR kapalin, což umožnilo širší komerční využití. Bylo publikováno mnoho literárních pramenů, které se věnují základnímu chování MR kapaliny. V posledních letech se objevilo také mnoho prací, které se již zabývají výkonem specifických MR zařízení. V mnoha případech však znalost výkonu a popis vlastností takových MR zařízení předchází důkladnému pochopení a porozumění samotnému chování těchto tekutin.

Často se stává, že MR zařízení zaměřené na jednu aplikaci lze využít i v naprosto odlišných odvětvích. Příkladem může být tlumič Motion Master od firmy Lord Corporation (obr. 1.1) [2].



Obr. 1.1 Tlumič Motion Master od firmy Lord Corporation [2]

Primárně byl tento tlumič navržen pro tlumení sedadel v autobusech a nákladních vozech, ale uplatnění našel i v konstrukci protetických náhrad nebo ve stavebnictví. Ve všech případech jsou provozní podmínky značně odlišné. Dalším příkladem extrémní variability použití by mohla být aplikace automobilových tlumičů na tlumení rázového zatížení. Všechny uvedené aplikace používají lineární MR zařízení. MR kapalinu lze však také používat v rotačních zařízeních jako jsou brzdy nebo spojky.

Přestože jednotlivé aplikace MR kapaliny jsou velice odlišné, musí regulační algoritmy MR zařízení pracovat s modelem reálného chování MR kapaliny a to v celém rozsahu provozních parametrů. Přesný model regulace dokáže daleko přesněji a rychleji řídit výstupy z MR zařízení. S ohledem na kvalitu regulace je však pro tyto algoritmy neméně důležité znát změny chování MR kapaliny v průběhu jejího života. Je velice pravděpodobné, že stejně jako se mění struktura oceli při dlouhodobém zatěžování, stejně jako se mění chování a vlastnosti motorových olejů, bude se měnit i chování MR kapaliny. Této oblasti výzkumu MR kapalin nebylo věnováno tolik pozornosti, jak by se dalo očekávat s ohledem na snahu širokého uplatnění těchto kapalin v komerční sféře.

1.2 Cíle

Záměrem toho výzkumu je zjistit, jak se bude měnit chování MR kapaliny v průběhu dlouhodobého zatěžování, které má simulovat provozní zatížení MR kapaliny v lineárním zařízení. Tyto výsledky by měly být začleněny do metodiky navrhování MR zařízení jako doporučení:

Hlavní cíle tohoto výzkumu lze shrnout v těchto bodech:

- Sledovat změny chování MR kapaliny během dlouhodobého provozu.
- Kvantifikovat příčiny změn chování MR kapaliny.
- Upravit stávající reologické modely MR kapaliny s ohledem na dlouhodobý provoz.

1.3 Přístup

Hlavní myšlenkou celého experimentu bylo mechanické zatěžování MR kapaliny až do hodnot, které deklaruje výrobce. Toto zatěžování následně opakovat při změně některého provozního parametru. Zatížení MR kapaliny mělo být takové, aby odpovídalo skutečným podmínkám ve výkonných MR zařízeních a nikoliv pouze podmínkám při laboratorním testování. Tzn. podrobení MR kapaliny dostatečně vysokým smykovým spádům, vysokému smykovému napětí a vyšším teplotám než

je 20°C. Důležité bylo rozdělit zatěžování na jednotlivé zatěžovací cykly, mezi kterými docházelo k měření vlastností MR kapaliny. Tento přístup vyžadoval specifické experimentální zařízení, k jehož konstrukci muselo být v průběhu práci přistoupeno. Realizace tohoto zařízení neznamenal pouze konstrukci zařízení, ale také ověření funkčnosti.

1.4 Přínos práce

1.4

Očekávaný přínos práce je především ve výzkumu chování MR kapaliny v průběhu dlouhodobého zatěžování. Pro konstruktéra je důležité stanovit životnost MR zařízení, popř. délku servisního intervalu. Životnost lze prodloužit vhodnou změnou modelu regulace, která reflektuje změnu chování MR kapaliny. K tomu je ale potřeba mít přesný model chování MR kapaliny. Navíc tento model může pomoci stanovit již na začátku návrhu MR zařízení meze regulace, které s novou MR kapalinou jsou snadno dosažitelné, ale po krátké době zatěžování by byly již nedosažitelné. Dodatečným předimenzováním lze tak významně prodloužit život MR zařízení.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Magnetoreologická (MR) kapalina patří do skupiny tekutin, které vykazují proměnné počáteční napětí. Objevil ji v roce 1948 Jacob Rabinow z amerického Národního úřady pro standardy [3]. MR kapalina dokáže změnit svůj stav z tekutého skupenství na polotuhé až tuhé a to okamžitě po aplikaci magnetického pole. Tento stav MR kapaliny lze označit jako aktivovaný stav. V tomto stavu MR kapalina vykazuje viskoplastické chování, které je charakteristické počátečním napětím (mez kluzu) a které je závislé na velikosti aplikovaného magnetického pole. Právě tato závislost meze kluzu a její rychlá odezva dělá z MR kapalin atraktivní technologii pro použití v mnoha aplikacích.

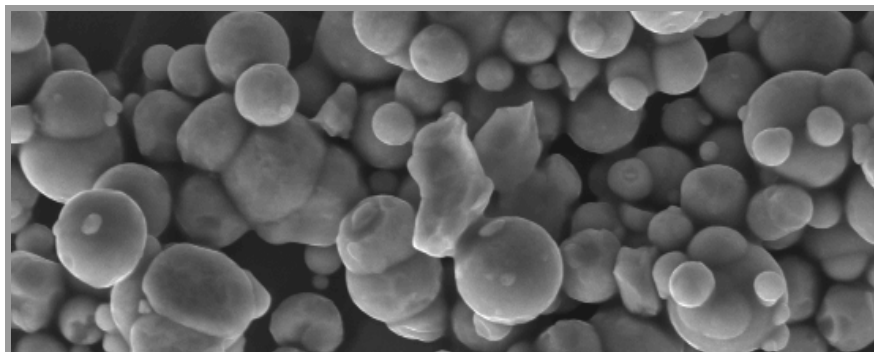
Úspěch MR kapalin je viditelný v mnoha odvětvích techniky a stále se objevují nové aplikace. Přestože nejčastější použití MR kapalin je z oblasti automobilového průmyslu a stavebnictví, nedávné studie ukazují na možné použití v aplikacích, které regulují otřesy a rázy. V poslední době se stále častěji objevují nové konstrukce rotačních zařízení jako jsou brzdy a spojky. Přenášený výkon dosahuje u rotačních zařízení a automobilových tlumičů hodnot v rozmezí od 60 do 600W [4]. Tento vysoký výkon a dlouhodobý provoz zařízení může způsobit degradaci náplně – změnu chování MR kapaliny. Právě nedostatečný popis změn chování v podmínkách dlouhodobého provozu inicioval tento výzkum.

Tato kapitola poskytuje základní vysvětlení chování MR kapaliny. Následuje výčet v technické praxi používaných MR zařízení a některé nové aplikace, popř. konstrukce. Kapitola popisuje ve zkratce metodiku návrhu MR zařízení a vymezuje chybějící části. Na závěr kapitole jsou shrnuty dosavadní poznatky v oblasti zkoumání a testování trvanlivosti MR kapalin.

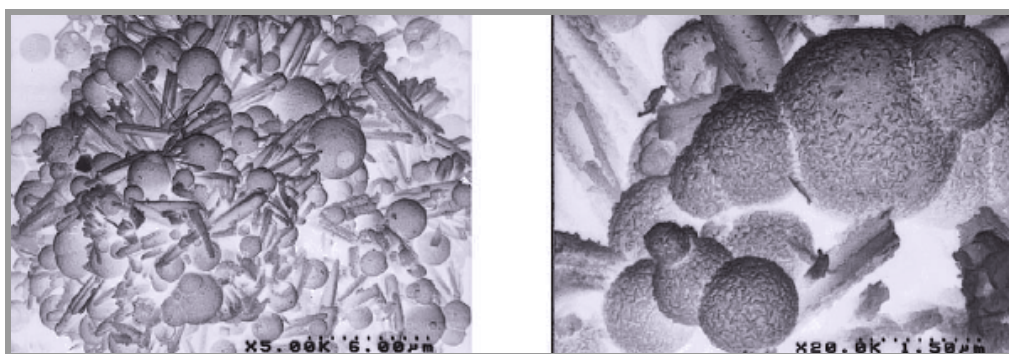
2.1 Magnetoreologická kapalina

Magnetoreologická (MR) kapalina se skládá ze tří základních složek: feromagnetických částic, nosné kapaliny a aditivních přísad. Feromagnetické částice jsou nejčastěji z vysoce čistého železa a jsou vyrobeny tepelným rozkladem pentakarbonylu železa [5]. Velikost používaných částic je v rozmezí 0,5 až 2 μ m (obr. 2.1). Tvar částic je pravidelný kulovitý, což je dáno nukleací krystalizační zárodků v roztoku pentakarbonylu. V poslední době se stále častěji uvažuje o kompozitních částicích, např. částice s niklovým povlakem (obr. 2.2) [6], polymerem kryté částice [7], částice s polystyrenovým jádrem a magnetitovým obalem [8], atd. Feromagnetické částice obvykle tvoří 50 až 85 % hmotnosti kapaliny. Jako nosnou kapalinu lze použít jakékoliv tekuté médium (olej, voda, atd.), ale nejčastěji se používá syntetický základový olej polyalfaolefin. Zejména pro svůj vysoký viskozitní index a dobré antioxidační vlastnosti. Hlavní aditivní přísadou jsou disperzanty (tenzidy), které zabraňují sedi-

mentaci těžkých feromagnetických částic. Železné částice v MR kapalině jsou totiž příliš velké, než aby se zde projevil Brownův pohyb částic v suspenzi. Dalším aditivem jsou antioxidanty.

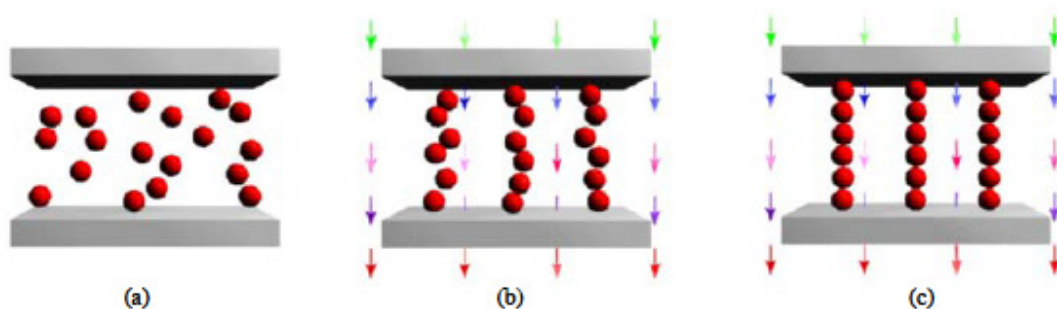


Obr. 2.1 Snímek železných částic pod elektronovým mikroskopem



Obr. 2.2 Částice karbonylu železa s niklovým povlakem [6]

V neaktivovaném stavu (tj. bez aplikace magnetického pole) je MR kapalina volně tekoucí suspenze s konzistencí podobnou motorovému oleji. Pokud se ale MR kapalina dostane do magnetického pole, začnou se mikročástice železa řadit rovnoběžně s magnetickým tokem. Částice se začnou řetězit viz. obr. 2.3. Z počátku jsou železné částice v amorfním stavu, homogenně roztroušeny v celém objemu MR kapaliny, jak zobrazuje obr. 2.3a. Po aplikaci magnetického pole se začnou částice srovnávat rovnoběžně se směrem magnetických siločar (obr. 2.3b). Obr. 2.3c ukazuje železné částice plně seřazené podél magnetického toku, které tak vytvářejí řetězce částic. Tyto řetězce poté brání a omezují pohyb kapaliny. Důsledkem toho vzniká v kapalině počáteční napětí (mez kluzu). Míra řetězení je závislá na síle magnetického pole a může k ní dojít během několika milisekund, stejně jako ke zrušení tohoto stavu vlivem odstranění magnetického pole [10,11].



Obr. 2.3 Aktivace MR kapaliny: (a) bez mag. pole; (b) s mag. polem; (c) plně zřetězené částice [9]

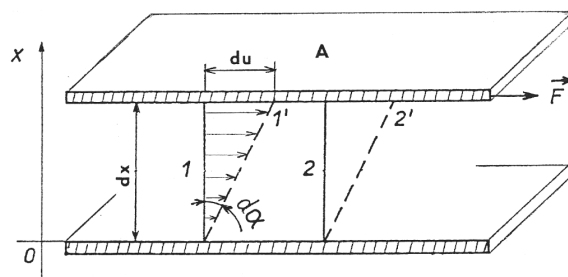
2.2 Reologické modely MR kapaliny

Model MR kapaliny hraje důležitou roli v návrhu nových MR zařízení. A to zejména při určení výkonu a dimenzování nového zařízení a pro návrh regulačního algoritmu. V následující kapitole budou představeny dva modely, které popisují chování MR kapaliny jako závislost smykového napětí na smykovém spádu. Nejdříve je ovšem nutné definovat základní reologické¹ pojmy jako je smykové napětí, smykový spád, viskozita, zdánlivá viskozita, mez kluzu, newtonská nebo nenewtonská kapaliny. Matematickým vyjádřením tokových vlastností kapalin jsou stavové reologické rovnice, které vyjadřují vztah mezi smykovým (tečným, vazkým) napětím τ a deformací kapaliny. Grafickou podobou těchto rovnic jsou tokové křivky.

Newtonská kapalina je ideálně viskózní kapalina, pro jejíž smykové napětí platí klasický Newtonův zákon (rov. 1):

$$\tau = \eta \frac{du}{dx} = \eta \cdot D \quad (1)$$

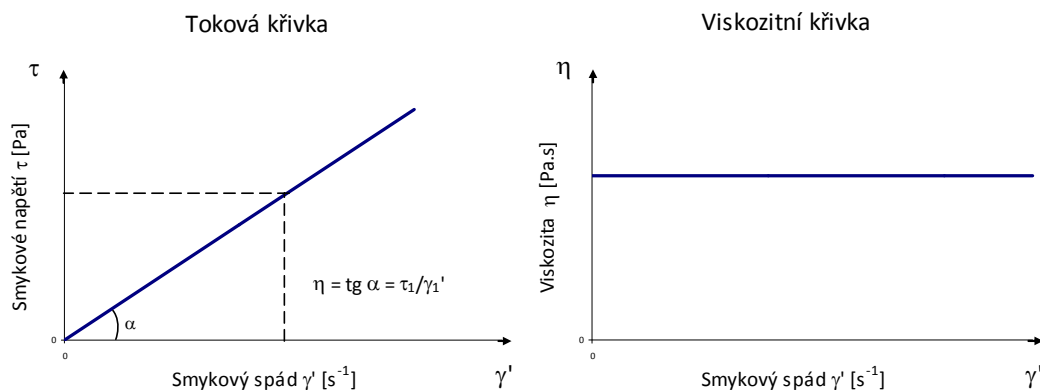
, kde součinitel η je dynamická viskozita charakterizující vnitřní tření newtonské kapaliny, du je vzájemná rychlost pohybu smykových rovin vzdálených o dx a D je tzv. gradient rychlosti (smykový spád, rychlost deformace, rychlost smyku), který charakterizuje tvarové změny v proudící tekutině (obr. 2.4).



Obr. 2.4 Rychlostní profil toku kapaliny mezi pohyblivou a nepohyblivou deskou [12]

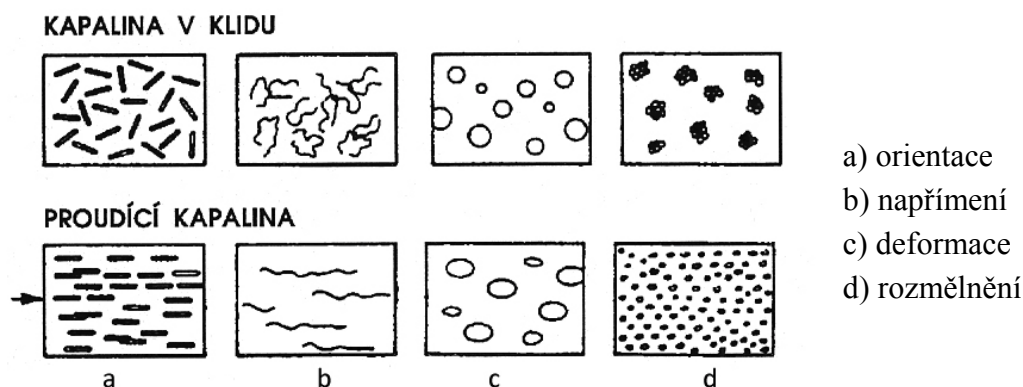
¹ Reologie je vědní obor, který se zabývá studiem vnitřní reakce látek na působení vnějších sil

Dynamická viskozita je látkovou charakteristikou, jejíž hodnota závisí na teplotě a tlaku. U plynů s teplotou roste, u kapalin naopak klesá. Tekutiny řídící se Newtonovým zákonem se označují jako newtonské a jsou to zpravidla nízkomolekulární látky. Viskozita těchto tekutin nezávisí na smykovém napětí a jejich toková a viskozitní křivka je znázorněna na obr. 2.5.



Obr. 2.5 Toková a viskozitní křivka

Vedle newtonských kapalin existují i kapaliny reologicky složitější, které se Newtonovým zákonem neřídí. Označují se proto jako neneutronské kapaliny a jsou to např. roztoky a taveniny polymerů, suspenze, různé pasty a také testovaná MR kapalina. Platí pro ně také rovnice (1), s tím rozdílem, že zde η je tzv. zdánlivá viskozita, která ale není látkovou charakteristikou, ale je závislá na smykovém spádu nebo smykovém napětí. Obr. 2.6 ukazuje některé příčiny změny viskozity:



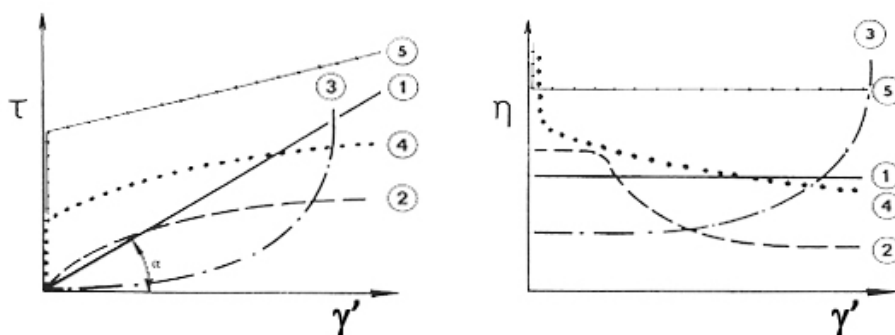
Obr. 2.6 Možné příčiny změny viskozity neneutronských kapalin [12]

Neneutronské kapaliny lze rozdělit na několik základní typů:

a) Pseudoplastické kapaliny – jsou to kapaliny, u kterých zdánlivá viskozita klesá s rostoucím smykovým spádem. V angličtině se tento jev označuje jako „shear thinning“. U pseudoplastických kapalin se někdy rozlišují dvě podskupiny: pseudoplastické kapaliny s mezí kluzu a strukturně viskózní kapaliny (křivky 2 a 4 na obr. 2.7).

b) Dilatantní kapaliny – zdánlivá viskozita těchto kapalin roste s rostoucím smykovým spádem. Toto chování je vzácné a je snaha ho změnou složení odstranit. Zejména při míchání kapalin (křivka 3 na obr. 2.7).

c) Binghamské kapaliny – jsou to kapaliny s plastickou složkou deformace. U těchto kapalin dochází k toku až po překročení určitého počátečního napětí (mez kluzu, mez toku) (křivka 5 na obr. 2.7).



Obr. 2.7 Tokové a viskozitní charakteristiky některých neneutronských kapalin [12]
 1- newtonská kapalina 2- strukturně viskózní kapalina 3- dilatantní kapalina
 4- pseudoplastická s mezí kluzu 5- binghamská kapalina

Je třeba zdůraznit, že pro neneutronské kapaliny nemá pojem viskozity jako látkové konstanty fyzikální význam a je nutno jej nahradit tokovou křivkou v potřebném rozsahu tečných napětí. Vzhledem k možnosti různých anomálií nelze přitom spoléhat na hodnoty získané extrapolací. Údaj zdánlivé viskozity změřený na jednoduchém viskozimetru bez udání smykového napětí nebo rychlostního gradientu může sloužit pouze pro orientační srovnání konzistence neneutronských kapalin stejného druhu měřené na stejných přístrojích za stejných podmínek.

U MR kapaliny je nutné rozlišovat dva stavy, při kterých je chování MR kapaliny odlišné. Je to stav aktivovaný a stav neaktivovaný. Aktivovaný stav nastává v okamžiku vystavení MR kapaliny magnetickému poli o intenzitě H . Neaktivovaný stav odpovídá magnetickému poli o nulové intenzitě. V tomto stavu lze MR kapalinu označit jako strukturně viskózní s mírně vyvinutou mezí kluzu. Tato mez kluzu je způsobena samotným charakterem a složením kapaliny. Viskozita se po počátečním růstu ustálí na konstantní hodnotě. V aktivovaném stavu lze reálné chování MR kapaliny označit za pseudoplastické s mezí kluzu. Zde je mez kluzu součtem meze kluzu v neaktivovaném stavu a meze kluzu od aplikovaného magnetického pole. Právě nárůst meze kluzu vlivem aplikovaného magnetického pole bývá označován jako MR efekt. Někdy bývá chování MR kapaliny označováno jako viskoplastické, což je adekvátní pojem k pseudoplastickému chování. Nejčastěji používaná stavová reologická rovnice MR kapaliny je označována jako Binghamův model:

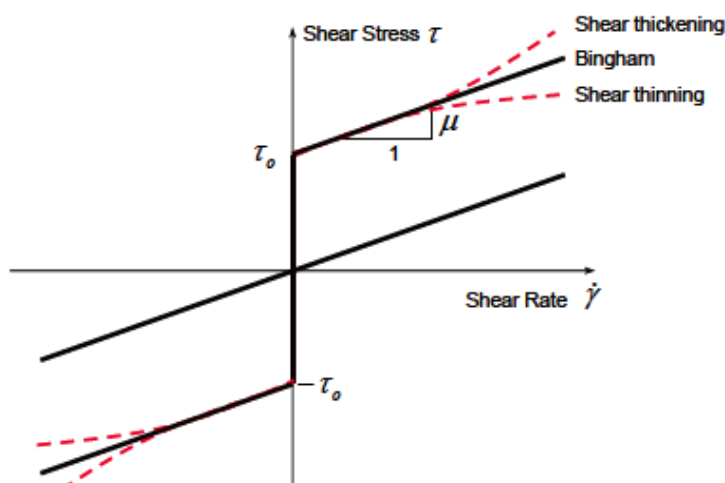
$$\tau = \pm\tau_0 + \eta \cdot \dot{\gamma} \quad |\tau| > |\tau_0| \quad (2)$$

kde τ je smykové napětí, τ_0 (někdy také τ_y) je mez kluzu, η je viskozita a $\dot{\gamma}$ je smykový spád. U Binghamského modelu se zpravidla mluví o viskozitě a nikoliv o zdánlivé viskozitě, protože viskozita je zde konstanta. Binghamský model je zobrazený na obr. 2.8.

Alternativou k Binghamskému modelu je model Herschel-Bulkley, který zohledňuje smykové řídnutí. Herschel-Bulkley model lze vyjádřit rovnicí (3):

$$\tau = \pm\tau_0 + K \cdot |\dot{\gamma}|^{\frac{1}{m}} \quad (3)$$

kde K a m jsou parametry MR kapaliny. Pro $m > 1$ rovnice (3) reprezentuje smykové řídnutí, pro $m < 1$ reprezentuje smykové houstnutí a pro $m = 1$ se rovnice redukuje na Binghamský model viz. obr. 2.8.



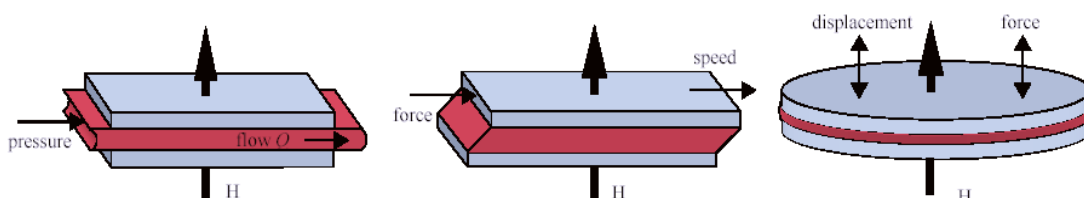
Obr. 2.8 Nejčastěji používané modely popisující chování MR kapaliny [1]

Smykové řídnutí je u MR kapaliny v aktivovaném i neaktivovaném stavu způsobeno dvěma jevy. Za prvé je to projev strukturně viskózního chování v neaktivovaném stavu, které se ale projeví na tokové křivce i ve stavu aktivovaném. Tento jev je způsoben změnou viskozity a je výrazný zejména při nízkých smykových spádech. Ve vysokých smykových spádech lze viskozitu považovat téměř za konstantní. Druhým jevem, který způsobuje řídnutí závislé na smykovém spádu, je pokles meze kluzu vlivem příliš rychlého průchodu MR kapaliny skrze aktivní oblast MR ventilu (oblast s aplikovaným magnetickým pole). Při příliš rychlém průchodu se železné částice obsažené v kapalině nestačí plně zřetězit jako na obr. 2.3 a vyvolaná mez kluzu má nižší hodnotu než na počátku [1]. Tento jev se narodil od prvního jevu

projevuje při vysokých smykových spádech (přesná hodnota smykového spádu závisí na tvaru a velikosti aktivní oblasti). Pokud je vhodně vybrán interval smykových rychlostí, lze chování MR kapaliny velice přesně popsat podstatně jednodušším Binghamským modelem oproti Herschel-Bulkley. Ve vhodně zvoleném intervalu se ještě neprojeví slábnutí meze kluzu a pokles zdánlivé viskozity se zvyšujícím se smykovým spádem je již zanedbatelný. V tomto případě je ale nutné tento interval ve výsledcích uvést.

2.3 MR zařízení

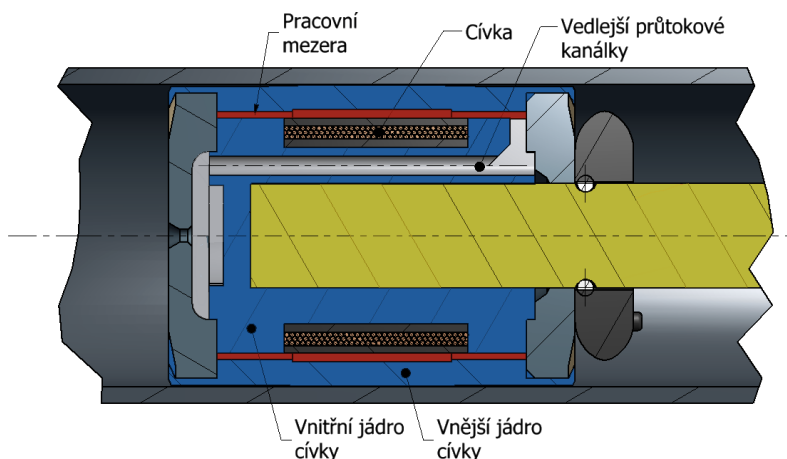
Regulovatelná mez kluzu MR kapaliny vedla k použití této kapaliny v mnoha zařízeních a pro různé aplikace. V těchto aplikacích je MR kapalina zatěžovaná jedním ze tří možných módů (ventilový mód, smykový mód a tahovo-tlakový mód). Tyto tři módy jsou na obr. 2.9.



Obr. 2.9 Zatěžovací módy MR kapaliny (a) ventilový; (b) smykový; (c) tahovo-tlakový [13]

Nejčastěji používaný je ventilový mód. S jeho použitím se lze setkat převážně u MR tlumičů. U tohoto módu MR kapalina protéká mezi dvěma rovnoběžnými, pevnými deskami. Tento tlakově řízený tok lze popsat Poiseuilleovou rovnicí. S druhým módem se lze setkat u rotačních zařízení jako jsou brzdy nebo spojky. V tomto módu MR kapalina teče mezi dvěma rovnoběžnými deskami, které se vůči sobě pohybují rychlostí v_0 . Tento mód lze popsat kombinací Poiseuilleova a Couetteova toku. Tahovo-tlakový mód je nejméně užívaný ze všech tří módů a používá se ke tlumení vibrací s malou amplitudou.

V zařízeních jako jsou tlumiče lze velice dobře využít výhody, které přináší regulovatelná mez kluzu MR kapaliny. Je to především rychlá odezva na magnetické pole a velký dynamický rozsah sil. Na obr. 2.10 je řez pístem MR tlumiče. Z obrázku je patrná jednoduchá konstrukce v porovnání s běžnými pasivními hydraulickými tlumiči. Na tělese pístu je navinutá cívka. Při průchodu elektrického proudu cívkou dojde k vytvoření magnetického pole, které ovlivňuje MR kapalinu proudící pracovní mezerou. Tento princip regulace se označuje jako semi-aktivní, protože je možné regulovat množství odebrané energie, ale žádnou energii nelze do systému přidávat.



Obr. 2.10 Řez pístem předního tlumiče z Audi TT (Roupec)

2.3.1 Aplikace v automobilovém průmyslu

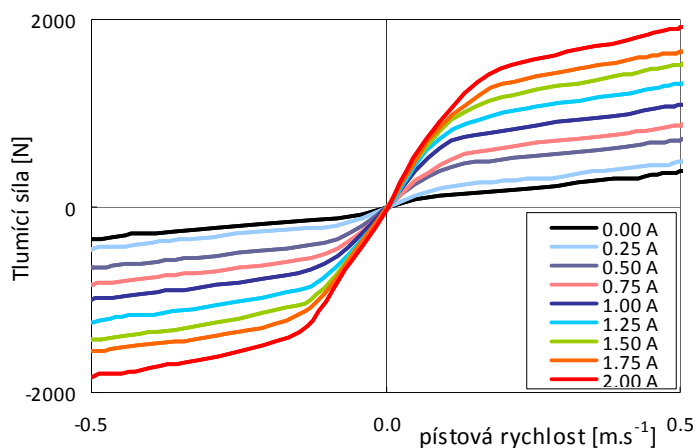
2.3.1

Automobilový průmysl využívá MR kapalinu v semi-aktivních tlumících prvcích. První semi-aktivní systém tlumení automobilového závěsu představil Crosby a Karnopp již v roce 1973 [14,15]. Následovaly další práce, ve kterých byly navrženy výkonnější regulační algoritmy [16-18]. Tyto pokroky ve vývoji MR tlumičů vedly k tomu, že se tato technologie mohla začít průmyslově využívat. Automobilka Cadillac byla první, kdo již v roce 2002 nabídl ve svých vozech MR tlumiče. Jednalo se o luxusní vozy Seville STS a Escalade EXT [19,20]. Další značky z koncernu GM poté začaly postupně nabízet podobné semi-aktivní závěsy. K 50. výročí výroby modelu Corvette nabídl Chevrolet systém *Magnetic Selective Ride Control*. Výhody tohoto *real-time* regulačního systému jsou především ve schopnosti reagovat na proměnný stav vozovky a charakter jízdy. Obr. 2.11 zachycuje výhody *Magnetic Selective Ride Control* tak, jak je prezentoval Chevrolet. Chevrolete následovaly další automobilky. Nejdříve Audi (modely TT a R8) a následně také Ferrari, BMW (2007), Porsche (2010 – modely GT2 a GT3) a Honda (2011 – plánované uvedení na trh). Pro koncern GM, Audi a Ferrari je tento semi-aktivní systém tlumení dodáván firmou Delphi [21].



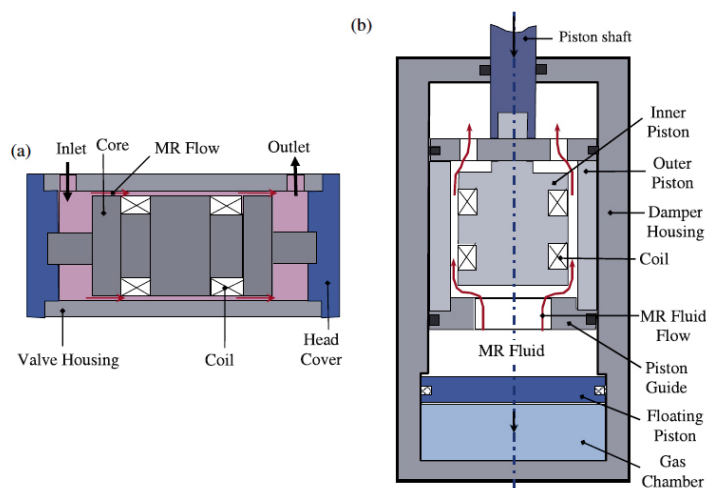
Obr. 1.11 Systému Magnetic Selective Ride Control na modelu Chevrolet Corvette C5 [22]

Graf na obr. 2.12 zobrazuje proudovou charakteristiku MR tlumiče od firmy Delphi, který je určen na přední nápravu sportovního vozu Audi TT. Z grafu je patrný nárůst tlumící síly při navýšení budicího proudu do cívky pístu MR tlumiče.

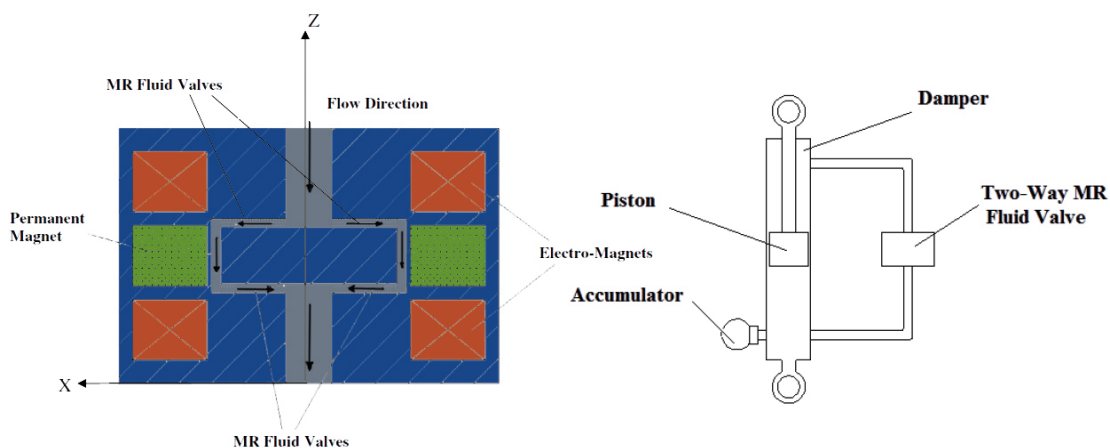


Obr. 2.12 Proudová charakteristika tlumiče Delphi pro Audi TT (vlastní měření)

Přestože se tlumiče závěsu kola používají již delší dobu, vývoj v oblasti nových konfigurací pístové skupiny pokračuje dále. Důkazem toho jsou např. práce Nguyena a kol. [23,24], kde optimalizují tvar MR ventilu (obr. 2.13), Wanga [25], který představuje nové možnosti regulace MR tlumiče, Aydara a kol. [26], kteří představují MR bypass pasivního tlumiče s permanentním magnetem (obr. 2.14) nebo třeba práce Seonga a kol. [27], kteří doplňují regulační algoritmus stávajícího systému Delphi o hysteretzní chování tlumiče.



Obr. 2.13 Schematická konstrukce optimalizovaného (a) MR ventilu; (b) MR tlumiče [23]

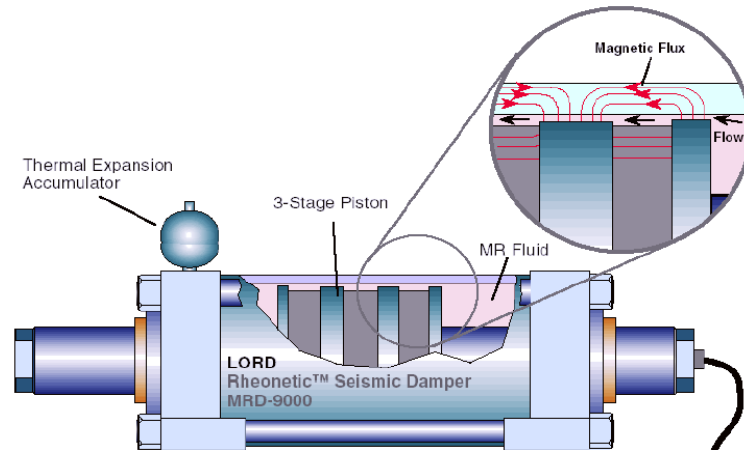


Obr. 2.14 MR ventil s axiálním uspořádáním (vlevo); sestava tlumící jednotky (vpravo) [26]

V automobilovém průmyslu se MR tlumiče používají také pro sekundární tlumení kabin nákladních vozů [29]. Nejběžněji používaný tlumič je *Rheonetic RD-1005-3* od firmy *Lord Corporation*. Tento tlumič se také osvědčil jako semi-aktivní tlumič odpružení sedadel nákladních vozů a autobusů [28]. Konkrétně je tento tlumič dodáván jako součást systému *Motion Master Ride Management System*, který obsahuje MR tlumič a řídicí jednotku (obr. 1.1). Tento systém lze použít i dodatečně místo stávajícího hydraulického tlumiče odpružení sedadla. Bylo publikováno několik prací [30-33], které porovnávají odpružení sedadla s konvenčním pasivním tlumičem a se semi-aktivním tlumičem. Závěry těchto prací jednoznačně poukazují na výhody semi-aktivního tlumiče. Ve snaze snížit výdaje za náhrady profesionálním řidičům kvůli poškození zdraví bylo ve Spojených státech vybaveno systémem *Motion Master* mnoho zemědělských strojů a autobusů. Díky tomu byla snížena únava řidičů a bolest zad a nohou [34].

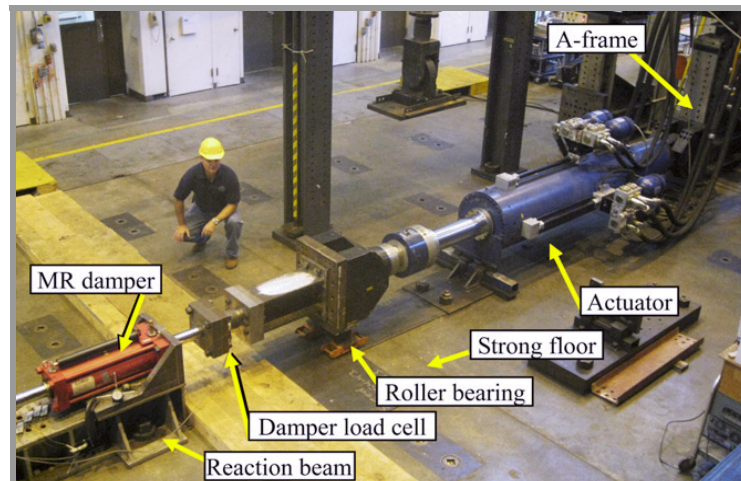
2.3.2 Aplikace ve stavebnictví

MR tlumiče byly ve stavebnictví s úspěchem zavedeny zejména u tlumení vibrací. Značná pozornost ve vědeckých kruzích byla věnována tlumení vibrací od seizmické aktivity [35,36]. V roce 1997 byl navržen a otestován první tlumič ve skutečném měřítku [37,38]. Měl oboustranné vyvedení pístnice, tzn. že zde není potřeba kompenzátor objemu. Tento tlumič byl navržen pro maximální sílu 200 000 N, je 1m dlouhý a váží 250 kg (obr. 2.15).



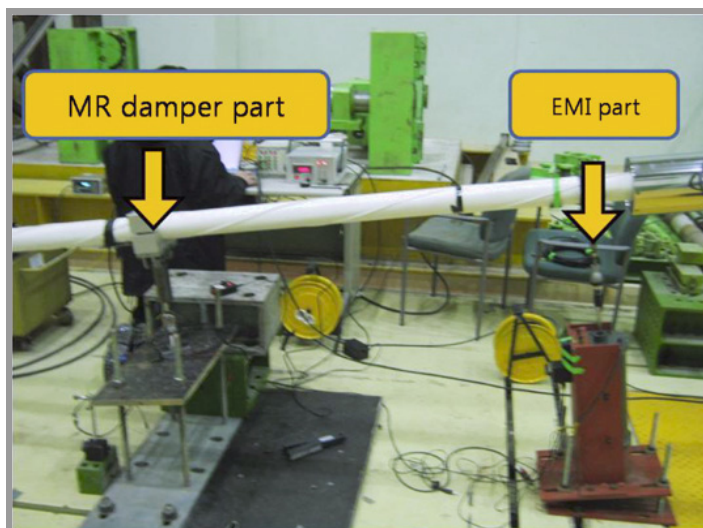
Obr. 2.15 Částečný řez schématickým zobrazením seizmického tlumiče od firmy Lord [37]

Vývoj v této oblasti pokračuje dále, byly navrženy a otestovány nové regulační algoritmy na reálném pístu [39] (obr. 2.16).



Obr. 2.16 Experimentální sestava pro real-time testy MR tlumiče [39]

Další odvětví ve stavebnictví, kde byly MR tlumiče úspěšně vyzkoušeny, jsou lanové mosty. Zde se MR tlumiče používají k útlumu výchylek lan, které vznikají působením větru a deště. První MR tlumič byl instalován na těchto mostech v červnu 2002 v jižní centrální Číně přes jezero Dongting [40-42]. Kim a kolektiv publikovali v roce 2010 článek [43], ve kterém představili výsledky experimentu, kdy tlumili vibrace mostového lana pomocí MR tlumiče. Inovací bylo, že tento tlumič byl napájen elektromagnetickým indukčním zařízením (EMI), které využívalo energii vibrací (obr. 2.17). Tímto experimentem byla ověřena funkce zdrojově nezávislého semi-aktivního systému tlumení.

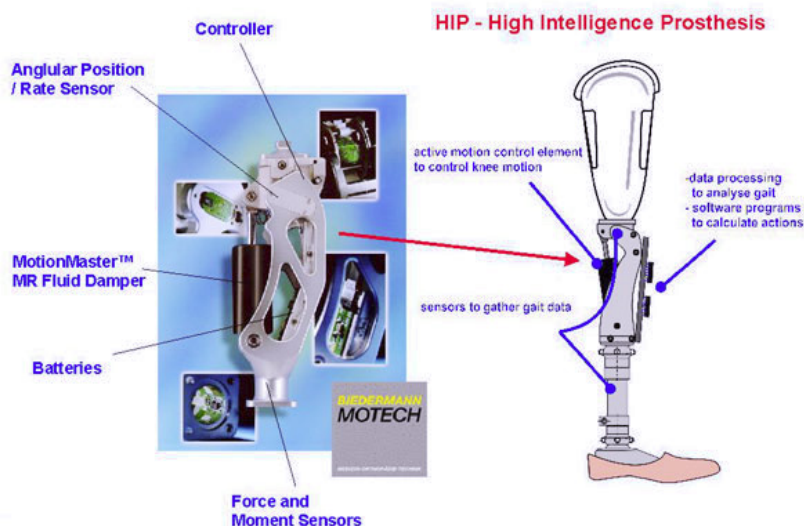


Obr. 2.17 „Smart damping system“ instalovaný na mostovém lanu [43]

2.3.3 Další aplikace MR kapaliny

2.3.3

Stávající tlumič Motion Master od firmy Lord určený k sekundárnímu tlumení v automobilech byl použit firmou Biedermann Motech GmbH [44] v protetické nožní náhradě (obr. 2.18). Tento tlumič výrazně zlepšil pohyblivost protézy napodobením přirozené chůze. Kombinace senzorů a regulátoru dokáže přizpůsobit pohyb protézy různým podmínkám jako např. chůzi ze schodů a do schodů nebo dokonce jízdě na kole [46].



Obr. 2.18 Nožní protéza od firmy Biedermann Motech [42]

Další komerční zařízení, které využívá MR kapalinu, je rotační brzda. *Lord Corporation* v současnosti vyrábí MR brzdu *RD-2087* (obr. 2.19), kterou lze použít jako akční člen pneumatických systémů, v systémech „steer-by-wire“ pro vyvolání zpětné

vazby, v rehabilitačních strojích a dalších podobných zařízeních [47]. MR brzda je snadno regulovatelná, má rychlou odezvu (10-30 ms) a na dané rozměry relativně vysoký kroutící moment (4-5,6 Nm při 1 A dle teploty).



Obr. 2.19 MR brzda RD-2087 od firmy Lord Corporation [45]

2.4 Metodika návrhu MR zařízení

Metodika návrhu MR uzlu, tak jak ji prezentovala firma Lord [48], počítá se zjednodušeným Binghamským modelem chování MR kapaliny. Použitý model neposkytuje přesný popis chování a to zejména pro aktivovaný stav, kdy se ve vysokých smykových spádech projevuje řidnutí MR kapaliny. V metodice je popsán návrh:

- geometrických rozměrů aktivní části MR zařízení (lineární i rotační zařízení)
- aktivního objemu MR kapaliny
- magnetického obvodu

V metodice není uvažována následující problematika:

- Závislost parametrů MR kapaliny (mez kluzu, viskozita) na provozní teplotě.
- Životnost MR kapaliny s ohledem na provozní parametry (teplota, smykový spád, smykové napětí).
- V návrhu magnetického okruhu není ucelená návaznost na konstrukční návrh geometrie MR ventilu.
- Návrh magnetického obvodu uvažuje princip kontinuity magnetického toku v magnetickém obvodu – rov.(4), což v reálu zdaleka neplatí

$$\Phi_{\text{fluid}} = \Phi_{\text{steel1}} = \Phi_{\text{steel2}} = \dots \quad (4)$$

- Nejsou nikde publikovány B-H křivky běžných konstrukčních ocelí pro přesný návrh magnetického obvodu.
- Při návrhu magnetického obvodu není počítáno s remanentním magnetismem, který může silně ovlivňovat charakteristiku MR ventilu zvláště v nižších hodnotách intenzity magnetického pole.

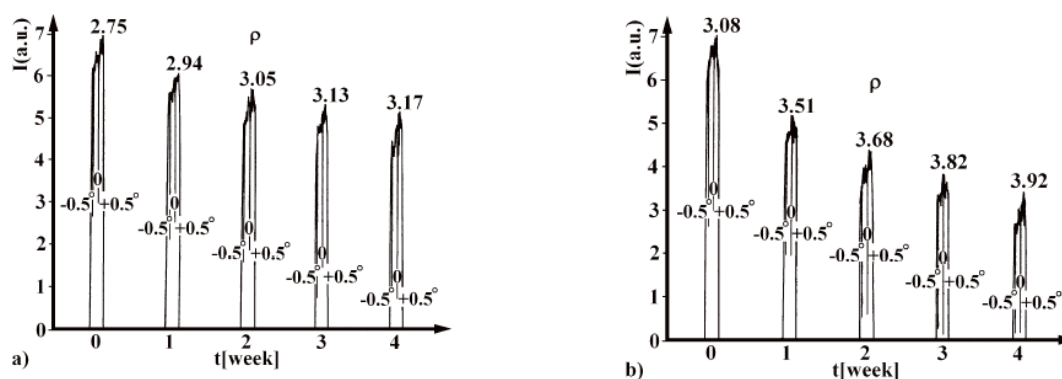
2.5 Degradace MR kapaliny

MR kapalina může degradovat několika způsoby a nemusí se vždy jednat o degradaci spojenou se zatěžováním MR kapaliny. Nejdůležitější jevy, které mohou způsobovat znehodnocení nebo zhoršenou funkci MR kapaliny a které byly popsány v literatuře, jsou:

- sedimentace
- provozní houstnutí – „In-Use-Thickening“
- pokles MR efektu v aktivovaném stavu

2.5.1 Sedimentace

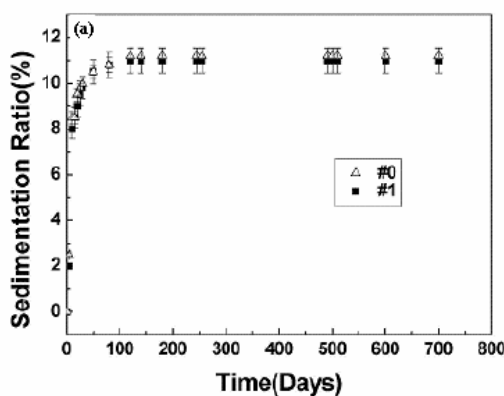
Problém sedimentace byl řešen v mnoha publikacích. Zejména při přípravě nových MR kapalin a to nejčastěji použitím nových kompozitních částic, různých kombinací aditiv nebo různých nosných kapalin. V těchto člancích byly nově připravené MR kapaliny vždy testovány na sedimentační stabilitu a byly zjišťovány jejich magnetické vlastnosti (hodnota magnetického nasycení M_s , magnetická remanence M_R , koerzivní pole H_{coe}). Tyto nové MR kapaliny byly nejčastěji srovnávány s komerčními kapalinami firmy Lord nebo s částicemi karbonylu železa v základovém oleji bez přidaných aditiv [49-52]. Na obr. 2.20 je intenzita rentgenového záření měřená u dna vertikálně postaveného vzorku MR kapaliny [52]. Čím je vyšší hustota sedimentu, tím méně záření vzorkem projde. Intenzitu záření představují jednotlivé píky. Nad nimi je zobrazena odpovídající hustota. Z grafu je zřejmé, že nová MR kapalina sedimentuje pomaleji než kapalina vpravo.



Obr. 2.20 Sedimentace po 1,2,3 a 4 týdnech a hustota sedimentu (a) nově připravená MRF; (b) MRF-132DG (LORD) [52]

Předchozí metoda měření sedimentace byla založena na analýze hustoty sedimentu u dna. Většina ostatních měření sedimentace je založena na daleko jednodušším principu a to na měření výšky sedimentu z celkového objemu MR kapaliny. Tím, jak se železné částice vlivem gravitace usazují, vzniká u hladiny vrstva čisté nosné kapa-

liny a výška sedimentu se s časem zmenšuje. Na obr. 2.21 je výsledek experimentu, kdy byla porovnávána sedimentace čerstvě namíchané kapaliny MRF-140WUT a sedimentace stejné kapaliny, která byla před experimentem 24 měsíců uskladněna a poté znovu rozmíchána do homogenního stavu [53]. V grafu je na ose y vynesena míra sedimentace, což je poměr mezi nosnou kapalinou nad sedimentem a celkovým objemem MR kapaliny. Z grafu je patrné, že 2leté uskladnění nemělo na sedimentační stabilitu žádný vliv a že oba vzorky sedimentovaly stejně. Druhý závěr lze vyvodit, že po 105 dnech se sedimentace ustálila na stejné hodnotě, tj. 11%. Po skončení experimentu byly oba vzorky MR kapaliny již po 10 min rozmíchány metodou „ball milling“ při 300 ot./min. Použitá MR kapalina je svým hmotnostním poměrem 82 hm.% železných částic, 15 hm.% základového oleje a 3 hm.% aditiv téměř shodná s komerčně dostupnou kapalinou MRF-140CG, která byla použita v této práci.

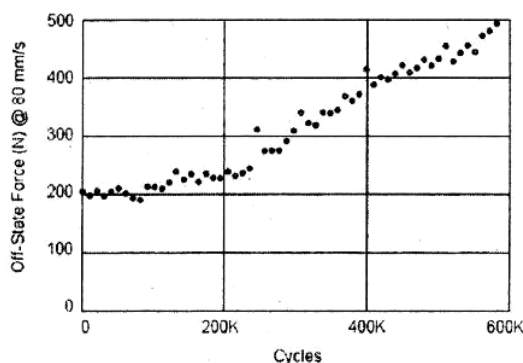


Obr. 2.21 Sedimentace MR kapaliny MRF-140WUT (a) #0 - nová, čerstvě namíchaná; (b) #1 – po 24 měsících znovu rozmíchána [53]

Z dosud publikovaných výsledků sedimentační stability lze vyslovit závěr, že sedimentační stabilita komerčně dostupných MR kapalin je na vysoké úrovni a pro běžné potřeby MR zařízení, která jsou pravidelně v provozu, je naprosto dostačující. Otázkou zůstává, zda je prezentovaná sedimentační stabilita dostatečná pro bezpečnostní systémy. Tyto systémy mohou pracovat třeba jen jednou za život a po velice krátkou dobu. MR kapaliny používané v tlumičích vibrací seizmické aktivity mají jako nosnou složku použit gel, který téměř zamezí sedimentaci [36]. Tyto tlumiče ovšem pracují s vysokou tlumící silou (až 200 kN) a nevádí tedy, že MR kapalina má v neaktivovaném stavu relativně vysokou mez kluzu vyvolanou nosným gelem. Zda je možné podobný přístup použít např. pro absorpci energie v protinázorovém systému sedadla vrtulníku je zatím otázkou [54].

2.5.2 Provozní houstnutí – „In-Use-Thickening“

Jako první prezentoval výsledky trvanlivostní zkoušky MR kapaliny Carlson [4,55]. Zjistil, že při dlouhodobém zatěžování MR tlumiče dochází s počtem zatěžovacích cyklů v neaktivovaném stavu k navyšování tlumící síly (obr. 2.22). Jev nazval provozní houstnutí – „In-Use-Thickening (IUT)“.

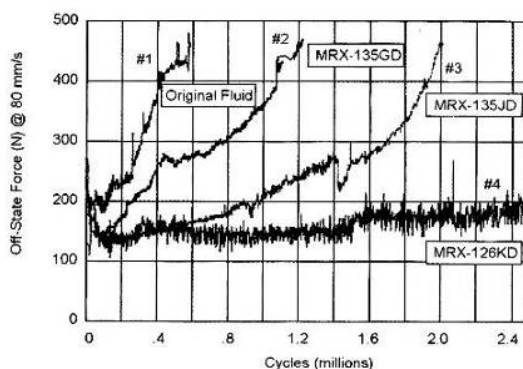


Obr. 2.22 Nárůst síly v neaktivovaném stavu při dlouhodobém zatěžování [4]

Aby mohlo být objektivně vyhodnoceno množství disipované energie na jednotku objemu MR kapaliny, zavedl Carlson pro hodnocení životnosti MR kapalin parametr LDE (*Life Dissipated Energy*):

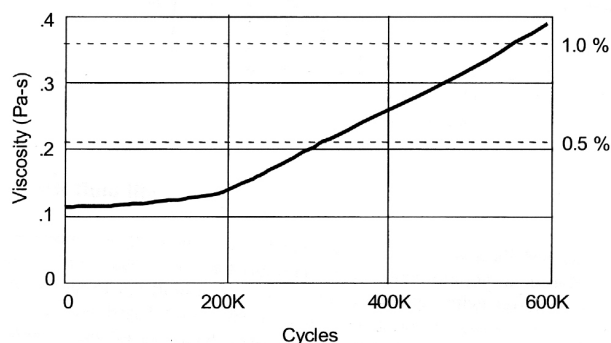
$$LDE = \frac{1}{V} \int_0^{Life} P \cdot dt \quad (5)$$

kde V je objem MR kapaliny a P je mechanický výkon, který je přeměněn na teplo v MR zařízení. LDE je tedy celková mechanická energie přeměněná na teplo ku jednotce objemu MR kapaliny za celou dobu provozu zařízení. Nejlepší MR kapaliny si mohou udržet LDE v řádu 10^7 J/cm³ než jsou nepoužitelné. Na druhou stranu, slabé kapaliny mohou být nepoužitelné při LDE nižším než 10^5 J/cm³ [55] (obr. 2.23).



Obr. 2.23 Historický vývoj MR kapalin firmy LORD – závislost síly v neaktivovaném stavu na počtu cyklů [55]

Carlson vysvětlil nárůst síly v neaktivovaném stavu přítomností nanočástic oxidů železa. Tyto nanočástice mají v MR kapalině vzniknout vlivem odlupování oxidické vrstvy železných částic během interakce částic při toku MR kapaliny. Oxidická vrstva je tvrdá, ale křehká. Na obr. 2.24 je čárkovanými čarami vynesena zdánlivá viskozita MR kapaliny s přidavkem 0,5% a 1% nanočástic oxidů v porovnání se zdánlivou viskozitou v průběhu dlouhodobého zatěžování.



Obr. 2.24 Viskozita v neaktivovaném stavu s přidávanými nanočásticemi [55]

Při tomto experimentu byla snímána pouze maximální tlumící síla při konstantních otáčkách pulzátoru. Nebylo tedy možné z jednoho bodu rekonstruovat tokovou křivku. V tomto případě je nutné hovořit o viskozitě jako o zdánlivé viskozitě a měl by být uveden smykový spád, pro který je hodnota zdánlivé viskozity naměřena (což chybí). Za předpokladu viskoplastického chování MR kapaliny s mezí kluzu (viz. kap. 2.2) by korektní popis chování MR kapaliny měl být pomocí Herschel-Bulkley nebo Binghamského modelu. Z hlediska chování a vlastností MR kapaliny je důležité, zda se bude zvyšovat mez kluzu nebo viskozita. Na to lze odpovědět pouze analýzou celé tokové křivky.

Carlson při svém experimentu částečně popsal jev „provozní houstnutí“ a navrhl vysvětlení. Toto vysvětlení ale nebylo ničím podloženo. Na práci Carlsona navázal Ulicny z vývojového oddělení *General Motors* [56]. Jeho cílem bylo potvrdit Carlsonovu hypotézu o vzniku provozního houstnutí. Ulicny zatěžoval MR kapalinu smykovým módem po dobu 540 hodin nepřetržitého provozu. K testování použil MR spojku určenou pro použití k větráku v klimatizaci automobilu. V MR kapalině použil Ulicny dvě velikosti železných částic o průměrech 1,6 a 7,8 μm ve stejném hmotnostním poměru. V tabulce 2.1 jsou výsledky chemické analýzy metodou *Inert Gas Fusion (IGF)**. Z tabulky jsou zřejmé tyto závěry:

- malé částice mají při stejné hmotnosti větší povrch, který oxiduje

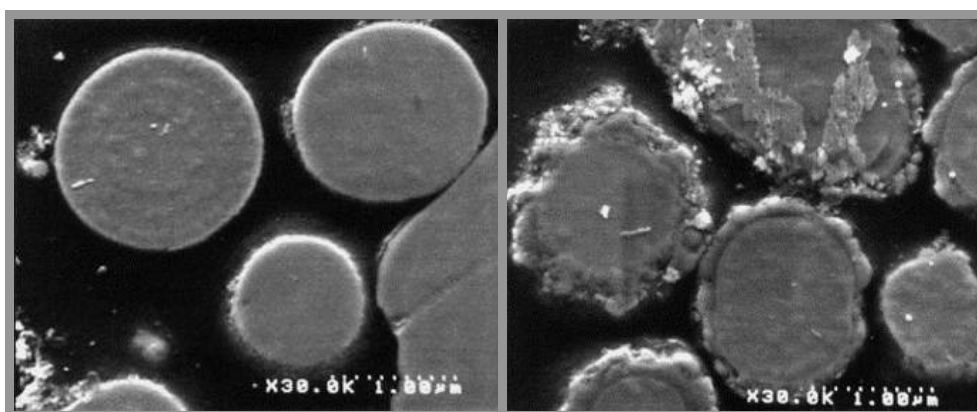
* Metoda spočívá v roztavení vzorku (teplota až 3000 °C) v atmosféře inertního plynu. Vzorek je umístěn v uhlíkovém kelímku. Kyslík uvolňující se ze vzorku reaguje s uhlíkem z kelímku za vzniku CO nebo CO₂. Množství těchto plynů je měřeno IR detektorem.

- po 108 hodinách měly železné částice 2-násobné množství kyslíku
- po 540 hodinách měly železné částice 18-násobné množství kyslíku

Tab. 2.1 Hmotnostní množství kyslíku u různých vzorků železných částic [56]

Sample	Oxygen (wt%)
Large particle iron powder	0.24
Small particle iron powder	0.47
MRF, 0 hod	0.4
MRF, 108 hod	0.9
MRF, 540 hod	7

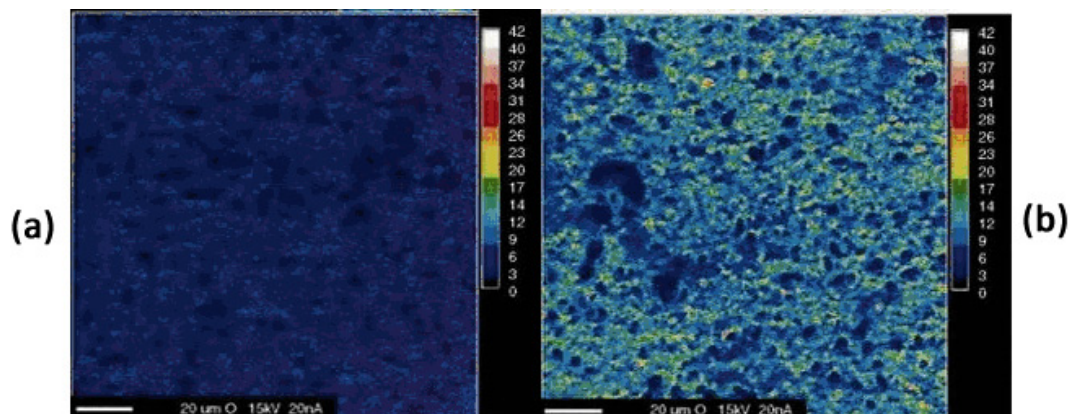
Obr. 2.25 ukazuje snímky výbrusu železných částic z elektronového mikroskopu. Vlevo jsou nové železné částice, vpravo po trvanlivostním testu. Na pravém snímku je zřetelná oxidická vrstva na povrchu částic.



Obr. 2.25 SEM snímek výbrusu železných částic (vlevo) nové částice; (vpravo) po 540 hodinách zatěžování [56]

Další důkaz vyšší oxidace železných částic je na obr. 2.26. Snímky jsou získány metodou EPMA*. Obr. 2.26a ukazuje zastoupení kyslíku v železných částicích nové MR kapaliny a obr. 2.26b zastoupení kyslíku v částicích zatěžované MR kapalině. Ze snímků je zřejmá vyšší koncentrace kyslíku v částicích zatěžované MR kapaliny.

* Univerzální elektronová mikrosonda (EPMA) v sobě spojuje elektronový mikroskop a RTG spektrometr. Tato metoda slouží ke kvantitativnímu studiu chem. složení materiálů v mikroměřítku s přesností řádově 0,01 hm.%.



Obr. 2.26 Snímky koncentrace kyslíku v železných částicích nové MR kapaliny (vlevo) a zatěžované (vpravo) [56]

Ulicny svou prací prokázal vznik oxidické vrstvy na železných částicích v průběhu dlouhodobého zatěžování, ale neřešil vliv přítomnosti oxidů na chování MR kapaliny v aktivovaném nebo neaktivovaném stavu.

2.5.3 Degradace MR efektu

Tento jev také přímo souvisí s oxidací částic. Zoxidované železné částice by měly vykazovat horší magnetické vlastnosti než částice nezoxidované. Vliv oxidace na magnetické vlastnosti byl publikován v [49]. V této práci byly porovnávány magnetické vlastnosti nových částic z karbonylu železa a částic po 3 denním sušení v kyslíkové komoře viz. tab. 2.2. Nové nezoxidované Fe částice jsou v prvním řádku tabulky označeny jako *CI particles* a zoxidované částice jsou označeny jako *B'*. Hodnota magnetického nasycení částic při stejné intenzitě magnetického pole poklesla ze 186,6 na 175,6 $\text{emu}\cdot\text{g}^{-1}$, což je pokles o 5,9%. Právě míra sycení má přímý vliv na velikost meze kluzu. Míru sycení lze nejlépe prezentovat permeabilitou. Lze tedy konstatovat, že při oxidaci částic by mělo dojít ke snížení MR efektu. Dále bylo zjištěno, že hodnota koercitivního pole* H_c se zvýšila dvojnásobně a magnetická remanence (zbytkový magnetismus) M_r dokonce trojnásobně.

Tab.2.2 Magnetické vlastnosti běžných a kompozitních CI částic [49]

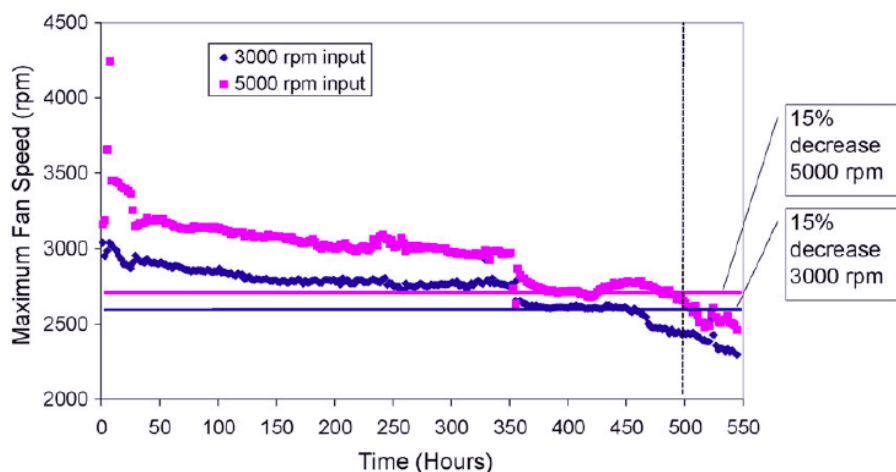
Sample	$M_s/(\text{emu}\cdot\text{g}^{-1})$	$\Delta M_s/M_s$	H_c/Oe	$\Delta H_c/H_c$	$M_r/(\text{emu}\cdot\text{g}^{-1})$	$\Delta M_r/M_r$
CI particles	186.6		4.07		0.1871	
B'	175.6	-5.9%	9.12	+124.1%	0.5670	+203.0%

Otázkou je, do jaké míry mohou mít tyto hodnoty vliv na chování MR kapaliny v reálném zařízení. Za předpokladu, že zmagnetované železné částice vstupují do magnetického pole nahodile, tj. s libovolným natočením magnetického dipólu, lze

* Intenzita magnetické pole, které je nutné aplikovat na feromagnetickou látku pro odstranění remanentního magnetismu

předpokládat, že rozdíl magnetické indukce částic se souhlasně a nesouhlasně natočenými dipóly bude nulový. Jaký bude vliv remanentního magnetismu na rychlost reakční doby MR kapaliny, není zřejmé.

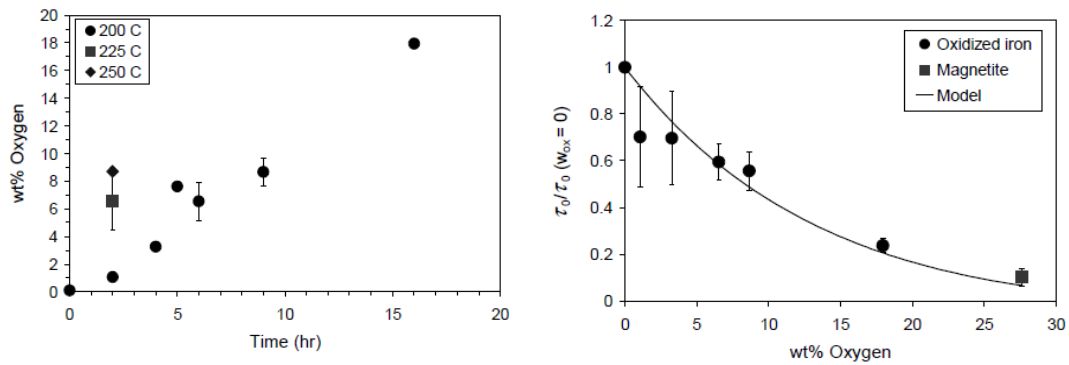
Ulicny při svém experimentu, kdy zatěžoval kapalinu v MR spojce [56], zaznamenával výstupní otáčky spojky v závislosti na době zatěžování viz. obr. 2.27. Fialová křivka zobrazuje výstupní otáčky spojky při vstupních otáčkách elektromotoru 5000 ot./min a modrá křivka výstupní otáčky při vstupních otáčkách 3000 ot./min.



Obr. 2.27 Výstupní otáčky MR spojky při konstantních vstupních otáčkách v průběhu trvanlivostního testu [56]

Na konci testu byl zaznamenán 15% pokles očekávaných otáček při daném budícím proudu cívky oproti hodnotám na začátku experimentu. Tento pokles má za následek oxidace, kdy se čisté železo přeměňuje na oxidy železa, které mají nižší permeabilitu než železo nebo jsou magnetické velice slabě. Nejčastěji železo oxidovalo na oxid železnato-železitý Fe_3O_4 , méně často poté na oxid železitý Fe_2O_3 . Výsledky tohoto experimentu nejsou zobecněny na chování MR kapaliny samotné, ale jedná se pouze o výstupní charakteristiku konkrétního MR zařízení v průběhu dlouhodobého zatěžování.

Sunkara ve spolupráci s Ulicnym zjišťoval vliv rozsahu oxidace na mez kluzu [57]. Graf vlevo na obr. 2.28 ukazuje míru oxidace v závislosti na teplotě a času vystavení 10 hm.% suspenze MR kapaliny proudu vzduchu 0,3 l/min. Míra oxidace je přímo úměrná času, což znamená, že vrstva oxidů na povrchu železných částic je neadherentní a pórovitá a nechrání tak čisté železo před další oxidací. Normalizovaná mez kluzu (tj. naměřená mez kluzu ku mezi kluzu nové kapaliny) je vynesena v závislosti na rozsahu oxidace na pravém grafu na obr. 2.28. Normalizovaná mez kluzu klesá s narůstající mírou oxidace. Největší míru oxidace zastupuje 10 hm% suspenze magnetitu.



Obr. 2.28 Rozsahu oxidace železných částic (vlevo), vliv stupně oxidace na mez kluzu [57]

Tyto výsledky přímo potvrzují vliv oxidace na mez kluzu. Problémem v praxi může být určení rozsahu oxidace, která zde není vyjádřena v závislosti na množství disipované energie. Mez kluzu byla měřena na reometru Bohlin VOR, který byl adaptovaný na měření vzorku v magnetickém poli. V publikaci není uveden rozsah smykového spádu měření, ale dle technické dokumentace může být maximální smykový spád v řádu 10^3 s^{-1} [58].

3. FORMULACE ŘEŠENÉHO PROBLÉMU A JEHO ANALÝZA

3

Hlavním problémem je nedostatečný popis chování MR kapaliny při dlouhodobém zatěžování. Dosud nebyl proveden žádný výzkum, který by toto chování detailně mapoval. Pro návrháře a konstruktéry je důležitý zejména popis chování při vysokých smykových spádech, které odpovídají reálným provozním podmínkám a při odpovídajícím tepelném a mechanickém zatížení.

Je nadměru důležité interpretovat chování MR kapaliny vhodným modelem, kde pro daný stav kapaliny, teplotu a míru aktivace jsou parametry tohoto modelu konstantní. Jako vhodný model se ukazuje Binghamský model viskoplastické kapaliny. Popis pomocí zdánlivé viskozity (jak publikoval Carlson) je naprosto nevyhovující a platí pouze pro konkrétní smykový spád.

Z provedené rešerše a analýzy současného stavu poznání lze v bodech vypsát následující bílá místa publikovaného poznání:

- popis MR kapaliny pomocí reologických stavových rovnic při vysokých smykových rychlostech:
 - nové MR kapaliny
 - v průběhu dlouhodobého zatěžování
- popis vlivu mechanického a tepelného zatížení na degradaci MR kapaliny
- metodika pro diagnostikování stavu MR kapaliny v zařízení
- objasnění tepelné degradace MR kapaliny

4. VYMEZENÍ CÍLŮ PRÁCE

Hlavní cíle této práce lze stručně popsat následujícími body:

- studium chování MR kapaliny ve vysokých smykových rychlostech v průběhu dlouhodobého zatěžování
- zkoumání vlivu teploty na chování MR kapaliny v průběhu dlouhodobého zatěžování

Vedlejší cíle práce:

- stanovení vhodné diagnostické metody pro určení provozního stavu MR kapaliny
- zpřesnění parametrů nové MR kapaliny udávaných výrobcem

Vedle těchto cílů lze definovat další dílčí cíle, jejichž splnění je nutné pro úspěšné řešení hlavních a vedlejších cílů práce:

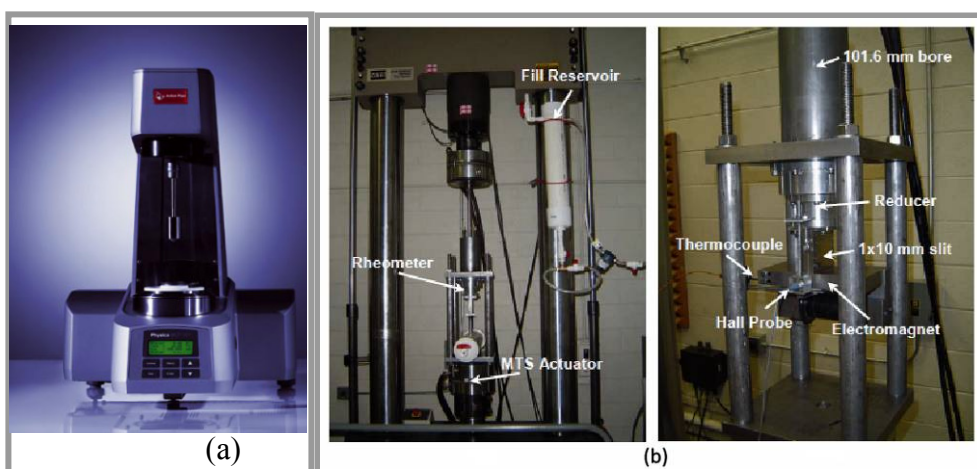
- vývoj nového experimentálního zařízení
 - návrh a konstrukce
 - kalibrace na newtonských kapalinách
 - zvolení vhodné metody pro přesné měření teploty v pracovní mezeře
- vývoj SW pro analýzu tokových křivek
- ověření vhodnosti použití Binghamského modelu pro popis chování MR kapaliny

5. METODICKÝ PŘÍSTUP K ŘEŠENÍ

Hlavním cílem této práce je popsat chování MR kapaliny v průběhu dlouhodobého zatěžování a sledování vlivu teploty. Nejdříve bylo nutné pro takto specifický úkol vybrat vhodný experimentální stand. Hlavní požadavky na experimentální zařízení byly tyto:

- měření tokových křivek
 - v aktivovaném stavu
 - v neaktivovaném stavu
- dlouhodobé zatěžování MR kapaliny, aniž by se muselo manipulovat se vzorkem
- zatěžování MR kapaliny za podmínek blízkých provozu lineárních MR zařízení, tj. při vysokých smykových spádech

Po průzkumu trhu bylo zjištěno, že v komerční sféře neexistuje žádné vyhovující řešení experimentálního zařízení. Jediné zařízení, které dokáže měřit MR kapalinu v aktivovaném stavu je reometr Physica MCR od firmy Anton Paar (viz. obr. 5.1a) [59] a reometr Bohlin VOR [58]. Tyto reometry neumožňují prakticky žádné zatížení MR kapaliny a měří pouze do smykového spádu 1000 s^{-1} . Pro zatěžování by muselo být použito jiné zařízení, což neodpovídá požadavkům. Bylo zřejmé, že bude nutné navrhnout a zkonstruovat nové, vhodnější experimentální zařízení (reometr). Inspirační pro vhodnou koncepci bylo také hledání ve vědeckých publikacích. Výzkumný tým Carlson, Ahmadian, Goncalvez sestrojili pístový průtokový reometr (obr. 5.1b) [60], který lze upnout do MTS standu (*MTS = Material Test System*). MTS stand zajišťuje pohyb pístu, kterým protlačuje MR kapalinu štěrbinou s magnetickým polem. Díky pístu lze dosáhnout vysokých smykových rychlostí až do 10^5 s^{-1} . Tento koncept je ovšem nevhodný pro dlouhodobé zatěžování, protože lze s pístem při měření pohybovat pouze jedním směrem.



Obr. 5.1 (a) Physica MCR 300 - Anton Paar [59]; (b) *Slit-flow* reometr výzkumné skupiny Carlson-Ahmadian [60]

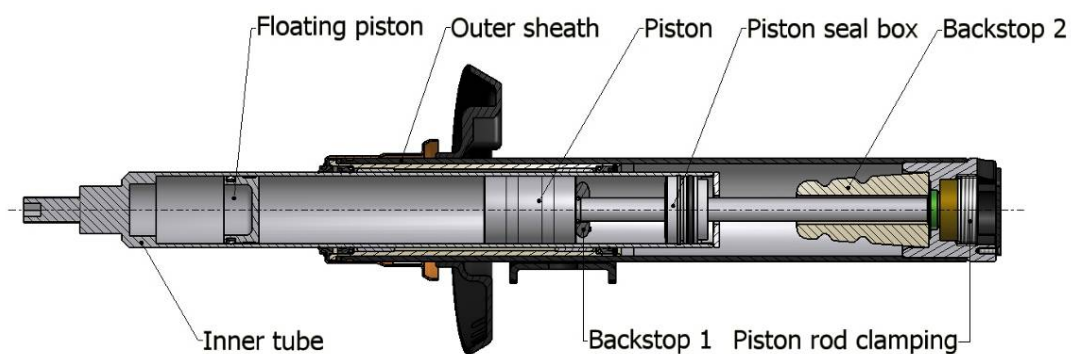
Tato kapitola se zabývá konstrukcí reometru, který byl vyvinut pro trvanlivostní zkoušky. Vedle popisu konstrukce reometru je v této kapitole rozebrán *data-acquisition* systém, analytický software vyvinutý pro hodnocení naměřených dat a metodika měření během trvanlivostní zkoušky.

5.1 Návrh slit-flow reometru

Na základě prvotních požadavků a poznatků byly specifikovány konkrétnější požadavky na nový reometr:

- jednoduchá instalace na jakýkoliv mechanický nebo hydraulický pulsátor
- měření za vysokých smykových rychlostí
- měření teploty
- měření MR kapaliny v aktivovaném i neaktivovaném stavu
- nízké pořizovací a provozní náklady
- snadná demontáž, dekontaminace a znovu naplnění druhým vzorkem
- sestavení z levných automobilových dílů

Jako velice výhodné se jevílo použití komerčně používaného MR tlumiče Delphi MagneticRide ze sportovního vozu Audi TT (obr. 5.2). Bylo velice výhodné využít pístovou skupinu a hydraulický válec tlumiče už z toho pohledu, že zatěžování a měření bude probíhat v reálných provozních podmínkách MR tlumiče.



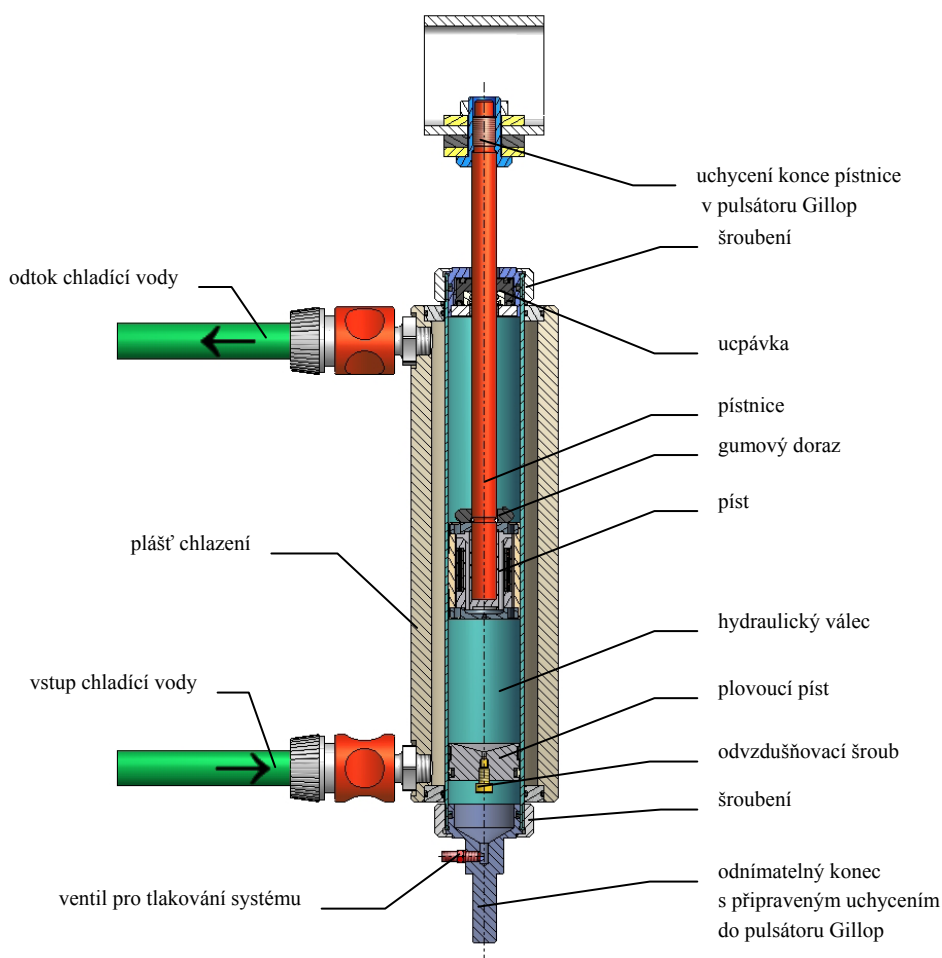
Obr. 5.2 Řez předním tlumičem typu McPherson Delphi MagneticRide

Pro splnění výše definovaných požadavků bylo nezbytné přistoupit k zásadní rekonstrukci:

- úprava hydraulického válce:
 - šroubení na obou koncích pro snadnou výměnu náplně
 - úprava konce pístnice pro uchycení do pulsátoru Gillop
 - úprava konce válce pro uchycení přepracované ucpávky

- ventilek pro tlakování systému dusíkem
- zkrácení hydraulického válce z důvodu menší zástavby
- nová konstrukce ucpávky se stávajícím těsnění
- zaslepení obtokových kanálků na pístu
- nová konstrukce plovoucího pístu s možností odvzdušnění
- uchycení do pulsátoru Gillop na konci pístnice
- vodní chlazení

Výsledný návrh *slit-flow* reometru je na obr. 5.3 včetně popisu důležitých částí:



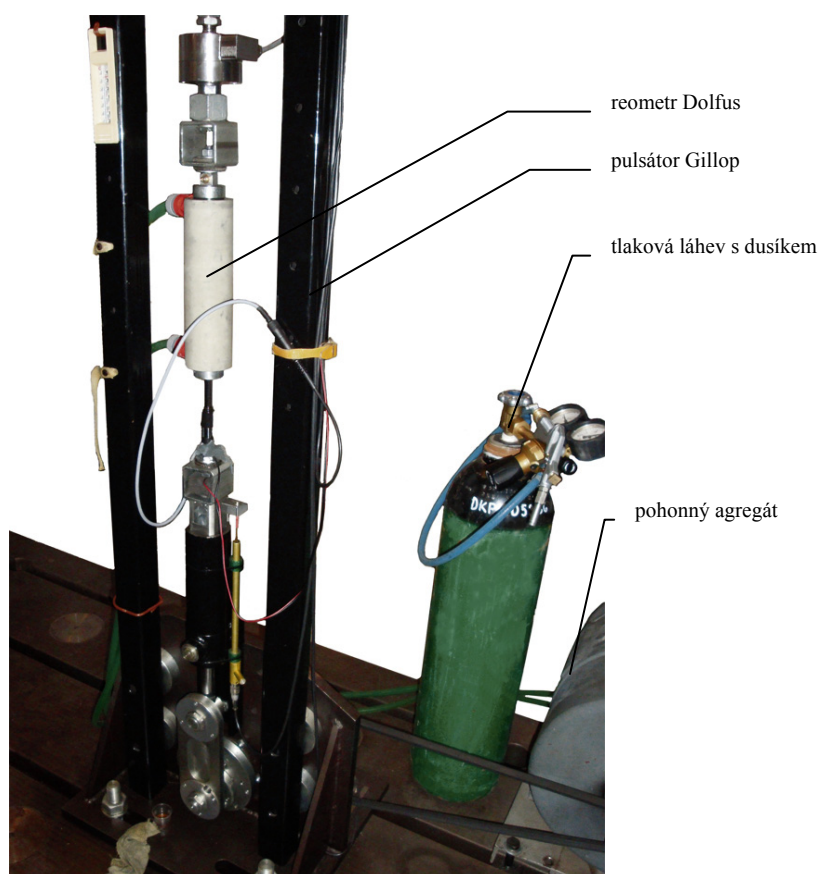
Obr. 5.3 Řez reometrem Dolfus

Pístnice a odnímatelný konec reometru byly přizpůsobeny pro uchycení do mechanického pulsátoru Gillop. Přesný popis technických parametrů lze najít v [61]. Na Gillopu byl nastaven zdvih 49,2mm. Pro měření tokových křivek je důležitá možnost plynulé změny otáček pohonného agregátu. Pomocí důmyslného systému roztečí děr na základním rámu Gillopu a systému podložek lze nastavit pulsátor tak, aby středová poloha pohybu pístu byla ve středu hydraulického válce. Tím se zajistí dostatečný prostor pod a nad pístem při spodní, resp. horní úvratí pístu. Zároveň lze díky tomu

minimalizovat objem MR kapaliny. Tím se zvýší množství umožňované energie na jednotku objemu MR kapaliny – LDE. Na obr. 5.4 je zabudovaný reometr v pulsátoru Gillop. Foto z výměny vzorku v reometru Gillop je v Příloze I.

Důležitým požadavkem kladeným na budoucí reometr bylo přesné měření okamžité teploty přímo ve štěrbině. Zabudování teplotního senzoru by však přineslo velké zásahy do originálních dílů pístu. S úspěchem byla využita závislost elektrického odporu vinutí cívky pístu na teplotě (viz. kap. 5.1.4). Teplota ve štěrbině je tedy po kalibraci určována elektrickým odporem cívky vypočteným z měřených hodnot proudu a napětí.

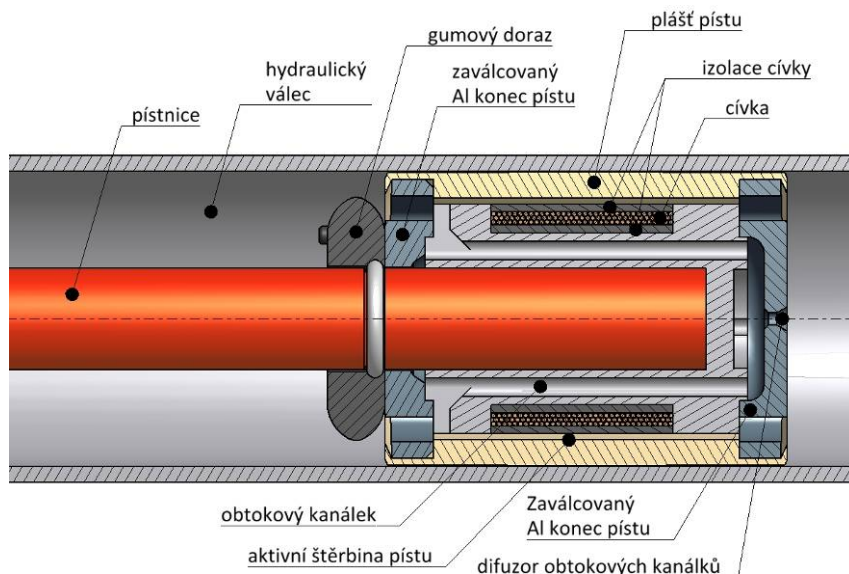
Samotné výstupy závislosti síly na rychlosti pístu popisují chování MR kapaliny v tomto konkrétním zařízení. Cílem této práce je ovšem popsat chování MR kapaliny obecně, aby mohlo být následně vztaženo na libovolné MR zařízení. Proto je nutné tyto výstupy převést na veličiny popisující pouze chování samotné MR kapaliny. Pro výpočet těchto veličin je nutné znát hydraulické poměry a přesnou geometrii pístu.



Obr. 5.4 Stanice Gillop se zabudovaným reometrem Dolfus

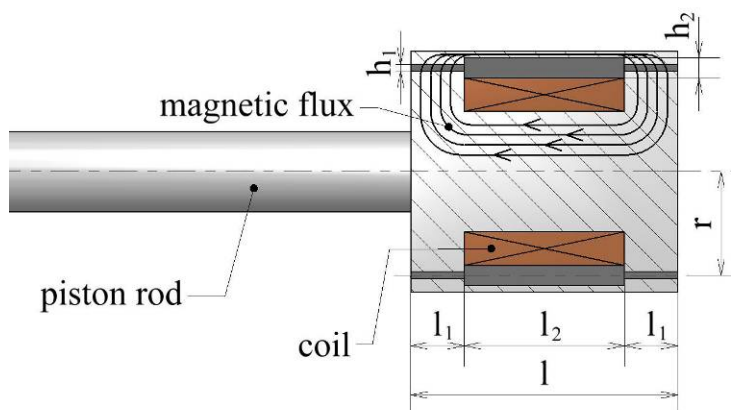
5.1.1 Pístová skupina

Obr. 5.5 ukazuje řez pístem reometru bez provedených úprav. Na obrázku jsou vidět obtokové kanálky, které tvarují F-v charakteristiku původního tlumiče. Tyto kanálky na spodním konci pístu ústí difuzorem do prostoru pod pístem. Vliv obtokových kanálků na měření tokových křivek je nežádoucí. Důležité je, aby MR kapalina protékala pouze aktivní štěrbinou pístu. Úprava pístu tedy spočívala v zaslepení difuzoru. To také byla jediná úprava pístové skupiny.



Obr. 5.5 Řez pístem

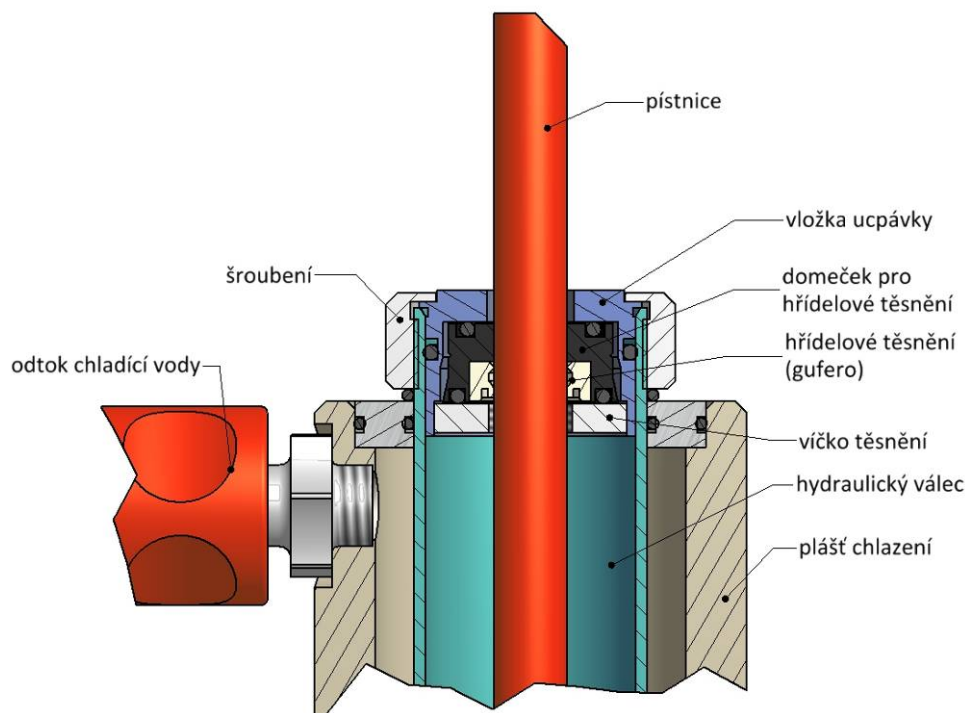
Hydraulické poměry mohou být vypočítány z přesné geometrie pístu. Na obr. 5.6 je zjednodušené schéma pístu s vyznačením hlavních rozměrů a směrem magnetického toku napříč aktivní části štěrbin.



Obr. 5.6 Zjednodušené schéma pístu

5.1.2 Řešení ucpávek

Hydraulický válec byl zkrácen kvůli zmenšení zástavbové velikosti. Původní ucpávka byla konstruována jako nerozebíratelná. Proto byla navržena ucpávka nová, využívající původní těsnění (obr. 5.7). Ucpávka je řešena jako snadno demontovatelná pomocí šroubení. Šroubením se utáhne na konci hydraulického válce vložka ucpávky, ve které je původní domeček a hřídelové těsnění. Domeček a těsnění uvnitř vložky drží pomocí nalisovaného víčka těsnění.

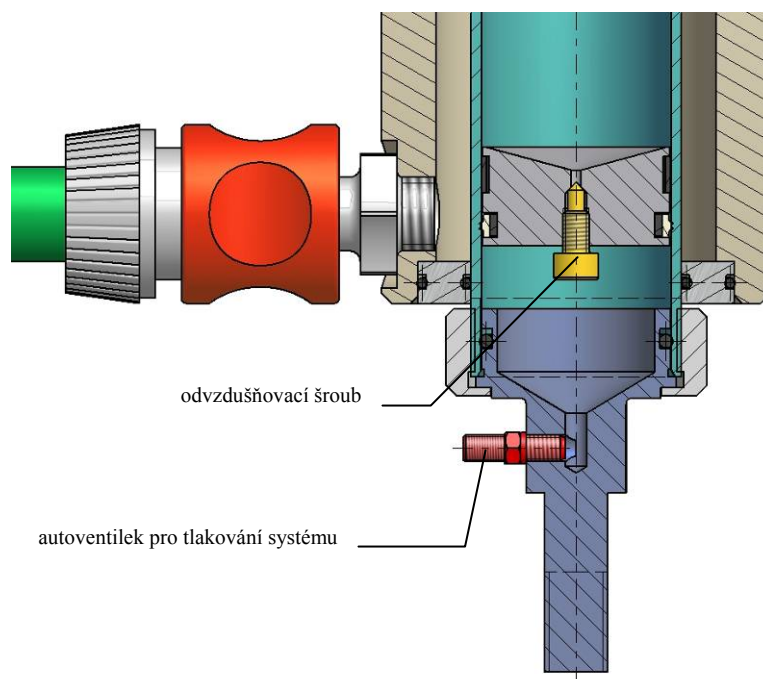


Obr. 5.7 Ucpávka

5.1.3 Tlakování systému a odvzdušnění

Tlakování systému se provádí natlakováním prostoru pod plovoucím pístem, tzv. kompenzátor objemu. Pro stanovení správného tlaku v systému jsou důležité dvě věci. Při stlačování pístu musí být dostatečný objem plynu v prostoru pod plovoucím pístem, aby při zasouvání pístnice do reometru a tím spojeném zvyšování objemu v prostoru náplně nedošlo ke stlačení plovoucího pístu až na dno reometru. Potom by se již nemohl píst dále zasouvat. Druhá věc je, že v prostoru pod plovoucím pístem musí být dostatečný přetlak, aby při úplném roztažení reometru nevznikal v tomto prostoru podtlak. Pokud je reometr naplněn 100ml MR kapaliny a natlakován na 3MPa, jsou tyto podmínky splněny. Tlakování probíhá pomocí autoventilku, který je na spodním konci reometru (obr. 5.8).

Při plnění reometru je také důležité náležitě odvzdušnit prostor náplně. Proto byl navržen nový plovoucí píst s odvzdušňovacím šroubem (obr. 5.8).



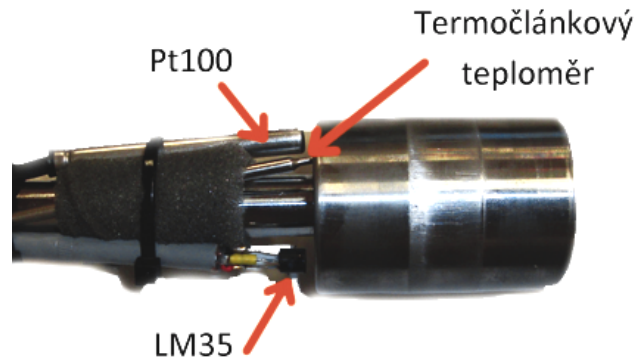
Obr. 5.8 Plovoucí píst s odvzdušňovacím šroubem

5.1.4 Měření teploty

5.1.4

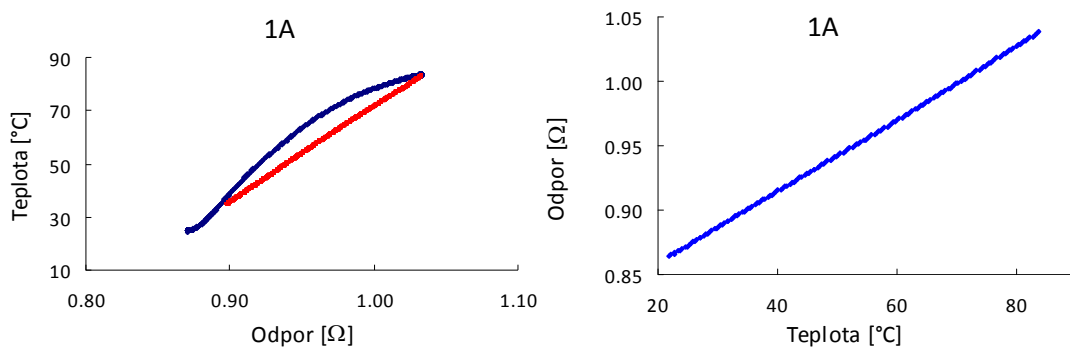
Přesné měření teploty MR kapaliny pomocí přídavného senzoru teploty do štěrbinu pístu by bylo při zachování původního pístu velice složité. S úspěchem byla tedy využita závislost odporu vinutí cívky na teplotě. Odpor cívky musel být přesně zkalibrován. Je zřejmé, že při zatěžování MR kapaliny (zejména při rozjezdu reometru nebo změně zatížení – rychlost, proud) zde bude působit setrvačnost přestupu tepla přes plastovou izolaci do cívky (názorně na obr. 5.5). Nicméně při teplotně stabilizovaném provozu by tato hystereze měla být zanedbatelná. Podmínka teplotně stabilizovaného měření byla zapracována do metodiky měření tokových křivek.

Kalibrace proběhla tak, že byl celý píst ponořen do olejové lázně, která byla následně zahřána na teplotu 75°C. Celá lázeň byla dobře izolována od okolního prostředí, takže chladnutí probíhalo pomalu (4-5 hod). Teplota byla zaznamenávána přesně zkalibrovaným teplotním senzorem Pt100, polovodičovým snímačem teploty LM35 a kontrola probíhala kontaktním termočláňkovým teploměrem. Oba snímače teploty byly umístěny co nejbližší k cívce (obr. 5.9). Ke kalibraci byla použita závislost odporu na teplotě při chladnutí, které probíhala až 5hodin díky dobré izolaci. Tím byly odstraněny projevy hystereze vlivem přestupu tepla z olejové lázně do cívky.



Obr. 5.9 Umístění teploměrů při kalibraci cívky

Kalibrace proběhla při různých budících proudech v cívce. To potvrdilo vliv proudu na kalibraci. Cívka má při 20°C odpor cca 0,8Ω, což při max. proudu 2A dělá tepelný výkon 1,6W. Tepelný výkon vždy ohřívá cívku o určitou teplotu více než je teplota okolí. Proto byla kalibrace korigována i o vliv proudu. Graf na obr. 5.10 ukazuje vliv hystereze při rychlém ohřevu cívky. Pro potřeby kalibrace byla uvažována pouze křivka chladnutí (červené body).



Obr. 5.10 Odpor cívky při ohřevu a chladnutí (vlevo); závislost odporu na teplotě (vpravo)

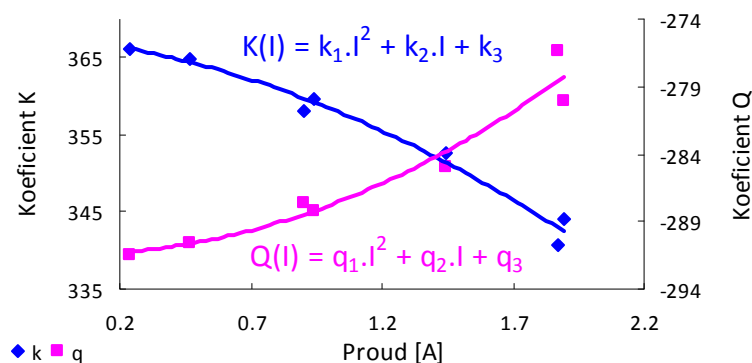
Body průběhu závislosti teploty na odporu byla proložena přímkou a to pro škálu budících proudů od 0,2 do 2A (tab. 5.1). V tabulce jsou pro každý měřený proud vypsány koeficienty regresních přímek dle obecné rovnice (6), kde R je odpor, t je teplota a K a Q jsou koeficienty přímky.

Tab. 5.1 Koeficienty regresních přímek závislosti odporu na teplotě

proud I [A]	0.24	0.47	0.94	0.91	1.44	1.87	1.89
K	366.2	364.7	359.7	358.1	352.6	340.6	344.2
Q	-291.5	-290.6	-288.3	-287.7	-284.9	-276.3	-280.1

$$t(R) = K \cdot R + Q \quad (6)$$

Průběh koeficientů K a Q v závislosti na proudu v cívce je na grafu na obr. 5.11. Body byl proložen polynom 2. řádu s koeficienty k_1, k_2, k_3 a q_1, q_2, q_3 .



Obr. 5.11 Závislost koeficientů K a Q na proudu I

Hodnoty koeficientů jsou v tab. 5.2:

Tab. 5.2 Koeficienty polynomu 2. řádu (kalibrace teploty)

k_1	k_2	k_3	q_1	q_2	q_3
-4.44	-4.23	350.77	3.52	-0.04	-273.21

Teplota je počítána z odporu, který se získá dle Ohmova zákona podílem napětí na svorkách cívky a proudu, který cívkou prochází. Rovnici (6) pro výpočet teploty je vhodné přepsat na závislost proudu a napětí, protože to jsou přímo měřené veličiny:

$$t(I, U) = K \cdot \frac{U}{I} + Q \quad (7)$$

Dosazením polynomu 2. řádu za koeficienty K a Q dostaneme rovnici závislosti teploty na proudu a napětí s korekcí vlivu ohřevu cívky procházejícím proudem:

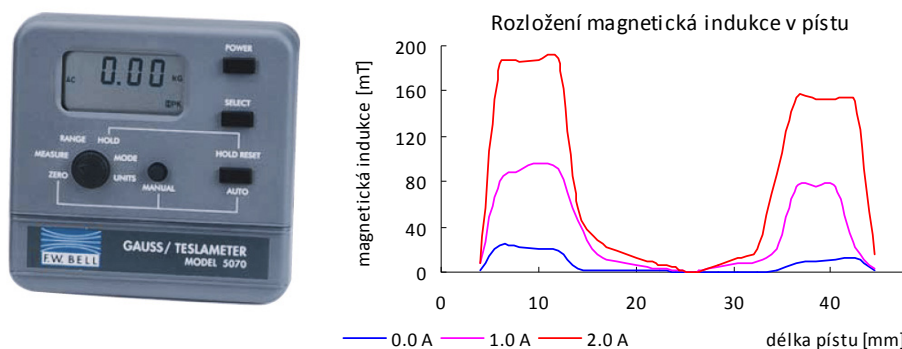
$$t(I, U) = (k_1 \cdot I^2 + k_2 \cdot I + k_3) \cdot \frac{U}{I} + (q_1 \cdot I^2 + q_2 \cdot I + q_3) \quad (8)$$

5.1.5 Magnetické pole pístu

5.1.5

Aby mohlo být chování MR kapaliny v aktivovaném stavu zobecněno, musel být nalezen vztah mezi budícím proudem cívky a intenzitou magnetického pole uvnitř pístu. Magnetické pole bylo měřeno magnetometrem F.W. Bell 5070 (obr. 5.12 vlevo) a byla použita ultratenká sonda STB5X-0201 s délkou měřícího hrotu 26mm.

Na vyjmutém pístu bylo provedeno větší množství přípravných měření tímto magnetometrem. Průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře po délce pístu byl zjišťován pro různé magnetizační proudy (obr. 5.12 vpravo). Magnetická indukce není rozložena rovnoměrně po délce šterbiny, ale projevuje se vliv tvarování magnetického obvodu (viz. obr. 5.6). Magnetická indukce je největší v místě zúžení škrtkové šterbiny. Na obr. 5.6 je toto místo označeno kótou l_1 . V tomto místě je nejmenší magnetický odpor, tudíž převážná většina magnetického toku prochází tímto místem, které lze označit za aktivní zónu MR ventilu. Tyto zóny jsou v pístu dvě. Z grafu lze vyčíst rozdíl mezi magnetickou indukcí první a druhé zóny. Tento rozdíl je pravděpodobně způsoben nesymetrickým uspořádáním celého magnetického obvodu. Magnetická indukce při proudu 0A je způsobena remanentním magnetismem obvodu při maximálním provozním proudu 2A. Přítomnost magnetické indukce mimo tyto zóny je způsobena rozptylovými toky [62].



Obr. 5.12 Magnetometr F.W.Bell 5070 (vlevo); rozložení magnetické indukce (vpravo)

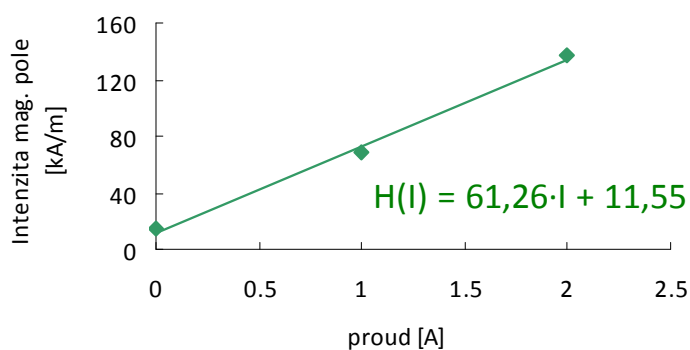
Magnetometrem byla měřena magnetická indukce. Magnetická indukce udává magnetizaci daného prostředí vlivem působícího magnetického pole. Je vhodnější tedy přímo udávat intenzitu magnetického pole. Pro magnetickou indukci a intenzitu magnetického pole platí vztah:

$$\mu = \frac{B}{H} = \mu_0 \cdot \mu_r \quad (9)$$

, kde μ je absolutní permeabilita, B je magnetická indukce, H je intenzita magnetického pole, μ_r je relativní permeabilita μ_0 je magnetická konstanta (permeabilita vakua). Absolutní permeabilita udává míru magnetizace vlivem působícího magnetického pole. Měření bylo provedeno na vzduchu, tzn. $\mu_r = 1$. Vyjádřením H a dosazením magnetické konstanty lze přepočítat magnetickou indukci na intenzitu magnetického pole:

$$H = \frac{B}{\mu_0 \cdot \mu_r} = \frac{B}{4\pi \cdot 10^{-7}} \quad (10)$$

Graf na obr. 5.13 ukazuje střední hodnotu intenzity magnetického pole z obou aktivních zón MR ventilu v závislosti na budícím proudu.



Obr. 5.13 Závislost intenzity magnetického pole na budícím proudu

5.1.6 Zdroj napájení pístu

5.1.6

Pro napájení pístu byl použit stabilizovaný zdroj Mesit MN 40V-10A (obr. 5.14), který byl nastaven na proudové omezení. Tento postup byl použit z důvodu zabezpečení konstantního magnetického pole, protože intenzita magnetického pole je závislá na velikosti budícího proudu a nikoliv na napětí. Jelikož se mění odpor cívky v závislosti na tepelných podmínkách v reometru, mění se i příkon cívky. V režimu stabilizovaného proudu se při změně teploty měnila hodnota napětí.



Obr. 5.14 Stabilizovaný zdroj MN 40V-10A

5.2 Data-acquisition system

Data acquisition system nebo-li systém sběru dat lze rozdělit na snímače, analyzátor od firmy Dewetron a na SW pro záznam dat.

5.2.1 Měřicí řetězec

Během trvanlivostní zkoušky i během měření tokových křivek jsou zaznamenávány tyto veličiny:

- síla na pístnici, snímaná tenzometrickým siloměrem HBM U2AD1 (obr. 5.15a)
- poloha pístu měřená lineárním indukčností senzorem SD2 (obr. 5.15b)
- teplota pístnice (senzor LM35) (obr. 5.15c)
- napětí vinutí cívky pístu (obr. 5.16a)
- proud ve vinutí cívky – měřeno přes bočník (obr. 5.16b)
- frekvence otáčení pulsátoru – Hallovo čidlo (obr. 5.16c)



Obr. 5.15 Detail na (a) siloměr HBM U2AD1; (b) indukčností snímač polohy SD2; (c) snímač teploty LM35



Obr. 5.16 Detail na (a) napájení cívky – měření napětí; (b) bočník; (c) měření otáček pulsátoru

Signály z těchto šesti měřených veličin byly snímány analyzátozem DEWE 800 od firmy Dewetron (obr. 5.17a). Analyzátor má osazeny v racku moduly, které snímané signály zesilují a filtrují dle požadavku (obr. 5.17b).



Obr. 5.17 DEWE 800 (a) stanice na měřicím pracovišti; (b) rack se zesilovacími moduly

Seznam měřených veličin a odpovídajících modulů je v tab. 5.3. Vyfiltrované a zesílené signály jsou zpracovávány měřicí kartou NI PCI-6034E od firmy National Instruments.

Tab. 5.3 Seznam snímačů a měřených veličin a k tomu odpovídající moduly v DEWE 800

připojený snímač nebo měřená veličina	typ modulu
siloměr HBM U2AD1	DAQP-BRIDGE
indukčnostní snímač zdvihu SD2	DAQP-CFB
polovodičový snímač teploty LM35	přímý vstup do měřicí karty
napětí ve vinutí cívky	DAQP-LV
proud procházející cívkou	DAQP-LV
frekvence otáček pulzátoru	DAQP-FREQ-A

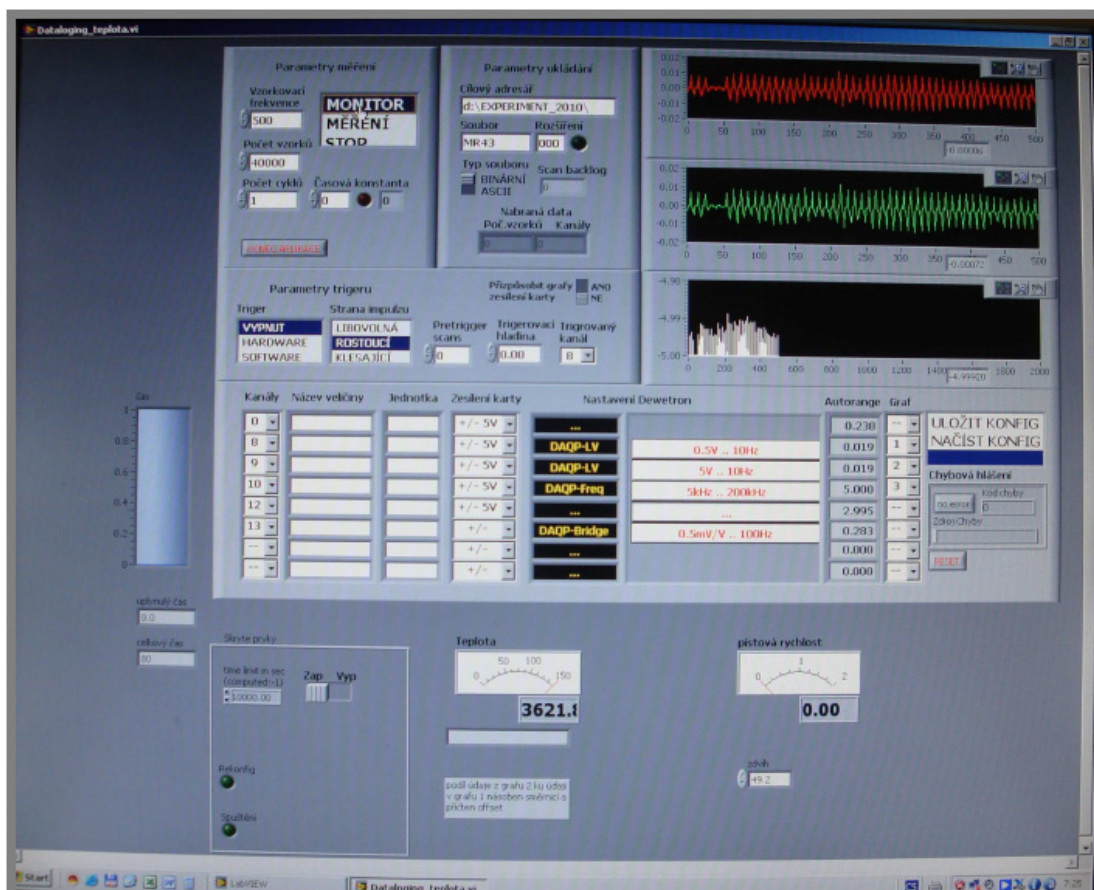
5.2.2 SW pro záznam dat

5.2.2

Během experimentu byly měřeny 2 typově rozdílné soubory dat. První soubor dat byl získáván z tzv. rozběhové zkoušky. Pozdější analýzou se z těchto souborů určovalo chování a vlastnosti MR kapaliny (viskozita, mez kluzu, atd.). Druhý typ souborů sloužil k záznamu průběhu zatěžování. Zatímco soubory rozběhové zkoušky obsahovaly 80s záznam se vzorkovací frekvencí 500Hz, soubory záznamu průběhu trvanlivostní zkoušky byly 1 až 2 hodinové záznamy se vzorkovací frekvencí 100Hz.

a) Datalogger

Tento program (obr. 5.18) určený pro záznam předem zvolených kanálů vyvinul tým doc. Mazúrka v programovém prostředí LabVIEW. U obou trvanlivostních zkoušek sloužil tento program k záznamu rozběhové zkoušky, z které se v analytickém SW získávaly tokové křivky. U první trvanlivostní zkoušky byl tímto programem zaznamenáván celý průběh zkoušky, kdy byla data ukládána do souboru o velikosti odpovídající záznamu jedné nebo dvou hodin měření v závislosti na době do konce zatěžovacího cyklu. Výstupem z tohoto programu je soubor, v kterém jsou data uložena v binární podobě. Výhoda binárního výstupu je v úspoře místa na pevném disku, protože vytvořené soubory mají mnohem menší velikost. Musí se ale ke každému naměřenému souboru vést záznam s nastavením zesilovacích modulů a s kalibračními snímačů. Mezi výhody tohoto programu patří přímé softwarové ovládání zesilovacích modulů Dewetronu přes komunikační sběrnici RS485. Mezi nevýhody patří to, že při ukládání signálů nelze on-line monitorovat jejich průběh. Toto byl hlavní důvod, proč průběh druhé trvanlivostní zkoušky byl zaznamenáván nově zakoupeným měřicím a analytickým programem Dewesoft.



Obr. 5.18 Maska programu Datalogger

b) Dewesoft

K záznamu dat byla použita nejnovější dostupná verze Dewesoftu 7.0.2 v licenci DSA. Tento program umožňuje on-line sledovat měřené a ukládané signály. Dewesoft obsahuje grafické prostředí, kde si uživatel sestaví masku měřicího programu z předem definovaných zobrazovacích prvků (graf, x-y graf, osciloskop, číselné zobrazení, analogový budík, atd.). Umožňuje definovat matematické kanály, které se on-line přepočítávají. Je tedy možné přímo během experimentu sledovat definovaný matematický kanál a v řízení a kontrole experimentu přímo reagovat na měnící se podmínky. Výhodou kalibrace v Dewesoftu je, že si Dewesoft automaticky přepočítá kalibrační konstanty při použití jiného zesílení na modulech Dewetronu. Data se také ukládají v binární podobě, ale s XML hlavičkou, kde jsou uloženy kalibrační konstanty a nastavení zesilovacích modulů. Bohužel Dewesoft používá 24 bitový formát čísla. Z tohoto důvodu nemohl být Dewesoft použit také k měření tokových křivek při rozběhových zkouškách. Analytický program MultiVisco pracuje se 16bitovou velikostí dat.



Obr. 5.19 Maska měřicího programu Dewesoftu

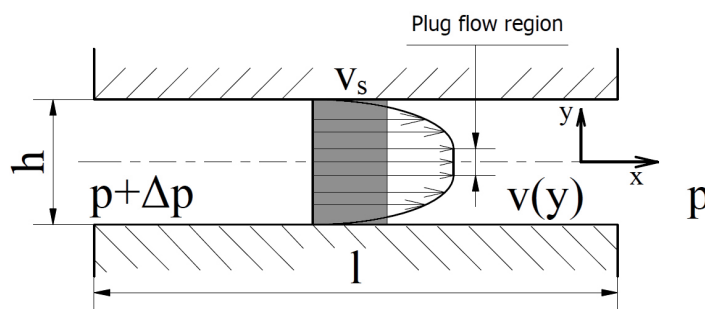
Na obr. 5.19 je maska měřicího programu, která byla používána pro měření v průběhu zatěžovacích cyklů trvanlivostní zkoušky. Většina sledovaných parametrů nebo veličin se on-line dopočítává, např. rychlost pístu derivací zdvihu, teplota cívky z jejího odporu, okamžitý výkon, míra pulsací, atd. Dewesoft umí v rámci ukládaného nebo počítaného kanálu zobrazovat např. jeho průměrnou hodnotu, efektivní hodnotu, maximální, minimální, atd. a to z vybraného časového intervalu (0,1s, 1s, 5s). Není tedy nutné kvůli tomu vytvářet nový matematický kanál, který by tyto hodnoty počítal nebo vybíral. To je výhodné právě pro on-line monitoring měření,

5.3 Analytický SW pro vyhodnocení tokových křivek

Pro vyhodnocování naměřených dat byl vytvořen analytický program MultiVisco-MRQ. Ten řeší převod F-v charakteristiky na tokovou křivku a následnou analýzu tokové křivky odhadem parametrů Binghamského modelu MR kapaliny. Základní kroky z vývoje programu jsou v následujících podkapitolách.

5.3.1 Matematický postup převodu F-v diagramu na τ - $\dot{\gamma}$

Protože u navrženého reometru je snímána síla vyvolaná pohybem pístu a zdvih pístu, je nezbytné připravit teoretický aparát pro odvození základních reologických veličin. K tomu byl použit Binghamský model (viz. kap. 2.2). Model má jednoduchou matematickou interpretaci viz. rovnice (2), kde η je konstanta, stejně jako u newtonské kapaliny. Při koncepci navrhovaného reometru není toto zjednodušení na závadu, protože cílem není získávat absolutně přesné reologické parametry kapalin, ale sledovat změny parametrů jednoho vzorku kapaliny při jejím dlouhodobém zatěžování.



Obr. 5.20 Průtok kapaliny mezerou

U newtonovské MR kapaliny není celkový tlakový spád Δp vyvolán pouze hydraulickým odporem (Δp_η), ale též přitažlivými magnetickými silami mezi železnými částicemi (Δp_τ). Po překonání meze kluzu τ_y je vyvoláno proudění štěrbinou o tloušťce h , šířce b a délce l (obr. 5.20) tlakovým spádem Δp_η . Uvažujeme-li laminární proudění, pak platí vztah:

$$\tau(y) = -\frac{\Delta p_\eta}{l} y + \tau_y \quad (11)$$

Z obr. 5.20 je zřejmé, že profil rychlosti Binghamské kapaliny není zcela parabolický, ale uprostřed štěrbinou je tzv. „plug flow region“. Platí-li vztah (12), je tato oblast natolik malá, že ji lze zanedbat:

$$\frac{h}{2} \ll \frac{\tau_y \cdot l}{\Delta p_\eta} \quad (12)$$

Při měření vysokých smykových je podmínka (12) splněna a lze tedy považovat profil rychlosti za parabolický. Dosazením rovnice Binghamského modelu $\tau = \tau_y = \eta \cdot dv/dy$ a následnou integrací lze odvodit parabolický profil rychlosti napříč štěrbinou ve směru y , kde η je dynamická viskozita:

$$v(y) = \frac{\Delta p_\eta}{2 \cdot \eta \cdot l} \left[\left(\frac{h}{2} \right)^2 - y^2 \right] \quad (13)$$

Pro objemový průtok Q platí rovnice:

$$dQ = b \cdot dy \cdot v(y) = b \cdot dy \cdot \frac{\Delta p_\eta}{2 \cdot \eta \cdot l} \left[\left(\frac{h}{2} \right)^2 - y^2 \right] \quad (14)$$

Potom po integraci:

$$Q = \frac{\Delta p_\eta \cdot b}{2 \cdot \eta \cdot l} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \left[\left(\frac{h}{2} \right)^2 - y^2 \right] dy = \frac{\Delta p_\eta \cdot b}{12 \cdot \eta \cdot l} \cdot h^3 \quad (15)$$

Pro objemový průtok kapaliny štěrbinou platí také:

$$Q = h \cdot b \cdot v_s, \quad (16)$$

kde v_s je střední rychlost rychlostního profilu (obr. 5.20). Vyjádřením η z (15) a dosazením (16) lze získat vztah:

$$\eta = \frac{\Delta p_\eta \cdot b}{12 \cdot Q \cdot l} \cdot h^3 = \frac{\Delta p_\eta \cdot b}{12 \cdot h \cdot b \cdot v_s \cdot l} \cdot h^3 = \frac{\Delta p_\eta \cdot h^2}{12 \cdot v_s \cdot l} \quad (17)$$

Pro výpočet smykového napětí τ ve styku maziva se stěnou štěrbinou platí:

$$\tau \left(\frac{h}{2} \right) = \frac{F}{S_t} = \frac{\Delta p_\eta \cdot b \cdot h}{2 \cdot b \cdot l} = \frac{\Delta p_\eta \cdot h}{2 \cdot l}, \quad (18)$$

kde F je síla protlačující olej štěrbinou a S_t je součet kontaktních ploch. Dosazením rovnic (17) a (18) do rovnice Binghamského modelu $\tau - \tau_y = \gamma' \cdot \eta$ získáme vztah pro výpočet smykového spádu γ' v okrajové vrstvě protékajícího maziva:

$$\gamma' \left(\frac{h}{2} \right) = \frac{\tau \left(\frac{h}{2} \right)}{\eta} = \frac{\Delta p_\eta \cdot h}{2l} = \frac{6 \cdot v_s}{h} \quad (19)$$

Výchozí vztahy platí pro laminární proudění mezi dvěma nekonečně širokými deskami vlivem tlakového gradientu. Jejich platnost pro desky konečné šířky b je zajištěna pouze při zachování dostatečně vysoké hodnoty podílu b/h (v našem případě >100).

Celkový tlakový spád v jednoduché štěrbině je popsán rovnicí [48]:

$$\Delta p = \Delta p_\eta + \Delta p_\tau = \frac{12 \cdot \eta \cdot Q \cdot l}{h^3 b} + \frac{2 \tau_y(H) \cdot l}{h}, \quad (20)$$

kde právě hodnota meze kluzu $\tau_y(H)$ vyjadřuje napěťovou složku zdánlivé viskozity způsobenou magnetickým polem o intenzitě H . Při identifikaci parametrů neznámé kapaliny je nutno kromě viskozity η , nezávislé na magnetickém poli, zjistit také $\tau_y(H)$ jako funkci intenzity magnetického pole H ve štěrbině.

5.3.2 Korekce matematických vztahů s ohledem na reálné podmínky

5.3.2

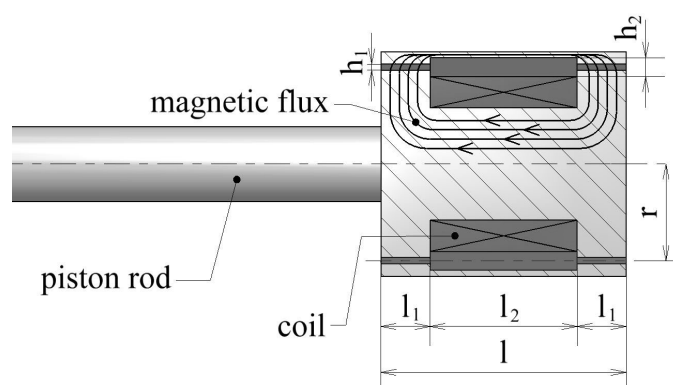
Reálný píst navrhovaného reometru má štěrbinu aktivní zóny o tloušťce h_1 a šířce $b = 2\pi r$ rozdělenou na dva úseky o délce l_1 (obr. 5.21). Mezi nimi prochází kapalina štěrbinou s výrazně slabší intenzitou magnetického pole $H_2 = k_H \cdot H_1$ (viz. obr. 5.12). Měřením na magnetometru byla zjištěna hodnota $k_H = 0.1$ v širokém rozsahu H . Také geometrický profil této štěrbiny je odlišný (h_2, l_2). Při předpokladu přibližně lineární závislosti $\tau_y(H)$ na H , lze tlakovou ztrátu Δp_2 v této části štěrbiny vyjádřit analogickou rovnicí:

$$\Delta p_2 = \Delta p_{\eta_2} + \Delta p_{\tau_2} = \frac{12 \cdot \eta \cdot Q \cdot l_2}{h_2^3 b} + \frac{2 \cdot k_H \tau_y(H_1) \cdot l_2}{h_2} = k_\eta \cdot \Delta p_{\eta_1} + k_\tau \cdot \Delta p_{\tau_1} \quad (21)$$

Hydraulické poměry v obou částech štěrbiny lze tedy popsat součiniteli, kde k_η je :

$$k_{\eta} = \frac{\Delta p_{\eta 2}}{\Delta p_{\eta 1}} = \frac{h_1^3 \cdot l_2}{2 \cdot h_2^3 \cdot l_1} \qquad k_{\tau} = \frac{\Delta p_{\tau 2}}{\Delta p_{\tau 1}} = \frac{k_H \cdot h_1 \cdot l_2}{2 \cdot h_2 \cdot l_1} \qquad (22)$$

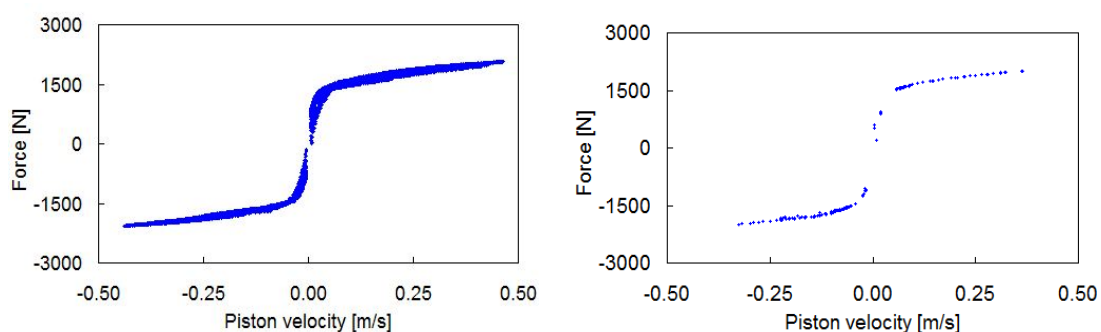
Takto vypočtené koeficienty jsou předběžné a je nutné je ověřit v potřebném rozsahu provozních podmínek. O tyto hodnoty tlakových diferencí je nutno celkový naměřený tlakový spád Δp korigovat, aby bylo možné identifikovat poměry v měrné štěrbině. Předpokladem je jednoznačné odlišení viskozitní a magnetické složky tlakového spádu, což musí zajistit vhodná zkušební metodika.



Obr. 5.21 Zjednodušené schéma pístové skupiny s definovanými rozměry

5.3.3 Metoda konverze F-v diagramu na tokovou křivku

Při každém rozběhovém testu je získána množina bodů (v_x , F_x) v různých zátěžných stavech. Je to velký počet bodů s velkým rozptylem, způsobený různými provozními podmínkami klikového mechanismu v průběhu cyklu (obr. 5.22a). Z těchto bodů jsou následně vybrány jen ty, kdy je zrychlení pístu blízké nule. Tento výběr odstraní vliv pružnosti plynové náplně a setrvačných sil na hysteretní charakter rozložení bodů (obr. 5.22b). Ani tuto množinu bodů nelze přímo zpracovat regresní analýzou, protože při práci klikového mechanismu nejsou zastoupeny body na různých pístových rychlostech s vyrovnanou četností. Rozsah rychlostí je proto rozdělen na sto úseků a v každém stanovena lokální střední hodnota síly (obr. 5.23a).



Obr. 5.22 (a) naměřená množina bodů ; (b) vybrané body síly s nulovým zrychlením pístnice

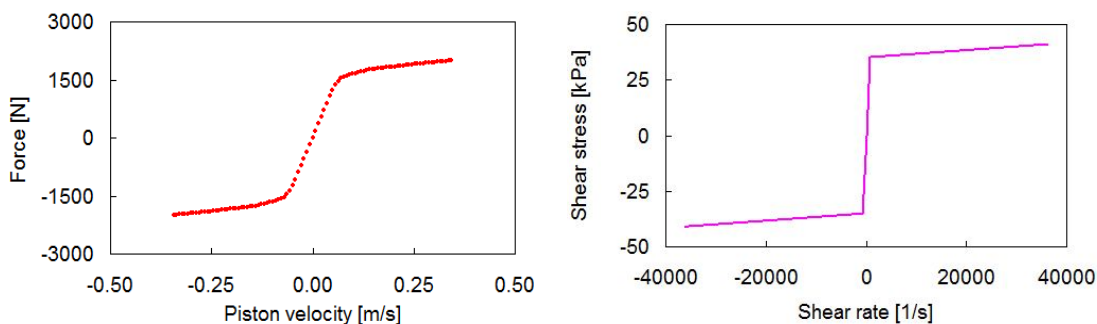
Nyní lze díky odvozeným matematickým vztahům v kap. 5.3.1 a 5.3.2 přejít k přepočtu F - v diagramu na tokovou křivku. Střední rychlost proudění ve štěrbině v_{sl} lze spočítat z rovnice kontinuity a okamžité rychlosti pístu v_p :

$$v_{sl} = v_p \cdot \frac{S_p}{S_s} = v_p \cdot \frac{S_p}{b \cdot h_l} = v_p \cdot \frac{S_p}{2\pi r \cdot h_l}, \quad (23)$$

kde S_p je činná plocha pístu reometru a S_s je plocha štěrbiny. Sílu F lze za těchto předpokladů transformovat na celkové smykové napětí na okraji štěrbiny τ a rychlost pístu v_p na smykový spád γ' na okraji měrné štěrbiny pístu při použití vztahů:

$$\tau = \frac{\Delta p \cdot h_l}{2l} = \frac{h_l}{2l \cdot S_p} \cdot F \quad (24)$$

$$\gamma' = \frac{6 \cdot v_{sl}}{h_l} = \frac{3 \cdot S_p}{\pi \cdot r \cdot h_l^2} \cdot v_p \quad (25)$$

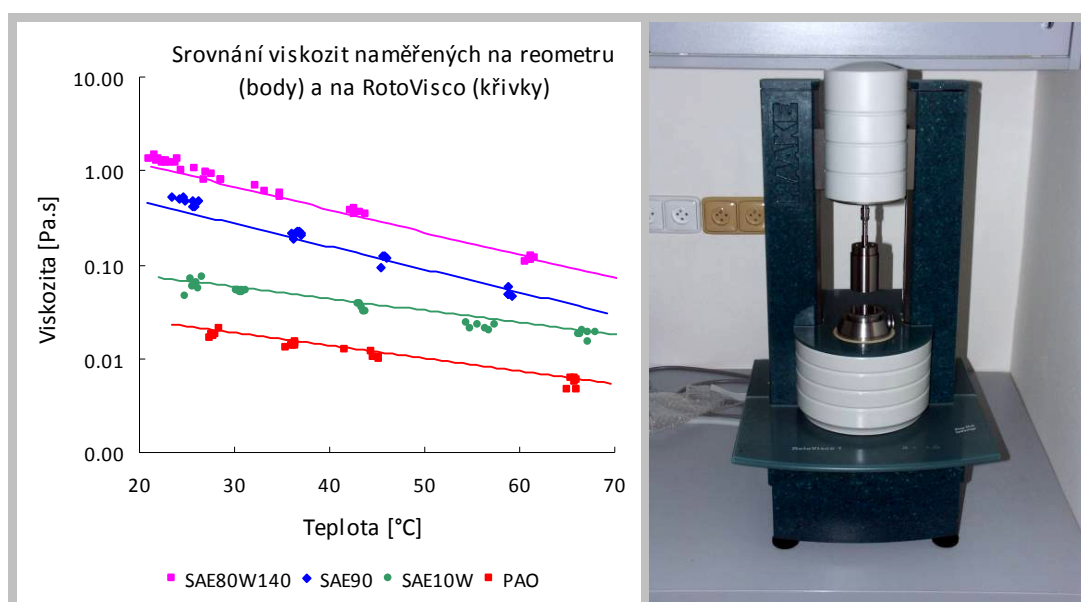


Obr. 5.23 (a) množina bodů s vyrovnanou četností; (b) Binghamův model MR kapaliny ($t=35^\circ\text{C}$, $H=140\text{kA/m}$) při různých pístových rychlostech

V této fázi je interaktivním procesem určena minimální hodnota smykové rychlosti pro regresní analýzu. Množinou bodů nad touto hodnotou je proložena regresní přímka a její průsečík s osou τ stanovuje nekorigovanou mez kluzu τ_m , zatímco směrnice této přímky vyjadřuje nekorigovanou dynamickou viskozitu η_m . Hodnoty τ_m a η_m jsou zjištěny na reálném pístu, kde dvě části štěrbiny l_1 leží v magnetickém poli (aktivní zóny) a část l_2 nikoli (obr. 5.21). Pro funkci reometru se musí pro stanovení cílových hodnot τ a η provést korekce viz. kap. 5.3.2. Při znalosti cílových hodnot lze vykreslit Binghamův model dle rov. (2), tj. závislost smykového napětí v kapalině na smykovém spádu (toková křivka) testované kapaliny při dané teplotě a intenzitě magnetického pole ve štěrbině (obr. 5.23b).

5.3.4 Kalibrace reometru

Kalibrace reometru byla provedena srovnáním viskozitních křivek etalonového oleje s naměřenými hodnotami na komerčním reometru. Etalonové viskozitní křivky byly naměřeny na rotačním viskozimetru RotoVisco od firmy Haake (obr. 5.24b). Viskozimetr byl vybaven oběhovým ohřevem DC50 a chlazením K10. Viskozitní křivky byly měřeny v rozsahu teplot 20-70°C za použití senzoru DG41-Ti. Jako etalony byly použity oleje s různou viskozitou: základový olej PAO4, tlumičový olej SAE 10W a dva převodové oleje – monográdní SAE 90 a multigrádní SAE 80W-140. Všechny oleje vykazovaly vlastnosti newtonských kapalin (lineární závislost smykového napětí na smykovém spádu), takže mohla kalibrace reometru proběhnout v širokém spektru provozních rychlostí.



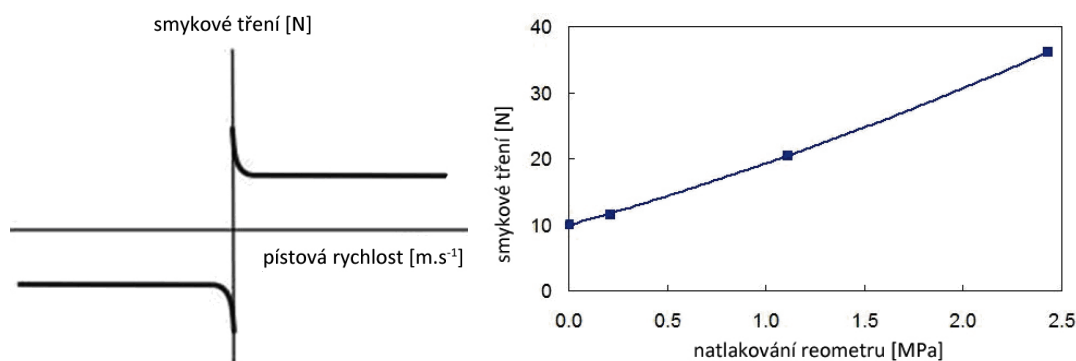
Obr. 5.24 (a) Viskozitní křivky etalonových olejů; (b) rotační viskozimetr RotoVisco od firmy Haake

Z průběhu naměřených viskozit (obr. 5.24a) je vidět, že hodnoty viskozity naměřené na reometru (body) a na viskozimetru RotoVisco (křivky) jsou v zákrytu.

5.3.5 Vnitřní tření reometru

Přesnost měření chování MR kapaliny by mohla být ovlivněna vnitřním třením reometru. Je tedy nutné tento vliv vyčíslit, aby mohla být naměřená data vhodně korigována. Vnitřní tření reometru způsobuje především tření ucpávky pístnice, tření pístu o stěnu hydraulického válce a tření těsnění plovoucího pístu. Charakter smykového tření je na obr. 5.25a. Průběh smykového tření je možné rozdělit na statickou a dynamickou složku. Vybrané body F - v charakteristiky jsou vždy při nulovém zrychlení (viz. kap. 5.3.3), tj. při maximální pístové rychlosti v rámci jednoho zdvihu pulsátoru. Je tedy možné statickou složku tření zanedbat a uvažovat pouze dynamickou složku tření. Bylo zjištěno, že tření ucpávky je závislé na vnitřním přetlaku reometru.

Kalibrační měření bylo tedy rozšířeno o měření této závislosti (obr. 5.25b). Vnitřní tlak dusíku se vlivem teplotní roztažnosti během měření mění. Protože je ale tento tlak ve viskozimetru trvale monitorován, není problém provádět korekci. Tato korekce je důležitá pro výpočet absolutní hodnoty meze kluzu. Pro trvanlivostní testy, které mají srovnávací charakter, by nebyla nutná.

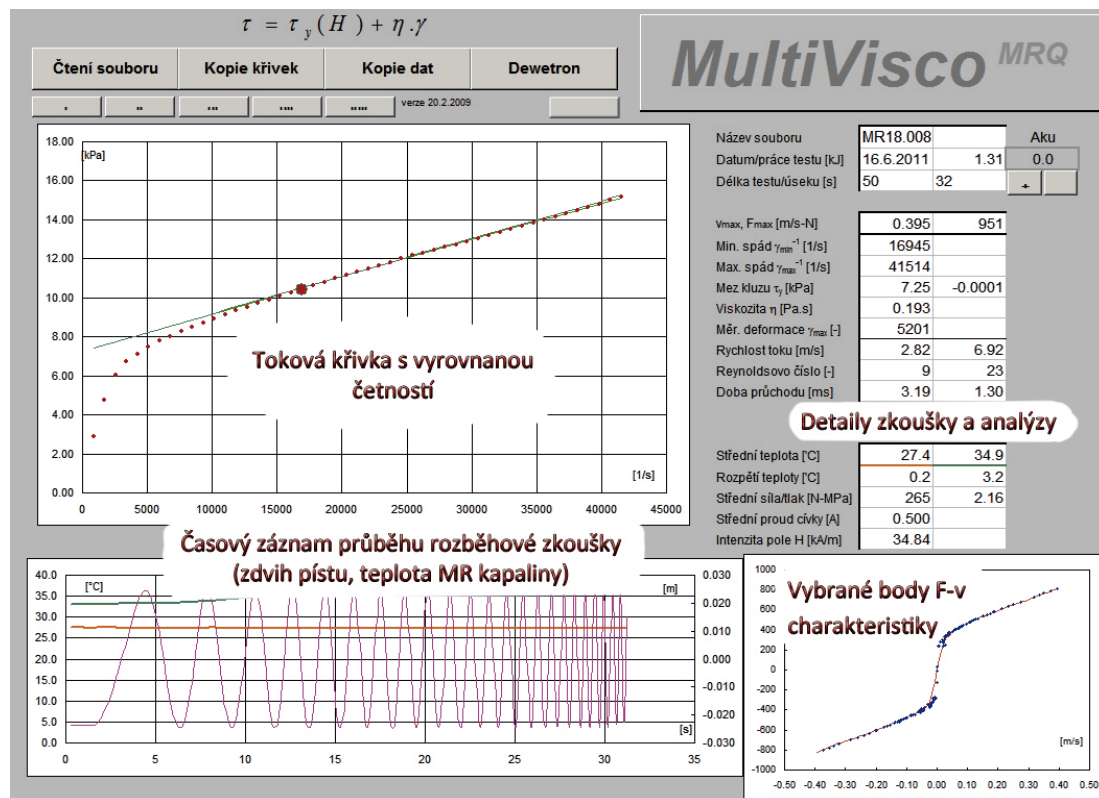


Obr. 5.25 (a) Průběh smykového tření; (b) Závislost smykového tření na vnitřním tlaku reometru

5.3.6 Maska programu MultiVisco MRQ

5.3.6

Na obr. 5.26 je maska analytického programu MultiVisco MRQ. Obrazovka je rozdělena na čtyři základní sekce. Levá horní část obrazovky zobrazuje tokovou křivku. Pomocí posuvníků se interaktivně vybírá minimální smykový spád přímkové části křivky pro regresní analýzu. Výsledek regresní analýzy je zobrazen zelenou přímkou. Pokud je přímka v dobré shodě s vyobrazenou tokovou křivkou, potom sklon přímky udává viskozitu a průsečík s y-osou mez kluzu Binghamského modelu. Pokud zelená přímka není ve shodě s průběhem tokové křivky, posuvníkem se vybere jiný interval pro hodnocení. Správný výběr intervalu smykového spádu je základním předpokladem pro získání údajů, které lze korektně porovnávat. Parametry Binghamského modelu se zobrazují vpravo v detailech zkoušky a analýzy.



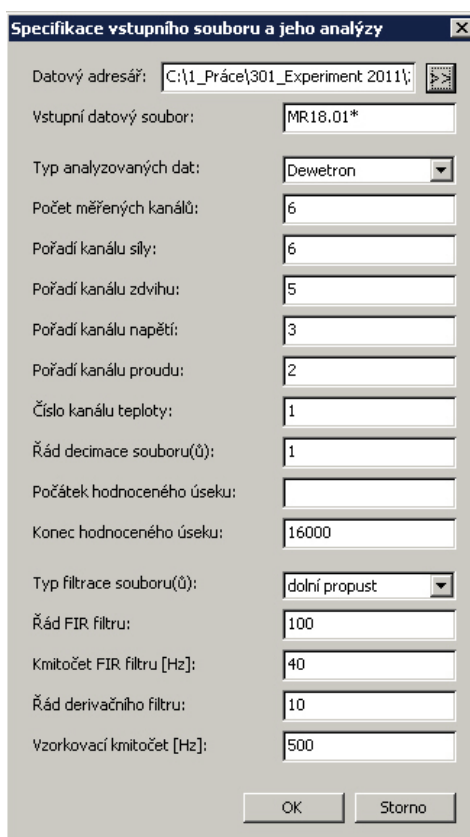
Obr. 5.26 Maska programu MultiVisco

Vpravo dole je výchozí F-v diagram již po vyfiltrování pomocí výběrových kritérií (max. zrychlení, interval polohy pístu, časový úsek měření). Tento diagram je důležitý pro kontrolu naměřených dat. Např. při měření v aktivovaném stavu při proudu 2A se MR kapalina rychle ohřívá. Tento ohřev je výraznější při vyšších rychlostech a v této části diagramu se projevuje poklesem síly. Pokud je tento pokles viditelný, je nutné zkracovat interval o vyšší rychlosti až do té doby, kdy pokles síly nebude znatelný. Pomocným údajem je hodnota rozpětí teploty Δt v detailech zkoušky a analýzy (vpravo). Vlevo dole je časový záznam zdvihu pístu reometru a průběh teploty měřený na pístnici a pomocí odporu cívky. Právě průběh teploty ukazuje, kdy došlo k výraznému zvýšení teploty a pomáhá při výběru vhodného časového úseku pro analýzu. V detailech zkoušky a analýzy jsou tyto důležité údaje:

- maximální pístová rychlost
- maximální síla
- maximální a minimální smykový spád (min. je dán polohou posuvníku)
- parametry Binghamského modelu – mez kluzu a viskozita
- min. a max. rychlost toku (min. je dán polohou posuvníku)
- min. a max. Reynoldsovo číslo (min. je dán polohou posuvníku)
- doba průchodu MR kapaliny aktivní zónou MR ventilu
- střední teplota pístnice a cívky

- rozpětí teploty pístnice a cívky
- budící proud cívky a odpovídající intenzita mag. pole
- umožněná energie během rozběhové zkoušky a její sumace s předešlými zkouškami

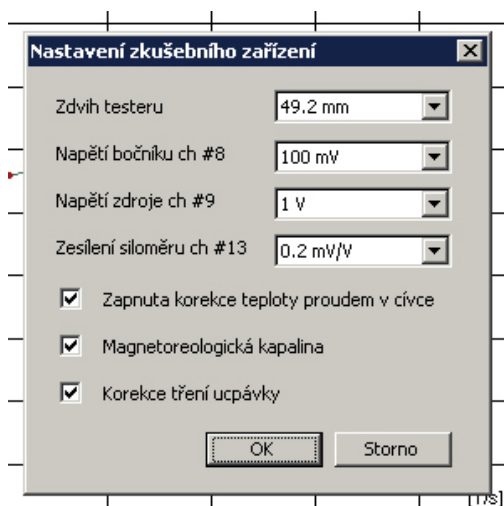
Dialogové okno „Čtení souboru“ (obr. 5.27) slouží k výběru analyzovaného souboru, k definování pořadí jednotlivých měřených kanálů ve zdrojovém souboru, řádu decimace, počátku a konce hodnoceného časového úseku zkoušky, zadání typu filtrace, řádu a frekvence filtru a k zadání vzorkovací frekvence měřeného souboru.



Parametr	Hodnota
Datový adresář:	C:\1_Práce\301_Experiment 2011\
Vstupní datový soubor:	MR18.01*
Typ analyzovaných dat:	Dewetron
Počet měřených kanálů:	6
Pořadí kanálu síly:	6
Pořadí kanálu zdvihu:	5
Pořadí kanálu napětí:	3
Pořadí kanálu proudu:	2
Číslo kanálu teploty:	1
Řád decimace souboru(ů):	1
Počátek hodnoceného úseku:	
Konec hodnoceného úseku:	16000
Typ filtrace souboru(ů):	dolní propust
Řád FIR filtru:	100
Kmitočet FIR filtru [Hz]:	40
Řád derivačního filtru:	10
Vzorkovací kmitočet [Hz]:	500

Obr. 5.27 Dialogové okno pro načtení analyzovaného souboru

Protože program MultiVisco pracuje se zdrojovými daty v binární podobě, je nutné před načtením dat zadat údaje o nastavení zesilovacích modulů analyzátoru a o zdvihu pulsátoru. K tomu slouží dialogové okno vyvolané tlačítkem Dewetron viz. obr. 5.28. Navíc je zde možnost vypnout/zapnout korekci teploty od procházejícího proudu v cívce (viz. kap. 5.1.4), vypnout/zapnout korekci tření ucpávky a vypnout/zapnout korekci vlivu rozptylového magnetického toku v pístu (viz. kap. 5.1.5 a kap. 5.3.2) zatržítkem Magnetoreologická kapalina.

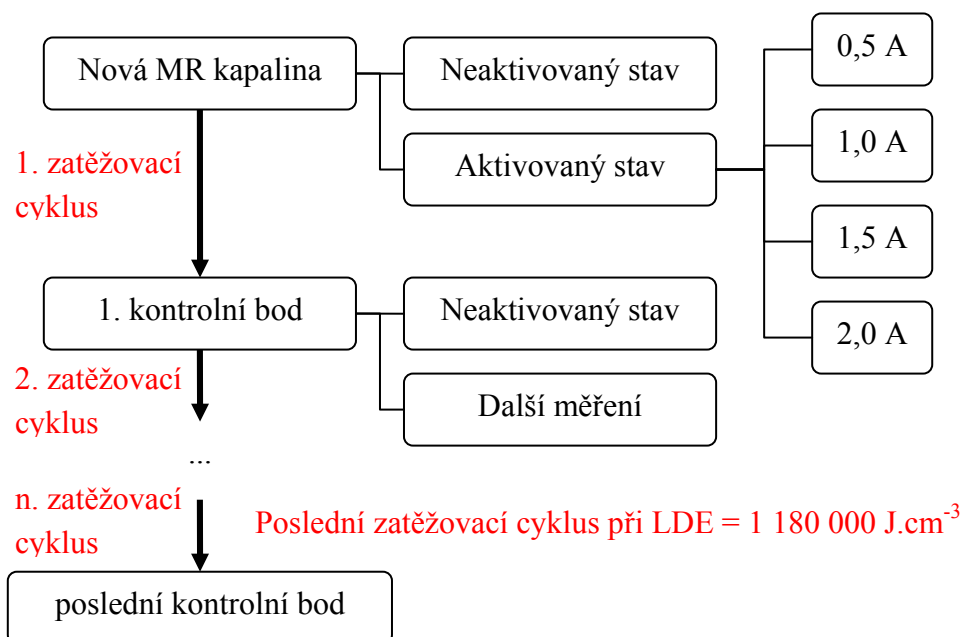


Obr. 5.28 Dialogové okno pro nastavení zesilovacích modulů Dewetronu

Tlačítko „Kopie křivek“ slouží ke vložení datové řady tokové křivky do clipboardu počítače. Tlačítko „Kopie dat“ uloží do clipboardu veškeré údaje o zkoušce a analýze. Pomocí těchto údajů lze opětovně načíst soubor s předchozím nastavením zkoušky a kalibracemi a provést analýzu se stejnými výsledky.

5.4 Metodika měření a vyhodnocení

Základní schéma, podle kterého probíhalo zatěžování MR kapaliny, je na obr. 5.29. Na začátku byla MR kapalina proměřena v aktivovaném i neaktivovaném stavu, aby bylo možné v případě potřeby kdykoliv porovnat v průběhu trvanlivostní zkoušky aktuální stav s počátečním stavem.



Obr. 5.29 Diagram průběhu životnostní zkoušky

Obecně lze měření v průběhu experimentu rozdělit na dva základní typy:

- rozběhová zkouška, kdy se měří data za účelem získání tokové křivky
- měření během zatěžování pro kontrolu stavu MR kapaliny a zatěžovacích podmínek

Pro každý typ měření byla zavedena určitá pravidla z důvodu zajištění stejných podmínek během měření nebo pro zajištění zdárného průběhu experimentu dle zadání.

5.4.1 Rozběhová zkouška

5.4.1

Pravidla pro rozběhové zkoušky platila při měření nové MR kapaliny i pro měření v jednotlivých kontrolních bodech. Před každým blokem měření rozběhových zkoušek byla dodržována následující pravidla:

- kontrola polarit napájení pístu
- kontrola polarit napětí cívky a napětí na bočníku v analyzátoru Dewe – napětí vždy kladné
- natlakování systému na 3MPa v poloze pístu v dolní úvrati
- prostor reometru naplněn chladicí vodou (okruh uzavřen/otevřen dle aktivace a teploty MR kapaliny)
- zápis teploty okolí a nastavení zesilovacích modulů včetně frekvence a použitého typu filtrace
- zapojení napájení měřícího řetězce do elektrického obvodu, který není galvanicky spojen s obvodem, u kterého by hrozila indukce napětí od okolních zařízení

Před každou rozběhovou zkouškou byla dodržována tato pravidla:

- naolejování pístnice – snížení statického tření ucpávky v úvratích reometru
- nastavení klikového mechanismu do dolní úvrati

Dále se metodika lišila v případě měření MR kapaliny v aktivovaném a neaktivovaném stavu:

a) aktivovaný stav

V aktivovaném stavu byla MR kapalina měřena při proudech 0,5A, 1A, 1,5A a 2A. Důležité bylo, že magnetický obvod reometru byl při každém měření v aktivovaném stavu zmagnetován na hodnotu odpovídající 2A, což je maximální provozní proud.

Tím bylo zaručeno, že remanentní magnetismus měl vždy stejnou hodnotu viz. kap. 5.1.5. Při měření při proudech 1,5 a 2A byl okruh chlazení otevřen, aby docházelo k soustavnému chlazení MR kapaliny během zkoušky. Průtok chladicí vody okruhem byl 0,120 ml/min. Teplota vody byla regulována dle měřené teploty. Pro teploty 40°C a více byla do okruhu pouštěna pouze teplá voda (teplota cca 40°C), aby nedocházelo k přílišnému chlazení MR kapaliny.

b) neaktivovaný stav

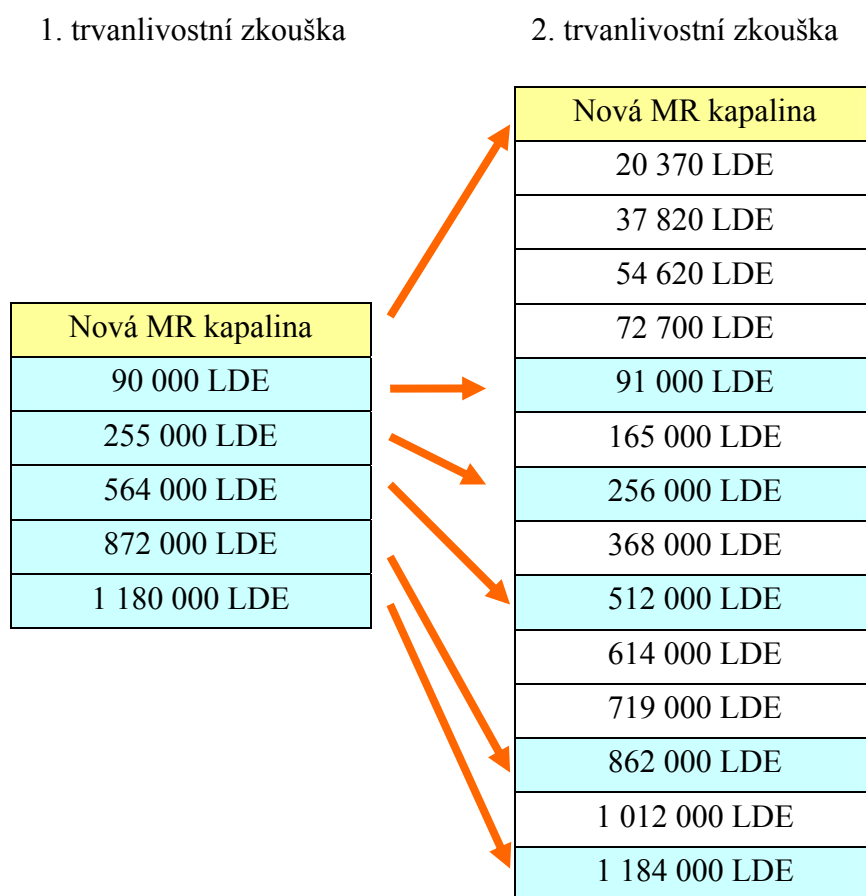
V neaktivovaném stavu byla MR kapalina měřena vždy odmagnetovaná. Odmagnetování probíhalo střídavým proudem o frekvenci 50Hz a to postupným snižováním amplitudy z 2,5A na 0A. Doba celého procesu odmagnetování byla cca 1min. Tento stav měření MR kapaliny je označován jako neaktivovaný, ale v případě že by cívkou neprocházel žádný proud, nemohla by být měřena teplota metodou měření odporu cívky. Proto byl do cívky pouštěn proud 50mA, který prakticky neovlivňoval neaktivovaný stav MR kapalin. Tento proud byl do cívky puštěn až po odmagnetování. Při měření v neaktivovaném stavu byla v chladicím okruhu voda, ale okruh byl uzavřen.

MR kapalina byla měřena při rozběhových zkouškách v intervalu teplot 20-75°C. Byly určeny tyto charakteristické teploty, při kterých se MR kapalina měřila: 20 až 28°C, 35°C, 40°C, 60°C a 75°C. Na každé teplotě byla provedena 3 měření, aby se ověřila opakovatelnost naměřených dat. Vlivem mechanického zatížení se MR kapalina při rozběhové zkoušce zahřívala, takže většinou každé další měření mělo o něco vyšší teplotu. Zvláště v aktivovaném stavu při vypnutém oběhu chlazení (proudy 0,5 a 1A). Aby ohřev nebyl tak výrazný, byla u prvního ze série tří měření maximální pístová rychlost 0,18 m.s⁻¹, zejména u nízkých teplot. U dalších dvou měření byla dosahována max. pístová rychlost 0,35-0,40 m.s⁻¹. V neaktivovaném stavu se musela MR kapalina mechanicky zahřívat na vyšší teploty. Vzorkovací frekvence při rozběhové zkoušce byla 500Hz. Disipovaná energie během rozběhových zkoušek a během zahřívání MR kapaliny byla zaznamenávána a evidována v historii zatěžování MR kapaliny.

5.4.2 Měření během zatěžování

Před každým zatěžovacím cyklem byl systém natlakován na 3 MPa v poloze pístu, který odpovídá dolní úvrati klikového mechanismu pulsátoru. Oběh chladicí vody byl nastaven pomocí měření průtoku a to dle požadované teploty experimentu. Během zkoušky muselo být kontrolováno uchycení reometru v pružných členech, protože zde docházelo k vymačkávání a vzniku vůlí. Zatěžování MR kapaliny probíhalo při konstantní maximální pístové rychlosti 0,36 m.s⁻¹ a budícím proudem cívky 2A. U

první trvanlivostní zkoušky délka jednotlivých zatěžovacích cyklů odpovídala délce pracovní doby, tj. 8-14 hodin, z důvodu nutných zásahů do regulace teploty a udržení teploty MR kapaliny na požadované hodnotě. Kontrolní body druhé trvanlivostní zkoušky byly nastaveny tak, aby vždy odpovídaly kontrolním bodům první zkoušky a navíc byly mezi ně vloženy další kontrolní body, aby byla přesněji popsána změna chování MR kapaliny. S ohledem na výsledky byl u druhé zkoušky již první (relativně krátký) zatěžovací cyklus rozdělen na čtyři menší. Na obr. 5.30 jsou znázorněny kontrolní body, tak jak se jich podařilo dosáhnout.



Obr. 5.30 Kontrolní body obou trvanlivostních zkoušek

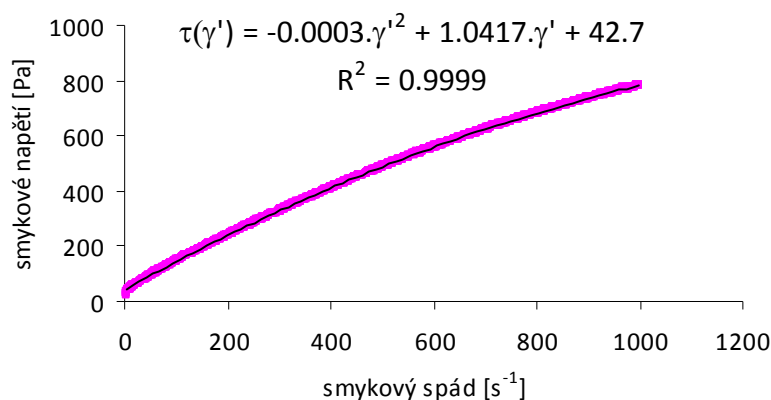
Celková čistá doba první trvanlivostní zkoušky byla 112 hodin, u druhé zkoušky to bylo 119 hodin.

5.4.3 Metodika vyhodnocení tokových křivek

Pro vyhodnocení tokových křivek je nejdůležitější výběr vhodného intervalu smykového spádu. Při hodnocení je potřeba brát v úvahu tyto dvě základní otázky:

- Je možné pro daný interval smykových spádů použít k popisu chování MR kapaliny Binghamský model?
- Jaký bude vliv na tvar tokové křivky nárůst teploty MR kapaliny v důsledku rozběhové zkoušky?

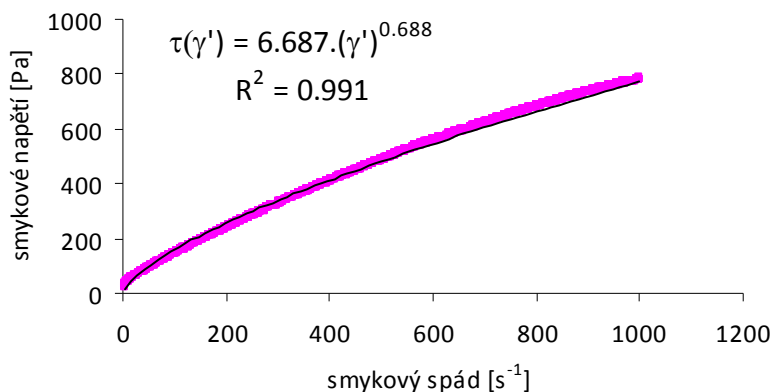
Metodický pokyn pro výběr vhodného intervalu smykového spádu podává následující rozbor. Na obr. 5.31 je naměřená toková křivka na rotačním viskozimetru Roto-Visco, který byl použit při kalibraci nového *Slit-flow reometru*. Maximální smykový spád je 10^3 s^{-1} , což je proti reálným hodnotám běžně dosahovaných smykových spádů v lineárním MR zařízení velice nízká hodnota. Naměřená data jsou velice přesně proložena polynomicou křivkou regrese. Poslední člen rovnice regrese na obrázku je hodnota při nulovém smykovém spádu, což je mez kluzu a tato hodnota je 42,7 Pa. Na naměřených datech je zřetelné smykové řidnutí MR kapaliny. Zdánlivá viskozita s narůstajícím smykovým spádem klesá. Tento pokles by měl ale postupně slábnout tak, jak dochází vlivem rychlejšího toku MR kapaliny k uspořádávání částic (viz. kap. 2.2). Tzn., že při větším smykovém spádu by mělo být smykové řidnutí méně výrazné.



Obr. 5.31 Naměřená toková křivka a její polynomická regresní křivka (nízké smykové spády)

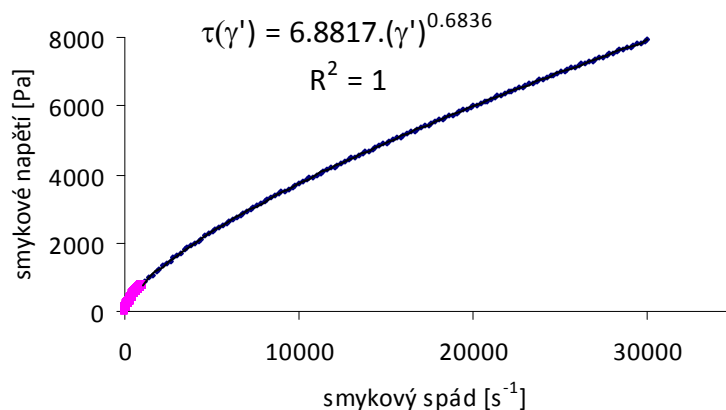
Pro odhad chování MR kapaliny při vysokých smykových spádech (do $3,5 \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}$) je nutné provést extrapolaci. Pro extrapolaci je ale polynom naprosto nevhodný, protože nevystihuje trend chování MR kapaliny mimo naměřený interval hodnot. Na dalším grafu (obr. 5.32) jsou data kvůli extrapolaci proložena mocninnou regresní křivkou. Rovnice odpovídá Herschel-Bulkleyovu modelu s členem $\tau_0 = 0$, tj. bez meze kluzu. Hodnota spolehlivosti proložené křivky je blízka 1, ale v grafickém

zobrazení je vidět mírná odchylka od naměřených hodnot, takže i reálný průběh tokové křivky bude mírně odlišný. Nicméně je to nejvhodnější způsob proložení naměřených dat z hlediska budoucí extrapolace a odhadu chování MR kapaliny při vysokých smykových rychlostech.



Obr. 5.32 Naměřená toková křivka a její mocninná regresní křivka (nízké smykové spády)

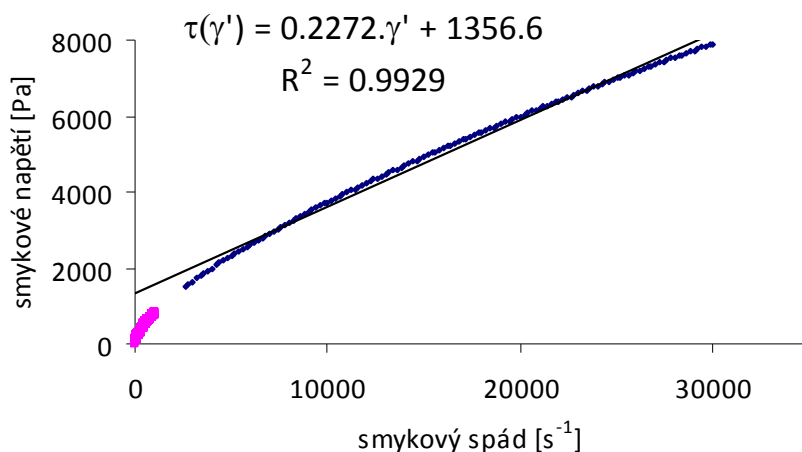
Graf na obr. 5.33 ukazuje tvar extrapolované křivky do hodnoty smykového spádu 35 000 s⁻¹, což je hodnota, která odpovídá smykovému spádu při vysokém zatížení reálného hydraulického tlumiče.



Obr. 5.33 Extrapolovaná toková křivka z naměřených dat (fialově)

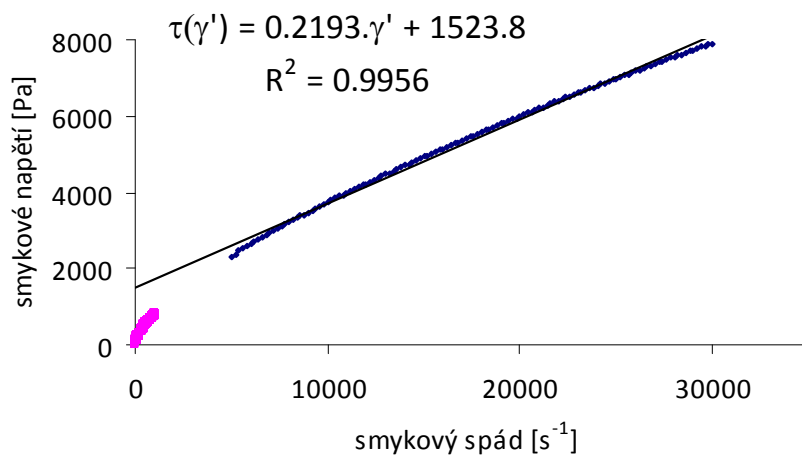
Vyhodnocení tokové křivky bylo shora omezeno již zmíněnou hodnotou 35 000 s⁻¹, zespona potom muselo být omezeno na hodnotu 10 000 s⁻¹. Tato hodnota je odvozena z provozních parametrů navrhovaného experimentálního zařízení pro měření tokových křivek MR kapaliny při vysokých smykových spádech (viz. kap. 5). Na obrázcích 5.34 až 5.37 je toková křivka proložena přímkou se zřetelem na uvažované použití Binghamského modelu viskoplastické kapaliny. Postupně se na tomto sledu obrázků zmenšuje interval smykového spádu hodnocené křivky. První graf zobrazuje

extrapolovanou křivku v intervalu 2 600 až 35 000 s⁻¹. Už toto první proložení ukazuje, že bez bodů smykového napětí při nízkých smykových spádech je mez kluzu (2. člen rovnice přímky – 1356,6 Pa) naprosto odlišná od naměřených dat na rotačním viskozimetru. Z grafu je zřejmé, že pro takto široký interval smykového spádu není přímka příliš přesným proložím.



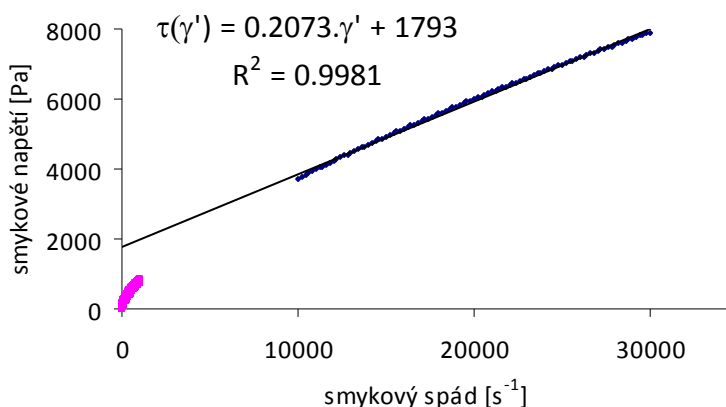
Obr. 5.34 Extrapolovaná toková křivka v intervalu 2 600 až 35 000 s⁻¹

Na obr. 5.35 je regrese tokové křivky v intervalu 5 000 až 35 000 s⁻¹. Vizuálně i dle hodnoty spolehlivosti R^2 je toto proložení přesnější, nicméně hodnota meze kluzu se mění a je vyšší než v předchozím případě.



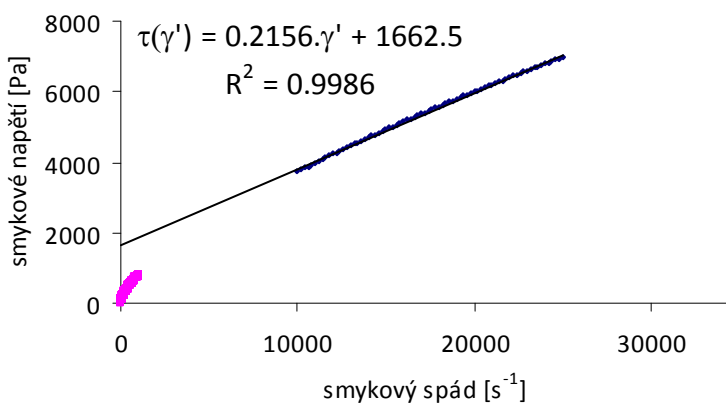
Obr. 5.35 Extrapolovaná toková křivka v intervalu 5 000 až 35 000 s⁻¹

Obrázek 5.36 ukazuje proložený interval 10 000 až 35 000 s⁻¹:



Obr. 5.36 Extrapolovaná toková křivka v intervalu 10 000 až 35 000 s⁻¹

Hodnota 4.10⁴ s⁻¹ je maximální hodnota smykového spádu, do které reálně probíhalo měření dat. Vyhodnocení neaktivovaného stavu MR kapaliny ale probíhalo v intervalu 10 000 – 28 000 s⁻¹, v aktivovaném stavu dokonce v ještě užším intervalu 10 000 – 25 000 s⁻¹ (obr. 5.37), kvůli přílišnému ohřevu MR kapaliny při vysokých rychlostech u nízkých teplot.



Obr. 5.37 Extrapolovaná toková křivka v intervalu 10 000 až 25 000 s⁻¹

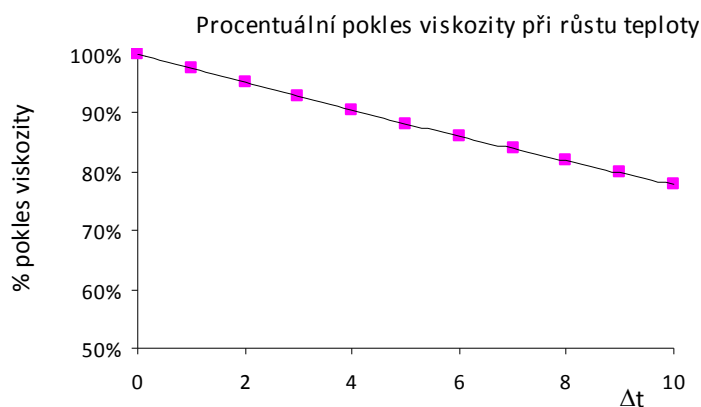
Tato série grafů ukazuje, že i přes působení smykového řídnutí, lze Binghamský model použít pro popis MR kapaliny v neaktivovaném stavu pro určitý, přesně specifikovaný interval smykového spádu. V aktivovaném stavu bude mít smykového řídnutí v nízkých rychlostech menší vliv na tvar tokové křivky než ve stavu neaktivovaném, jelikož bude převládat vliv magnetických sil.

V aktivovaném stavu se při vysokých smykových spádech projevuje pokles meze kluzu vlivem rychlého průchodu MR kapaliny skrz aktivní oblast (viz. kap. 2.2). Pro horní mez intervalu smykového spádu 25 000 s⁻¹ je výrazný pokles meze kluzu vy-

loučen. Pro podobný tvar a délku aktivní oblasti u navrhovaného experimentálního zařízení, pro stejnou intenzitu magnetického pole a pro dobu prodlevy MR kapaliny v aktivní oblasti při $25\,000\text{ s}^{-1}$ je v literatuře [1] uveden pokles meze kluzu o 4% vůči počáteční hodnotě.

To, že je mez kluzu odlišná v závislosti na zvoleném intervalu naměřených bodů není na závadu. Pokud bude dodržena metodika stejného, dostatečně úzkého intervalu při vyhodnocování dat a pokud bude tento interval uveden u vyhodnocovaných dat, bude pro popis chování MR kapaliny důležitá relativní změna hodnoty meze kluzu a viskozity v průběhu zatěžování. Navíc zvolené intervaly pro aktivovaný a neaktivovaný stav leží ve spektru provozních podmínek reálných lineárních MR zařízení.

Druhá otázka, která byla položena, zní, jakým způsobem ovlivní nárůst teploty tvar tokové křivky? Jestliže byl přijat popis MR kapaliny pomocí Binghamského modelu, lze obecně rozdělit celkové smykové napětí na součet dvou napěťových složky – viskozitní a od meze kluzu. Bude-li pomocí experimentu potvrzena hypotéza o teplotní nezávislosti meze kluzu, bude teplota ovlivňovat pouze viskozitní složku tokové přímky. Dle změřené teplotní závislosti viskozity v neaktivovaném stavu byl proveden rozbor poklesu viskozity při nárůstu teploty o Δt viz. obr. 5.38. Při exponenciální závislosti viskozity na teplotě je tento pokles lineární. Pokud teplota naroste o 2°C , klesne viskozita na 95% své počáteční hodnoty, při růstu teploty o 3°C poklesne viskozita na 93%. Je potřeba si uvědomit, že tento pokles nastane jen v malé části tokové křivky (při vysokých smykových spádech) a tím pádem vliv tohoto poklesu viskozity na prokládanou regresní přímku nebude tak markantní. Metodický pokyn pro analýzu tokové křivky byl zvolen tak, že maximální nárůst teploty v hodnoceném úseku může být maximálně o 3°C . Toto kritérium omezuje analýzu a výběr intervalu smykových spádů zejména v aktivovaném stavu pro 1,5 a 2A.



Obr. 5.38 Procentuální pokles viskozity při růstu teploty o Δt

5.5 Měření MR kapaliny v nízkých smykových spádech

Reologické vlastnosti MR kapaliny v neaktivovaném stavu v nízkých smykových spádech byly měřeny na rotačním viskozimetru RotoVisco (obr. 5.39a). Tento viskozimetr umožňuje měřit smykový spád do $1\,200\text{ s}^{-1}$. Při použití válcového senzoru Z20 DIN Ti (obr. 5.39b) je možné měřit smykový spád pouze do $1\,000\text{ s}^{-1}$. Při vyšších rychlostech dojde totiž k překročení maximálního kroutícího momentu viskozimetru, který slouží k výpočtu smykového napětí. Viskozimetr RotoVisco neumožňuje měření v magnetickém poli, ale je možné jej použít pro měření MR kapaliny v neaktivovaném stavu. Viskozimetr je vybaven oběhovým vyhříváním Haake DC50. Ovládání viskozimetru bylo realizováno pomocí přenosného počítače přes sériové rozhraní RS232. Výstupem měření byla teplotní závislost viskozity a toková křivka při rozběhovém testu (sweepu) z 0 do 1000 s^{-1} s dobou měření 100s.



Obr. 5.39 (a) Rotační viskozimetr RotoVisco s chlazením; (b) měřící senzor Z20 DIN Ti s kalíškem

Při měření tepelné degradace byla MR kapalina temperována přímo v měřícím kalíšku, aby nedocházelo ke zbytečnému promíchání při její manipulaci. K měření byla použita nová, mechanicky, tepelně ani chemicky nijak nezatížená MR kapalina. U každého vzorku bylo měření opakováno třikrát. První měření představovalo nepromíchaný vzorek. Každé další měření představovalo vzorek s vyšším stupněm promíchání. Měření probíhalo za těchto podmínek:

- teplota: 22°C
- rozsah smykového spádu: $0\text{--}1000\text{ s}^{-1}$
- dynamika sweepu: $1\text{ s}^{-1}/1\text{ s}$
- typ senzoru: Z20 Ti DIN

6. ANALÝZA A INTERPRETACE ZÍSKANÝCH ÚDAJŮ

6.1 Parametry nové MR kapaliny

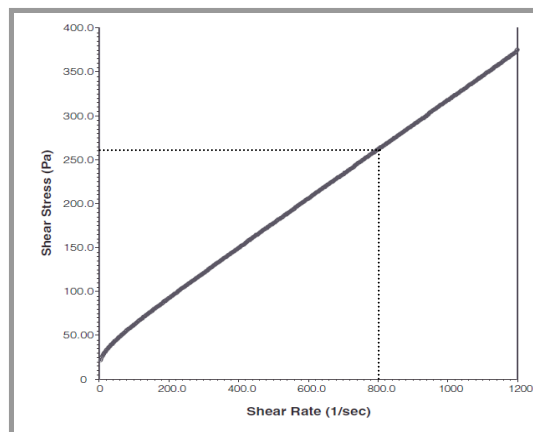
Znalost parametrů nové MR kapaliny (tj. nezatěžované tepelně, mechanicky ani chemicky) je důležitá pro pozdější porovnání změny stavu MR kapaliny během trvanlivostních zkoušek. Parametry nové MR kapaliny byly měřeny v rozsahu nízkých (RotoVisco) i vysokých smykových spádů (Dolfus). Pro trvanlivostní test byla použita kapalina od firmy *Lord Corporation* s obchodním označením MRF 140CG.

6.1.1 Parametry udávané výrobcem

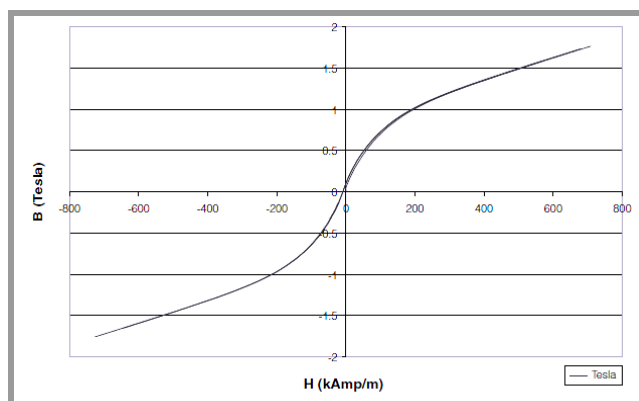
Výrobce udává tyto parametry MR kapaliny:

Tab. 6.1 Hodnoty MRF 140CG udávané výrobcem

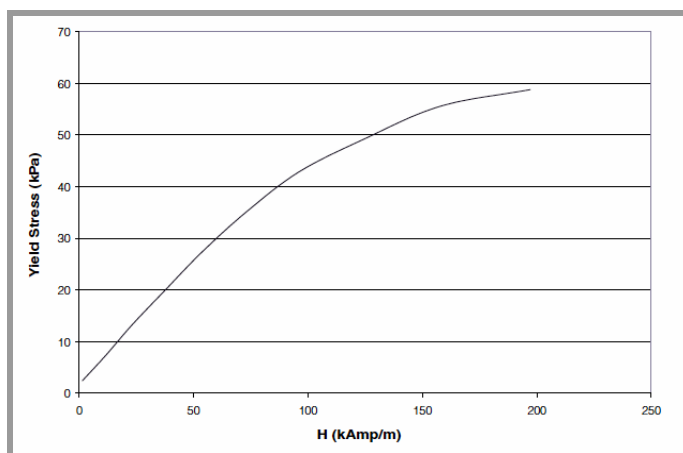
Viskozita při 40°C (při 800-1200 s ⁻¹)	0,280±0,070 Pa.s
Provozní teplota	-40 až 130°C
Velikost částic	1-20 μm
Hustota	3,54-3,74 g.cm ³
Hmotnostní poměr Fe částic	85,44%
Doba odezvy	< 5ms



Obr. 6.1 Toková křivka MRF 140CG v neaktivovaném stavu



Obr. 6.2 B-H křivka sycení MRF 140CG



Obr. 6.3 Závislost meze kluzu na intenzitě magnetického pole

6.1.2 Ověření složení MR kapaliny

6.1.2

a) Nosná kapalina

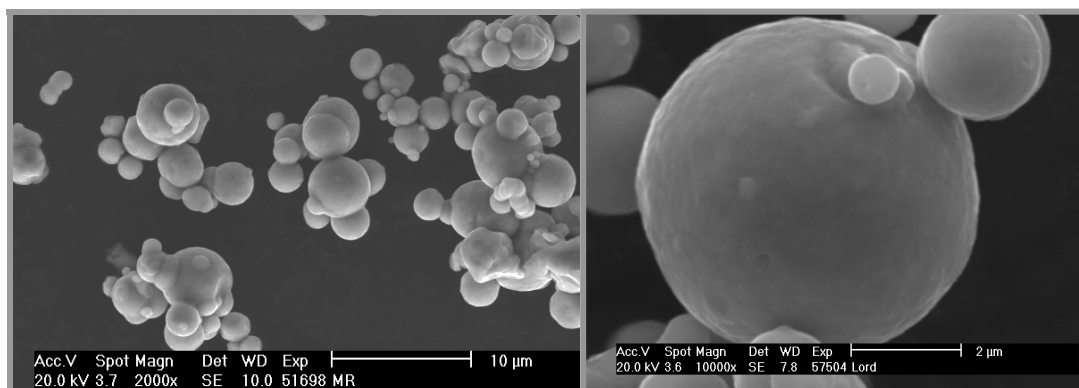
Původ nosné složky MR kapaliny byl ověřen pomocí FTIR analýzy (*Fourier transform infrared spectroscopy*)* v ALS Laboratory Group. Dle infračerveného spektra (Příloha II) odpovídá nosná složka polyalfaolefinu, což je syntetický uhlovodík s vysokou tepelnou i oxidační stabilitou.

b) Velikost a složení železných částic

Zjištění přesné velikosti a složení Fe částic bylo provedeno na elektronovém mikroskopu Philips XL30 – EDAX. Velikost částic byla určována z několika náhodně vybraných snímků při 2 000 násobném zvětšení. Průměrná velikost částic byla urče-

* Tato metoda je vhodná pro zjišťování struktury organických sloučenin. V důsledku absorpce infračerveného záření při průchodu vzorkem dochází ke změnám rotačně vibračních energetických stavů molekuly v závislosti na změnách dipólového momentu molekuly. Analytickým výstupem měření je infračervené spektrum, které je grafickým zobrazením funkční závislosti energie na vlnové délce (resp. vlnočetu) dopadajícího záření. Pomocí Fourierovy transformace je možné pozorovat píky, které odpovídají přesně nejen chemickému, ale také strukturálnímu složení sloučenin.

na jako 1,89 μm . Pomocí metody EPMA (*Electron Probe Micro-analysis*)^{*} bylo určeno chemické složení mikročástic. Částice se skládají z 99,59 hm.% z čistého železa. Zbytek (0,41 hm.%) je Si, což může představovat pozůstatek tixotropního plniva *siliky* (SiO_2). Přesný popis SEM analýzy viz. Příloha III.



Obr. 6.4 Snímek Fe částic z rastrovacího elektronového mikroskopu - zvětšení: (a) 2000x; (b) 10 000x

c) Poměrné zastoupení jednotlivých složek v MR kapalině

Z hmotnosti a objemu vzorku a ze známých hustot jednotlivých složek ($\rho_{\text{Fe}} = 7860 \text{ kg.m}^{-3}$ a $\rho_{\text{olej}} = 846 \text{ kg.m}^{-3}$) byla vypočítána hustota vzorku ($\rho_{\text{MR}} = 3690 \text{ kg.m}^{-3}$) a hmotnostní podíl železných částic v MR kapalině (86,36 hm. %). Objemový podíl železných částic je 40,52%. Tyto výsledky potvrzují údaje od výrobce.

6.1.3 Sedimentace MR kapaliny

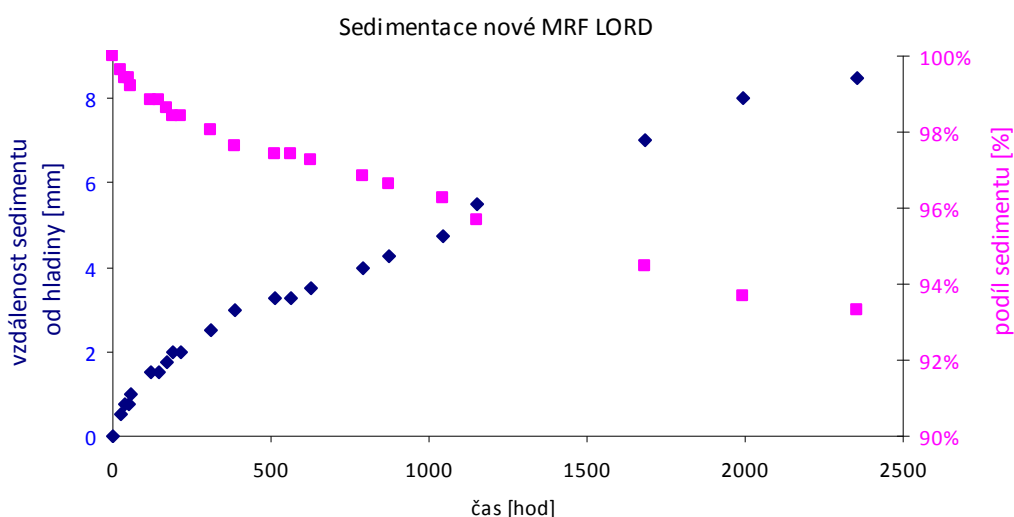
MR kapalina obsahuje 86 hm. % mikročástic železa. Bez příslušných aditiv by se v MR kapalině rychle vytvořil zřetelný sediment. Na obr. 6.5b je namíchaná MR kapalina se stejným hmotnostním poměrem Fe částic a o stejné velikosti těchto částic jako má testovaná MR kapalina LORD 140CG. Již po dvou hodinách se téměř oddělily železné částice od nosné kapaliny a sedimentovaly na dně kádinky. Zatímco na obr. 6.5a je MR kapalina po sedimentaci trvající 2 355 hodin. Výsledky sedimentace jsou v grafu na obr. 6.6. Na konci měření tvořil sediment 93,5% z celkové objemu MR kapaliny. Tento výsledek potvrzuje vysokou sedimentační stabilitu této kapaliny, které může být dosaženo pouze výraznou aditivací. Pro zamezení sedimentace se nejčastěji používají jako aditivum disperzanty (tenzidy z něm.)^{**}.

^{*} Univerzální elektronová mikrosonda (EPMA) v sobě spojuje elektronový mikroskop a RTG spektrometr. Tato metoda slouží ke kvantitativnímu studiu chem. složení materiálů v mikroměřítku s přesností řádově 0,01 hm.%.

^{**} Molekula disperzantů má jeden konec polární a jeden konec nepolární – dobře rozpustný v oleji. Konec s polární vazbou se snadno přichytí k částici. Částice obalená disperzanty se potom nemůže shlukovat a její sedimentace je výrazně omezena.



Obr. 6.5 Sediment a separovaná nosná kapalina (a) MRF 140CG; (b) MR kapalina bez aditiv za 2 hod



Obr. 6.6 Výsledky sedimentace nové kapaliny MRF 140CG (růžové body – % podíl sedimentu)

6.1.4 MR kapalina v nízkých smykových spádech

6.1.4

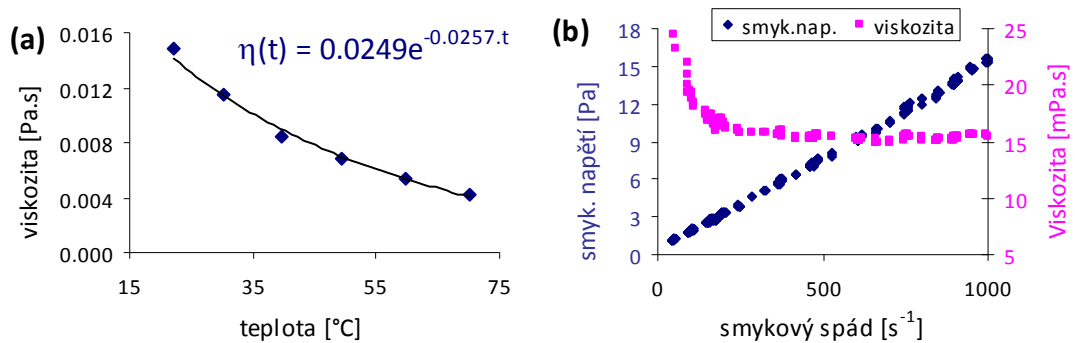
V nízkých smykových spádech byla proměřena zvlášť nosná kapalina a zvlášť MR kapaliny samotná.

a) Nosná kapalina

Pro měření byla odebrána nosná kapalina, která byla separovaná od sedimentované vrstvy MR kapaliny. Zbarvení nosné kapaliny je hnědé, zápach kapaliny slabě kyselý (obr. 6.7). Teplotní závislost viskozity nosné kapaliny je na obr. 6.8a. Obr. 6.8b dokazuje, že nosná kapalina se chová jako Newtonská kapalina, protože smykové napětí roste lineárně s rostoucím smykovým spádem. Rovnici teplotní závislosti viskozity lze tedy použít pro libovolný smykový spád.



Obr. 6.7 Odebraná nosná kapalina



Obr. 6.8 Nosná kapalina (a) závislost viskozity na teplotě při $\dot{\gamma}=800 \text{ s}^{-1}$; (b) sweep při teplotě 23°C

Teplotní závislost viskozity nosné kapaliny lze popsat exponenciální rovnicí:

$$\eta_{NK}(t) = 0,0249 \cdot e^{-0,0257 \cdot t} \quad (26)$$

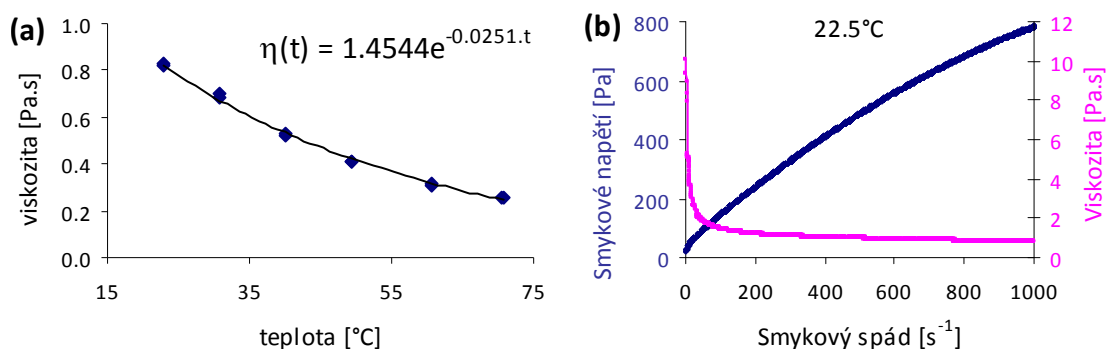
Hodnota viskozity je oproti viskozitě MR kapaliny (níže) velice nízká. Z rozběhového testu je patrné, že po překročení velmi malého počátečního napětí se kapalina chová dle modelu Newtonské kapaliny.

b) MR kapalina

Teplotní závislost viskozity MR kapaliny lze popsat exponenciální rovnicí (obr. 6.9a):

$$\eta_{MR}(t) = 1,4544 \cdot e^{-0,0251 \cdot t} \quad (27)$$

Porovnáním koeficientů u proměnné t lze dokázat, že pro teplotní závislost viskozity nosné kapaliny a MR kapaliny platí stejný procentuální pokles s narůstající teplotou a že vyšší viskozita je tedy způsobena přítomností železných částic.



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

Rozbor rozběhové zkoušky u tokové křivky ukazuje na nízké počáteční napětí (mez kluzu) o velikosti 43Pa. Toková křivka vykazuje výrazné známky smykového řidnutí (*shear thinning*), což se také odráží na její derivaci – viskozitní křivce. Tokovou křivku lze aproximovat v daném intervalu smykového spádu (0-1000 s⁻¹) polynomičnou rovnicí 2. řádu:

$$\tau(\gamma') = 3,012 \cdot 10^{-4} \cdot \gamma'^2 + 1,042 \cdot \gamma' + 43,059 \quad (28)$$

Viskozitní křivka může být aproximována touto mocninnou rovnicí:

$$\eta(\gamma') = 6,628 \cdot \gamma'^{-0,3106} \quad (29)$$

Obě rovnice (28) a (29) platí pro teplotu 22,5°C.

Porovnání naměřených hodnot s údaji výrobce viz. tabulka 6.2:

Tab. 6.2 Porovnání naměřených hodnot s hodnotami výrobce

	Výrobce	Naměřená data
Viskozita při 40°C [Pa.s] při $\gamma=800\text{s}^{-1}$	0,280	0,533
Smykové napětí při $\gamma=800\text{s}^{-1}$ [Pa] při 40°C	260	469 (přepočítáno)
Mez kluzu $\tau(\gamma=0 \text{ s}^{-1})$ [Pa]	25 (odhad)	43,1

Rozběhový test byl měřen při teplotě 22,5°C (výrobce 40°C). Protože je změřená závislost viskozity na teplotě při smykovém spádu 800s⁻¹, lze hodnotu smykového napětí přepočítat pro teplotu 40°C:

$$\tau_{(t,\gamma')} = \eta_{MR}(t) \cdot \gamma' + \tau_0 \quad (30)$$

, kde τ_0 je poslední člen rovnice (28). Dosazením rovnice (29) získáme vztah:

$$\tau_{(t,\gamma')} = 1,4544 \cdot e^{-0,0251t} \cdot \gamma' + \tau_0 = 0,5329 \cdot 800 + 43,1 = 469,4 Pa \quad (31)$$

Z výsledků lze vyvodit závěr, že údaje poskytované výrobcem nejsou přesné.

c) Ověření výrobcem udávané provozní teploty

Výrobce udává rozsah provozních teplot -40°C až 130°C . Nedefinuje přesně stav reologických parametrů po zatížení vysokou teplotou na horní mezi provozních teplot. Z toho lze usuzovat na to, že chování MR kapaliny v tomto rozsahu teplot je beze změny. Bylo provedeno předběžné měření, kdy byla MR kapalina temperována na 150°C po dobu 2 hodin a ukázalo se, že MR kapalina výrazně změnila svoje vlastnosti (obr. 6.10a). Bylo temperováno množství 25ml MR kapaliny v 50ml kádince. Po temperaci a následném zchladnutí nevypadla MR „kapalina“ z kádinky ani po otočení kádinky dnem vzhůru. Po krátkém rozmíchání se ale MR kapalině vrátila původní konzistence (obr. 6.10b).



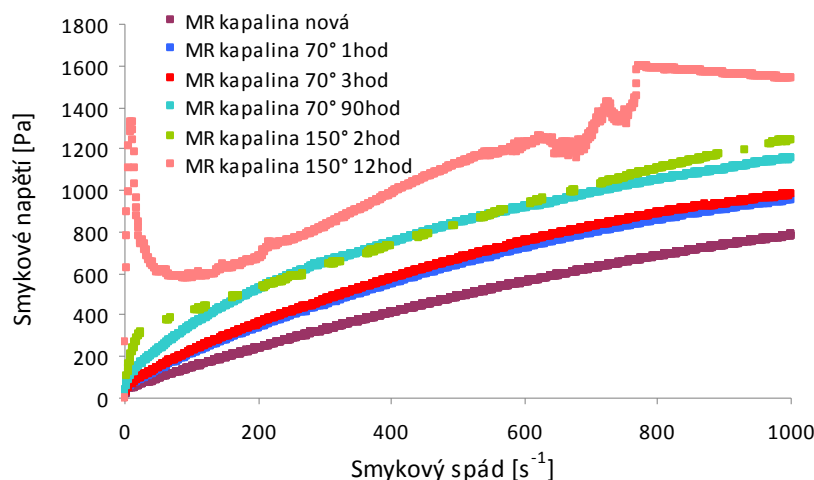
Obr. 6.10 MR kapalina 140CG (a) po temperaci na teplotě 150°C po dobu 2hod; (b) po krátkém rozmíchání

Na základě výsledků prvního měření byla provedena série měření, která měla ukázat vliv teploty a doby temperace na konzistenci MR kapaliny. Základním zdrojem dat pro hodnocení chování byly tokové křivky naměřené na RotoVisco. Vzorek byl temperován přímo v měřicím kalíšku, aby nedocházelo ke zbytečnému promíchání při jeho manipulaci. U každého vzorku bylo měření opakováno třikrát. První měření představovalo nepromíchaný vzorek. Každé další měření představovalo vzorek s vyšším stupněm promíchání.

Graf na obr. 6.11 ukazuje tokové křivky při různém tepelném zatížení - rozdílné časové a teplotní expozice. Z křivek lze vypořadovat dva základní projevy tepelného zatížení:

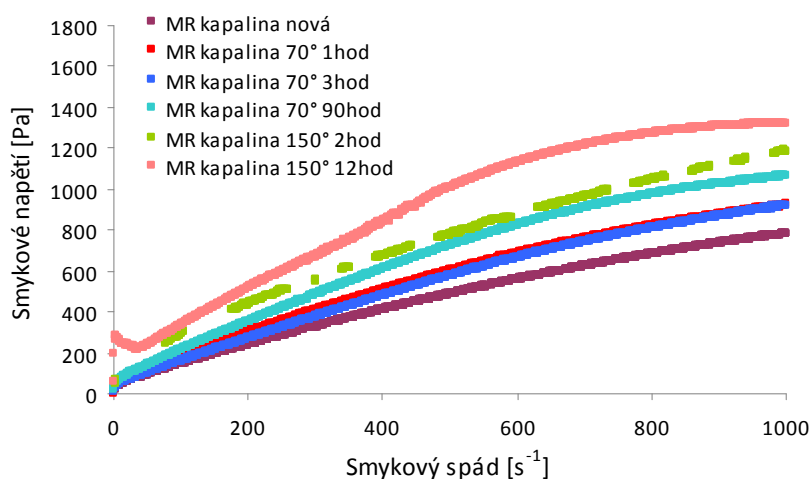
- čím delší expozice na vyšší teplotě, tím je výraznější offset tokových křivek vůči nové MR kapalině směrem k vyšším hodnotám smykového napětí
- čím vyšší teplota, tím je výraznější mez kluzu

Přestože teplota 150°C je mimo rozsah provozních teplot, lze předpokládat, že při teplotě 130°C budou projevy tepelného zatížení velice podobné.



Obr. 6.11 Tokové křivky nerozmíchaných vzorků MR kapaliny po tepelném zatížení

Teplota na 150°C po 2 hodiny (světle zelená křivka) vedla ke stavu na obr. 6.10, kdy se výrazně změnila konzistence MR kapaliny. Z tvaru tokové křivky lze usuzovat, že tuto změnu konzistence lze hodnotit jedním parametrem a to mezí kluzu. Viskozita temperované MR kapaliny je na konci měření o 35% vyšší než u nové MR kapaliny, zatímco mez kluzu vzrostla téměř 7x z hodnoty 43Pa na 292Pa. Tokové křivky při teplotaci na 70°C po dobu 1hod, 3hod a 90hod jsou značně rozdílné, ale viskozita na konci měření je téměř stejná (0,96 Pa.s, 0,98 Pa.s, 1,16 Pa.s).



Obr. 6.12 Tokové křivky 1x rozmíchaných vzorků MR kapaliny po tepelném zatížení

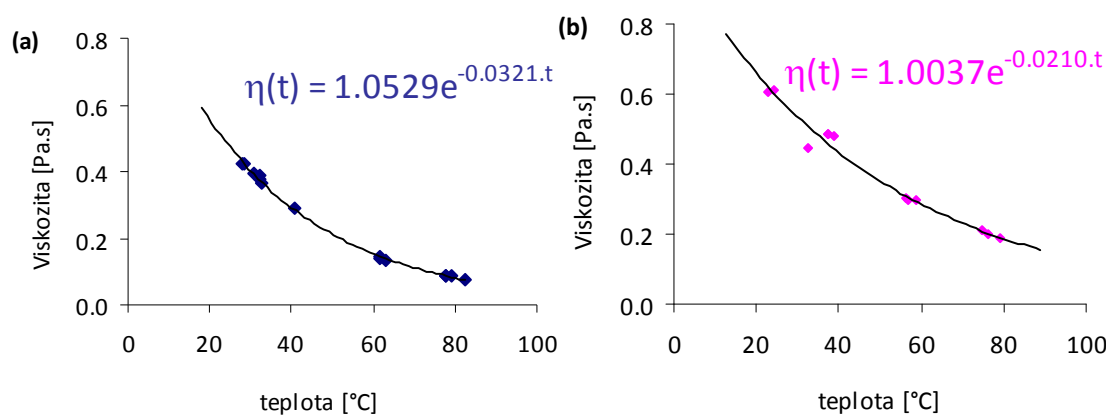
S vyšším stupněm promíchání klesaly rozdíly mezi jednotlivými tokovými křivkami (obr. 6.12), takže lze konstatovat, že změna konzistence byla pouze dočasná (podrobnější výsledky viz. Příloha IV).

6.1.5 Měření MR kapaliny ve vysokých smykových spádech

Naměřené hodnoty budou použity pro pozdější porovnání chování nové a zatěžované MR kapaliny. Na reometru Dolfus již nebyla měřena zvlášť nosná kapalina a zvlášť MR kapalina z důvodu velké spotřeby vzorku při odebrání nosné kapaliny. Důležité je porovnání naměřené viskozity a meze kluzu při nízkém a vysokém smykovém spádu a vysvětlení rozdílů.

a) Viskozita v neaktivovaném stavu

Graf na obr. 6.13a ukazuje závislost viskozity na teplotě nové MR kapaliny před první trvanlivostní zkouškou a obr. 6.13b před druhou zkouškou.

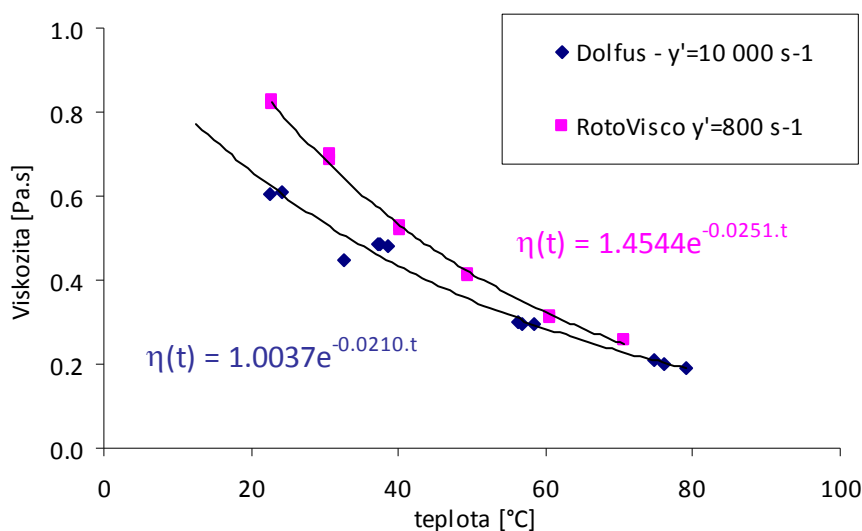


Obr. 6.13 Viskozita nové MR kapaliny 140CG před (a) první zkouškou; (b) druhou zkouškou

Rozdíl mezi oběma průběhy viskozity lze vysvětlit historií zatěžování MR kapaliny během měření. Před první zkouškou byla teplotní závislost viskozity doměřena při celkovém objemu LDE $9\,291\text{ J}\cdot\text{cm}^{-3}$, protože na jedné teplotě byly měřeny všechny proudové charakteristiky a tím se měření v neaktivovaném stavu protáhlo. Během první trvanlivostní zkoušky byl zjištěn velký pokles viskozity v počátku zatěžování, proto před druhou trvanlivostní zkouškou byla nejprve změřena viskozita pouze v neaktivovaném stavu a až poté proudové charakteristiky. Celkový objem uvořené energie byl v tomto případě pouze $2\,030\text{ J}\cdot\text{cm}^{-3}$ a z větší části byl způsoben nutným ohřevem MR kapaliny na požadované teploty. U prvního měření byla viskozita měřena od nejnižší teploty po nejvyšší, tzn. že nejvyšší teploty byly měřeny jako poslední. Právě u 80°C se nejvíce projevuje rozdíl viskozity mezi měřeními před první a druhou trvanlivostní zkouškou. Za výchozí a nejpřesnější rovnici teplotní závislosti viskozity lze tedy považovat rovnici z měření před druhou trvanlivostní zkouškou, které proběhlo v nejmenším celkovém objemu uvořené energie:

$$\eta_{MR}(t) = 1,0037 \cdot e^{-0,0210 \cdot t} \quad (32)$$

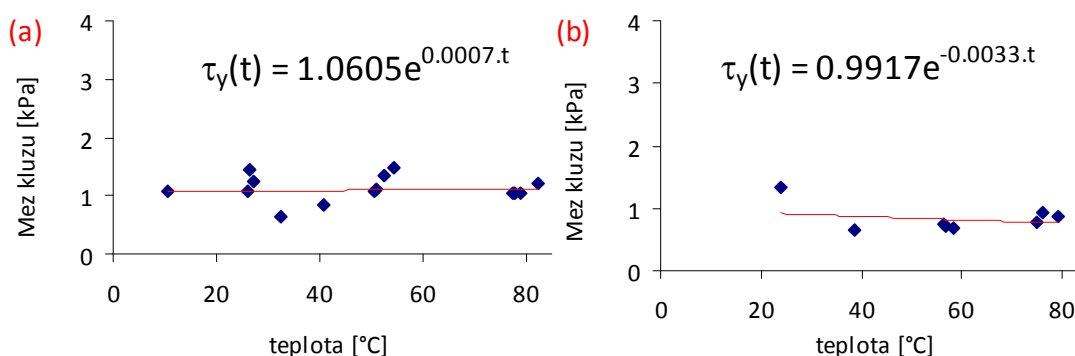
Srovná-li se tato rovnice s naměřenou teplotní závislostí viskozity při nízkých smykových spádech (rov. (27) - kap. 6.1.4) je zřejmé, že se tyto rovnice výrazně liší v prvním koeficientu (Dolfus: 1,0037; RotoVisco: 1,454) viz. obr. 6.14. Druhý koeficient (v exponentu) udává poměrný pokles viskozity s rostoucí teplotou a ten je v obou případech dost podobný. První koeficient udává viskozitu při 0°C. Rozdíl je výrazný (31%). Ten lze vysvětlit smykovým řidnutím MR kapaliny popsaným v kap. 2.2. Viskozita na RotoVisco byla měřena při $\dot{\gamma} = 800 \text{ s}^{-1}$, zatímco na reometru Dolfus byla viskozita měřena a vyhodnocována v intervalu smykového spádu $5 \cdot 10^3$ až $3 \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}$. Na obr. 6.14 je tento pokles názorně vidět.



Obr. 6.14 Porovnání viskozitních křivek měřených na RotoVisco a Dolfusu a extrapolovaná viskozita

b) Mez kluzu v neaktivovaném stavu

Mez kluzu se během trvanlivostní zkoušky neměnila ani zdaleka tak rychle jako viskozita. Tomu také odpovídají podobné výsledky naměřené před oběma trvanlivostními zkouškami (obr. 6.15):

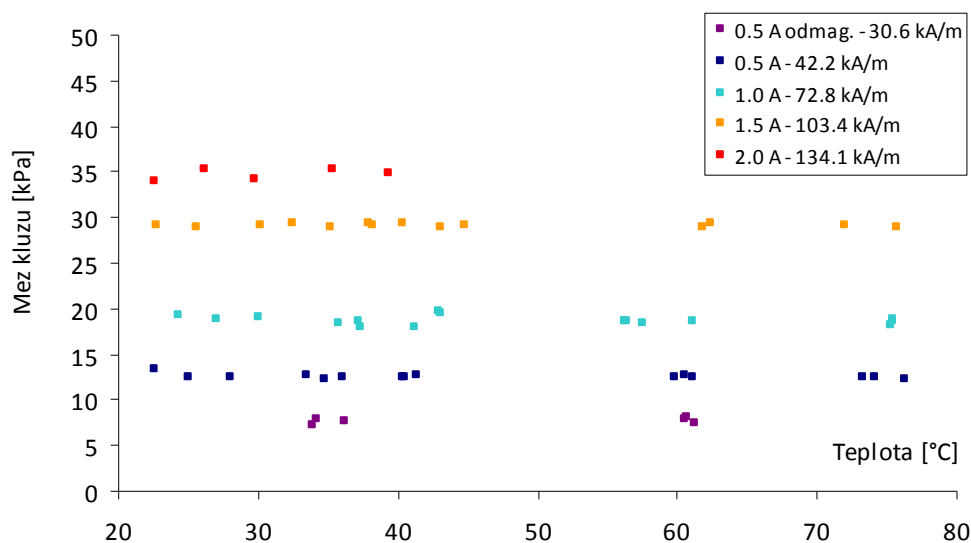


Obr. 6.15 Mez kluzu před (a) první zkouškou; (b) druhou zkouškou

Mez kluzu měřená při vysokých smykových spádech má hodnotu 1,06kPa, resp. 0,99kPa před druhou trvanlivostní zkouškou. Analyzovaná hodnota meze kluzu při vysokých smykových spádech je naprosto odlišná od meze kluzu naměřené při nízkých smykových spádech. Tento rozdíl je dán smykovým řidnutím MR kapaliny a jedná se o stejnou problematiku jako v případě volby vhodného intervalu smykového spádu při analýze tokových křivek rozebíraného v kap. 5.4.3.

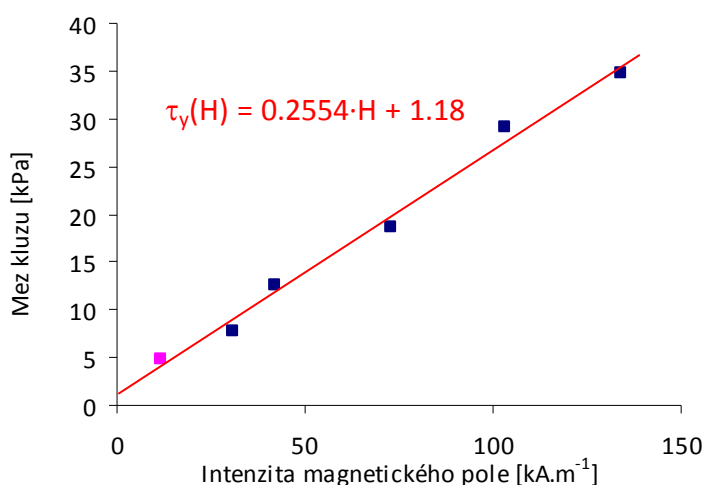
c) Teplotní a proudové charakteristiky

Proudové charakteristiky nové MR kapaliny budou důležité zejména při budoucím hodnocení změny MR efektu. Obr. 6.16 ukazuje závislost meze kluzu na teplotě při různých hodnotách intenzity magnetického pole. Intenzita magnetického pole $30,6 \text{ kA}\cdot\text{m}^{-1}$ je měřena při proudu 0,5A, ale s odmagnetovaným obvodem a to z důvodu přesného vyčíslení meze kluzu od remanentní indukce magnetického obvodu. Je vidět, že mez kluzu v aktivovaném stavu je nezávislá na teplotě. To byl hlavní důvod, proč při první trvanlivostní zkoušce nebyla měřena mez kluzu v neaktivovaném stavu v širším intervalu teplot, ale pouze v úzkém rozsahu teplot kolem teploty zatěžování. Jak ale ukázala druhá trvanlivostní zkouška, mez kluzu v neaktivovaném stavu na teplotě závislá je. Je to především jinou fyzikální podstatou meze kluzu v aktivovaném a neaktivovaném stavu. Zatímco v aktivovaném stavu hrají hlavní roli soudržné síly železných částic v magnetickém poli, v neaktivovaném stavu se jedná o projev konzistence MR kapaliny. Stejně jako mazací tuky, tak i konzistence MR kapaliny je závislá na teplotě. Velikost magnetických sil v aktivovaném stavu je také závislá na teplotě. Nejvhodnější veličinou k vyjádření této závislosti je permeabilita. Ta s rostoucí teplotou mírně roste až k tzv. Curiově teplotě, při které se zničí uspořádání magnetických domén a materiál se stává nemagnetický. Pro železo je Curiova teplota kolem 770°C . Nárůst permeability při provozu MR zařízení v rozsahu teplot 20 až 80°C je však zanedbatelný.



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

Graf na obr. 6.17 ukazuje závislost meze kluzu na intenzitě magnetického pole. Fialově označený bod není naměřený, ale vypočítaný z rozdílu meze kluzu odmagnetovaného a neodmagnetovaného obvodu při 0,5A. Tento bod reprezentuje mez kluzu generovanou díky remanentnímu magnetismu obvodu. Ze závislosti meze kluzu na intenzitě magnetického pole lze dedukovat dva závěry. Průsečík proložené regresní přímky s y-osou označuje mez kluzu v neaktivovaném stavu. Tímto způsobem identifikovaná mez kluzu v neaktivovaném stavu se liší pouze o 13% od skutečně naměřených hodnot. Druhý závěr je, že magnetický obvod není nasycen a stále se pohybujeme v lineární oblasti syčení materiálu magnetického obvodu.



Obr. 6.17 Závislost meze kluzu na intenzitě magnetického pole

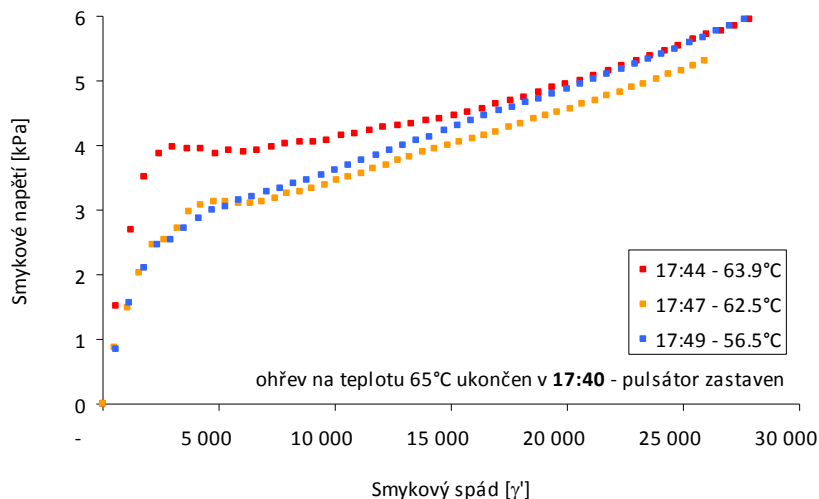
d) projev teplotní degradace ve vysokých smykových spádech

Teplotní degradace popsána v kap. 6.1.4 a pozorovaná při měření nízkých smykových spádů se projevila i při vysokých smykových spádech. Graf na obr. 6.18 ukazuje naměřené tokové křivky MR kapaliny v neaktivovaném stavu při teplotě kolem 65°C. Tyto tokové křivky byly zaznamenány v jednom z kontrolních bodů trvanlivostní zkoušky, proto je na křivkách patrná tak výrazná mez kluzu. Ale protože tento jev nemá souvislost s dlouhodobým zatěžováním, je prezentován v této kapitole.

Aby mohla být změřena viskozita MR kapaliny při 68°C, musela se mechanicky zahřát na požadovanou teplotu. Ohřev byl ukončen v 17:40. O 2,5 minuty později začalo 80s měření (červené body). Průměrná teplota MR kapaliny byla 63,9°C. Za 1,5 minuty následovalo měření druhé (oranžové body). Je patrný velký pokles meze kluzu (cca o 25%). První měření (červené body) má výraznou mez kluzu, která může odpovídat stavu na obr. 6.10 vlevo. Poslední měření (modré body) má tokovou křivku hladkou, bez výrazného počátečního ztuhnutí. MR kapalina je již promíchaná. Teplota měření je nižší, což znamená vyšší viskozitu a strmější tokovou křivku.

To, že se tento jev neprojevil již na počátku měření nové MR kapaliny je patrně dáno tím, že po ukončení ohřevu v aktivovaném stavu, následném odmagnetování a před

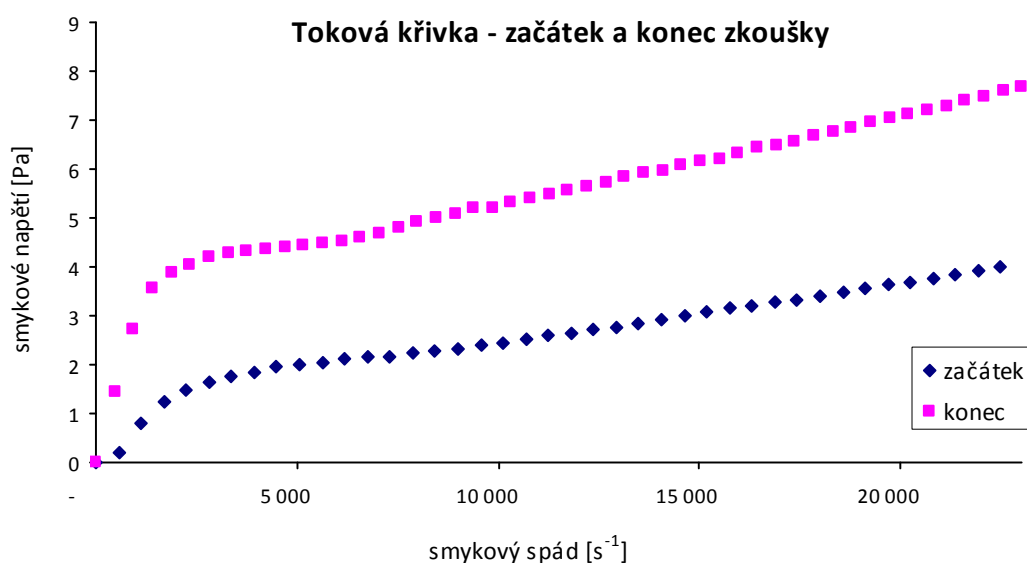
samotným naměřením tokové křivky, byla MR kapalina pomalým pulsováním reometru udržovaná na požadované teplotě. Toto pulsování patrně stačilo k tomu, aby byla MR kapalina dostatečně rozmíchána.



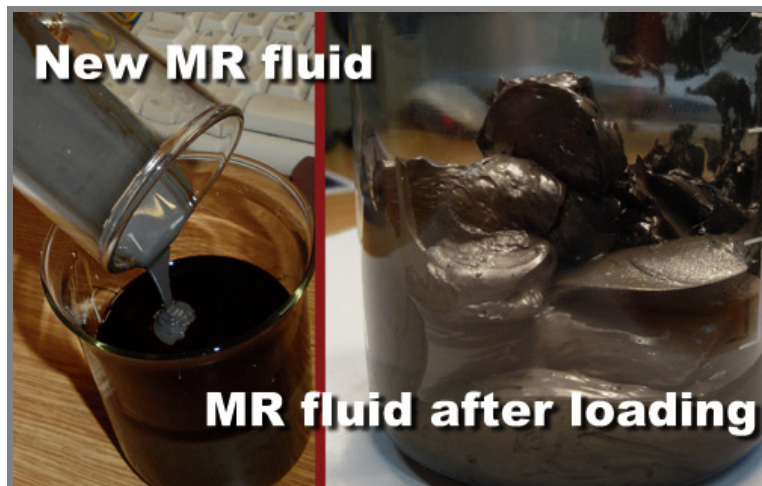
Obr. 6.18 Prezentace tepelné degradace při vysokých smykových spádech

6.2 MR kapalina během trvanlivostního testu v neaktivovaném stavu

Kapitola je rozdělena na dvě podkapitoly, které se zabývají změnou viskozity a meze kluzu MR kapaliny v neaktivovaném stavu, tj. bez přítomného magnetického pole. Na obr. 6.19 jsou tokové křivky naměřené na začátku a na konci trvanlivostní zkoušky. Je zde vidět výrazná změna zejména v mezi kluzu. Obr. 6.20 ukazuje viditelnou změnu konzistence před a po trvanlivostní zkoušce.



Obr. 6.19 Změna charakteru tokových křivek na začátku a na konci trvanlivostní zkoušky

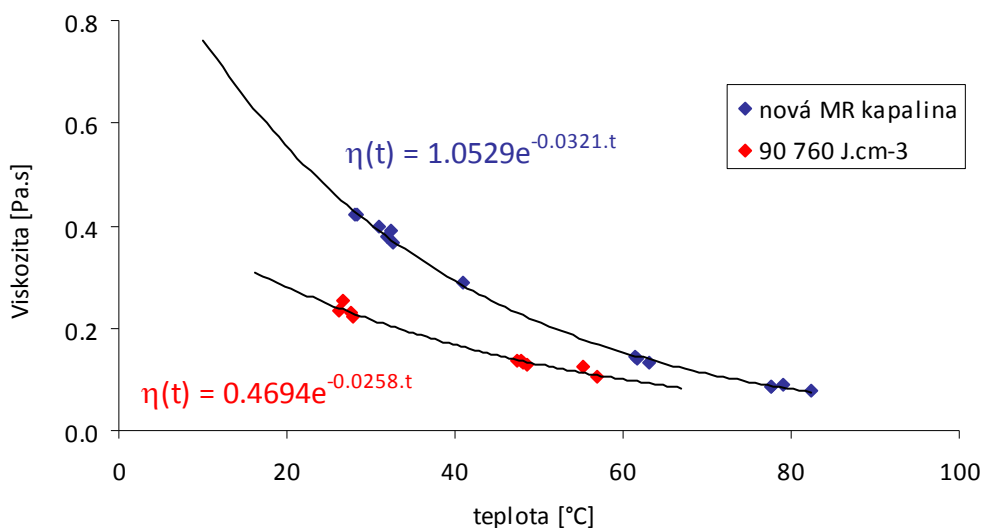


Obr. 6.20 Konzistence MR kapaliny před začátkem a na konci trvanlivostní zkoušky

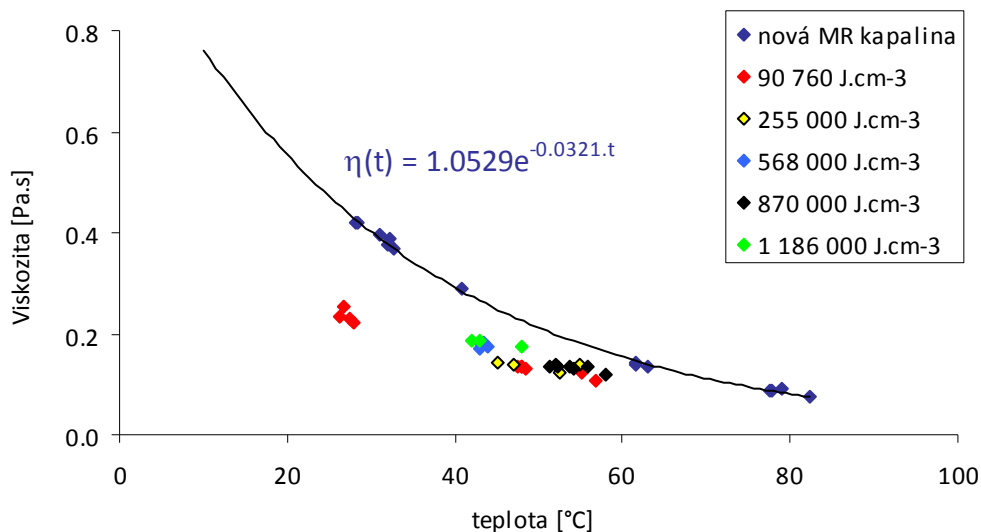
6.2.1 Vliv dlouhodobého zatěžování na viskozitu

6.2.1

Graf na obr. 6.21 ukazuje teplotní závislost viskozity nové MR kapaliny a MR kapaliny po prvním zatěžovacím cyklu (červené body) během první trvanlivostní zkoušky, tj. při LDE $9,08 \cdot 10^4 \text{ J.cm}^{-3}$. Po tomto zatížení se již viskozita MR kapaliny nemění, jak ukazuje obr. 6.22, kde jsou doplněny další body naměřené viskozity ze zbylých kontrolních bodů trvanlivostní zkoušky.

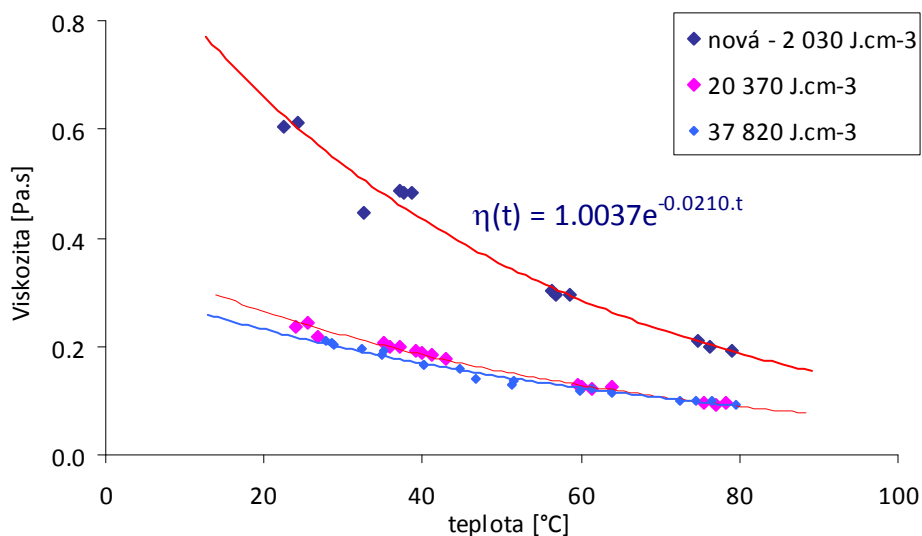


Obr. 6.21 Viskozita v průběhu první trvanlivostní zkoušky



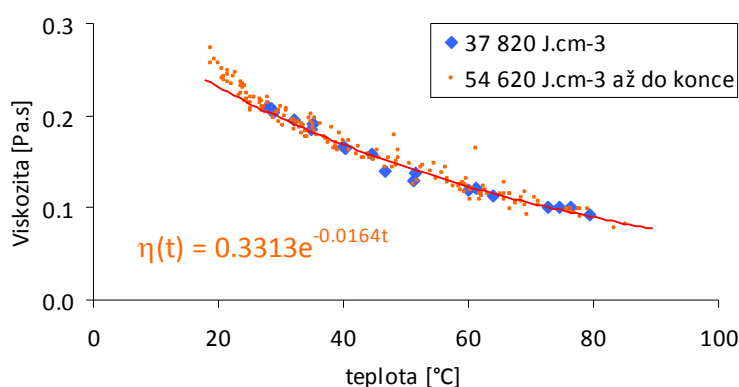
Obr. 6.22 Viskozita v intervalu LDE 90 760 až 1 180 600 J.cm⁻³ během první trvanlivostní zkoušky

Protože byla u první zkoušky zaznamenána taková výrazná změna viskozity už v prvním kontrolním bodě, byl u druhé zkoušky rozdělen první zatěžovací cyklus na čtyři stejné úseky, aby byla změna viskozity včas podchycena. Bohužel se ukázalo, že k poklesu viskozity dochází ještě dříve než se očekávalo. Místo postupného poklesu viskozity byl zaznamenán stav MR kapaliny těsně před tím, než se viskozita ustálila, jak lze vyčíst z grafu na obr. 6.23. Modré body znázorňují viskozitu nové MR kapaliny, růžové body jsou hodnoty viskozity naměřené v prvním kontrolním bodě, který byl zvolen oproti první trvanlivostní zkoušce cca 4x dříve. Světle modré body znázorňují viskozitu během druhého kontrolního měření.



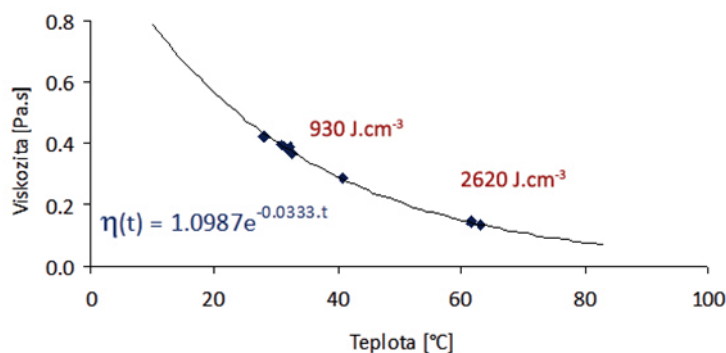
Obr. 6.23 Viskozita v průběhu druhé trvanlivostní zkoušky

Druhá trvanlivostní zkouška ukázala, že k poklesu dochází daleko dříve než se očekávalo a to v rozmezí LDE 2 030 až 37 820 J.cm⁻³. Tento interval je možné ještě zmenšit na rozsah 2 030 až 20 370 J.cm⁻³, protože viskozitní křivka naměřená při 20 370 J.cm⁻³ LDE je velice blízko konečnému, v průběhu zkoušky již neměnnému průběhu viskozity. Obr. 6.24 ukazuje naměřenou viskozitu v intervalu 37 820 až 1 184 350 J.cm⁻³ disipované měrné energie. Modré body zobrazují viskozitu při 37 820 J.cm⁻³, tj. druhý kontrolní bod. Je vidět, že po zbytek zkoušky (oranžové body) je viskozita již stejná jako ve druhém kontrolním bodě. Zobrazená rovnice regrese je sestrojena ze všech bodů naměřené viskozity od LDE = 37 820 J.cm⁻³ až do konce zkoušky.



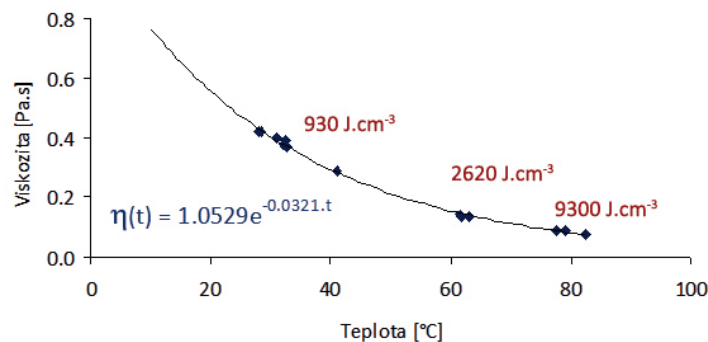
Obr. 6.24 Viskozita v průběhu druhé trvanlivostní zkoušky v intervalu 37 820 až 1 184 350 J.cm⁻³

Na základě nově získaných poznatků o poklesu viskozity byla udělána nová analýza měření viskozity nové MR kapaliny před první trvanlivostní zkouškou a to včetně energetické rozvahy při měření. Byly zde totiž naměřeny hodnoty viskozity, které původně vypadaly, že jsou chybou měření a proto ani nebyly do analýzy uvažovány. Před první trvanlivostní zkouškou totiž nikdo nepředpokládal, že by mohlo dojít k poklesu viskozity, natož potom k tak razantnímu a rychlému. To vše s přihlédnutím k v literatuře popsanému jevu „Provozní houstnutí“, který naopak přisuzoval viskozitě rostoucí trend.



Obr. 6.25 Viskozita MR kapaliny před 1. trvanlivostní zkouškou s energetickou rozvahou naměřených bodů

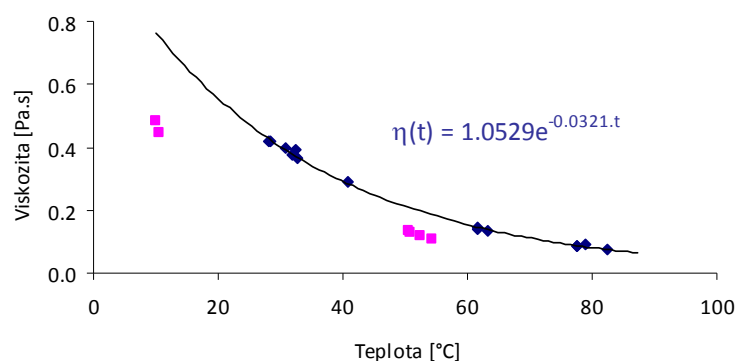
V grafu na obr. 6.25 jsou hodnoty viskozity naměřené v rozmezí LDE 930 až 2 620 $\text{J}\cdot\text{cm}^{-3}$. Tyto hodnoty jsou naměřeny v relativně malém rozsahu celkové uvolněné energie v reometru. Na obr. 6.26 jsou k této křivce přidány body pro teplotu okolo 80°C naměřené při celkovém objemu LDE 9 300 $\text{J}\cdot\text{cm}^{-3}$.



Obr. 6.26 Viskozita MR kapaliny před 1. trvanlivostní zkouškou s energetickou rozvahou naměřených bodů

Po porovnání koeficientů rovnic exponenciální regrese obou křivek (obr. 6.25 a 6.26) je zřejmé, že naměřená viskozita MR kapaliny okolo 80°C téměř neovlivňuje předchozí trend teplotní závislosti viskozity. Lze tedy vyvodit, že k velké změně viskozity do cca 10 000 $\text{J}\cdot\text{cm}^{-3}$ disipované měrné energie nedochází a hodnoty kolem 80°C lze s určitou rezervou považovat za součást viskozitní křivky nové MR kapaliny.

V rozmezí LDE 14 340 až 14 440 $\text{J}\cdot\text{cm}^{-3}$ (tj. před začátkem prvního zatěžovacího cyklu) byla ještě naměřena viskozita, která měla doplnit teplotně-viskózní křivku o teploty kolem 54 a 10 °C. Záznamy z toho měření byly označeny jako chybné, protože hodnoty viskozity se výrazně lišily od hladkého průběhu již naměřené viskozitní křivky. Nicméně teprve samotná trvanlivostní zkouška a především výsledky druhé trvanlivostní zkoušky ukázaly, že se již mohlo jednat o možný projev poklesu viskozity. Graf na obr. 6.27 ukazuje naměřenou viskozitu nové MR kapaliny a dodatečně naměřené body viskozity. Je tedy možné říci, že výrazný pokles viskozity nastává v intervalu LDE 10 000 až 14 440 $\text{J}\cdot\text{cm}^{-3}$.



Obr. 6.27 Dodatečně naměřená viskozita při 14 440 $\text{J}\cdot\text{cm}^{-3}$ v porovnání s novou MR kapalinou

Následující tab. 6.3 podává souhrn naměřených průběhů viskozity z obou trvanlivostních zkoušek. V tabulce jsou uvedeny koeficienty exponenciální rovnice regrese. Obecný tvar rovnice s označením koeficientů viz. rovnice (33). Protože u první zkoušky byla viskozita v jednotlivých kontrolních bodech měřena pouze pro jednu teplotu a protože zde viskozita neměnila svoji hodnotu, jsou jednotlivé průběhy v kontrolních bodech nahrazeny exponenciální rovnicí regrese ze všech hodnot (obr. 6.22). Grafy naměřených průběhů viskozity v jednotlivých kontrolních bodech pro druhou trvanlivostní zkoušku jsou v **příloze V**.

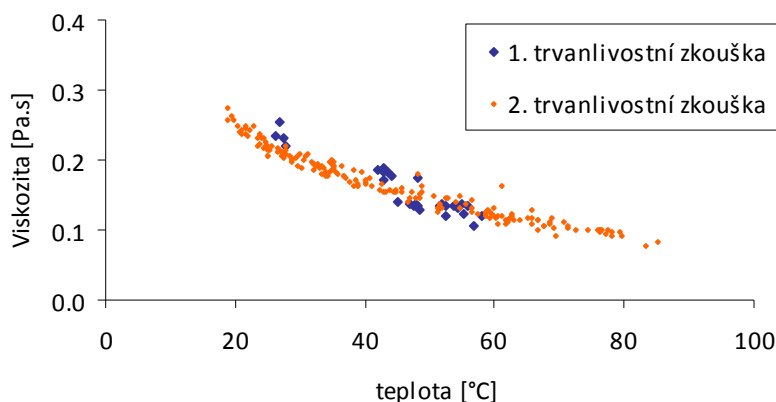
$$\eta(t) = A \cdot e^{B \cdot t} \quad (33)$$

Tab. 6.3 Koeficienty exponenciální regrese a viskozita pro 40°C

LDE [kJ.cm ⁻³]	první trv. zkouška (45-55°C)			druhá trv. zkouška (65-75°C)		
	A	B	$\eta(40^\circ\text{C})$	A	B	$\eta(40^\circ\text{C})$
2.0	-	-	-	1.0037	-0.021	0.433
9.3	1.0529	-0.0321	0.292	-	-	-
14.4	0.6479	-0.0321	0.179	-	-	-
20.4	-	-	-	0.3794	-0.0181	0.184
37.8	-	-	-	0.3164	-0.0157	0.169
54.6	-	-	-	0.2944	-0.0146	0.164
72.7	-	-	-	0.31	-0.0158	0.165
91.0	0.4491	-0.0231	0.178	0.2911	-0.0144	0.164
165	-	-	-	0.3248	-0.0159	0.172
256	0.4491	-0.0231	0.178	0.349	-0.0169	0.178
368	-	-	-	0.3369	-0.0170	0.171
512	0.4491	-0.0231	0.178	0.3501	-0.0177	0.172
614	-	-	-	0.3229	-0.0156	0.173
719	-	-	-	0.3519	-0.0177	0.173
862	0.4491	-0.0231	0.178	0.3608	-0.0176	0.178
940	-	-	-	0.3664	-0.0194	0.169
1 012	-	-	-	0.3181	-0.0145	0.178
1 184	0.4491	-0.0231	0.178	0.3315	-0.0160	0.175

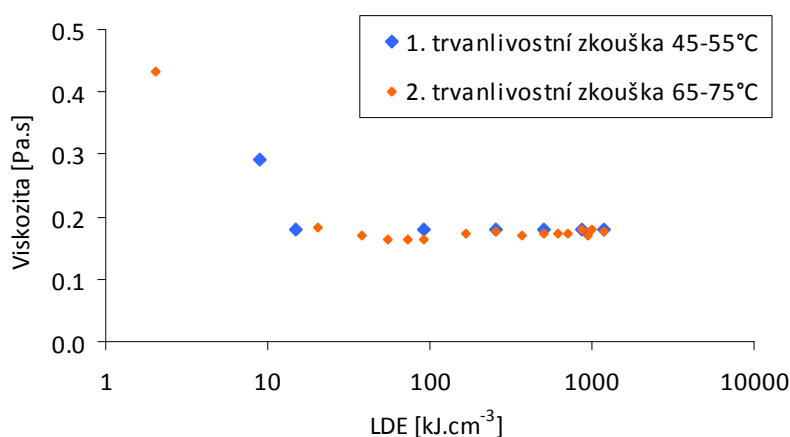
Porovnání viskozity 1. a 2. trvanlivostní zkoušky, resp. viskozity při zatěžování střední a vysokou teplotou je v grafu na obr. 6.28. Tento graf zobrazuje všechny naměřené hodnoty viskozity v závislosti na teplotě od okamžiku, kdy se již viskozita neměnila. V oblasti 40-60°C jsou hodnoty viskozity při první i druhé zkoušce totož-

né. Je pravděpodobné, že při větším množství naměřených dat pro nižší a vyšší teploty u první zkoušky by se tyto hodnoty kryly s výsledky druhé zkoušky.



Obr. 6.28 Porovnání naměřené viskozity u obou trvanlivostních zkoušek

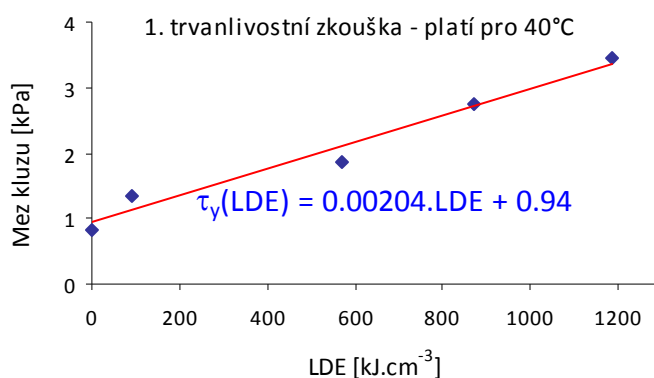
Přímé srovnání průběhů viskozity obou trvanlivostních zkoušek může být jednoznačné pouze při srovnání viskozity při dané, referenční teplotě. Protože při měření tokových křivek není možné měřit na přesně požadované teplotě, byla viskozita pro srovnání obou trvanlivostních zkoušek na konkrétní, referenční teplotě vypočítána z naměřených průběhů v každém kontrolním bodě (viz. tab. 6.3 a příloha V). Jako referenční byla zvolena teplota 40°C. Graf na obr. 6.29 ukazuje interpolovanou viskozitu pro obě zkoušky v průběhu celého testu pro teplotu 40°C. Na základě analýzy naměřených dat lze vyslovit závěr, že bez ohledu na provozní teplotu trvanlivostní zkoušky poklesla viskozita v průběhu dlouhodobého zatěžování na stejnou míru a to již od 37 820 J.cm⁻³ disipované měrné energie. Dále je možné říci, že dramatický pokles viskozity nastal mezi 9 000 až 20 370 J.cm⁻³ disipované měrné energie.



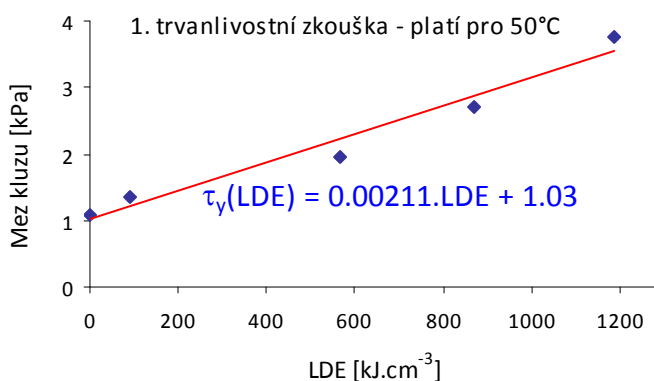
Obr. 6.29 Vypočítaná viskozita z regresních průběhů při 40°C u obou zkoušek

6.2.2 Vliv dlouhodobého zatěžování na mez kluzu

Výsledky naměřené meze kluzu nové MR kapaliny v neaktivovaném i v aktivovaném stavu podpořily hypotézu, že mez kluzu je na teplotě nezávislá (viz. kap. 6.1.5). Proto také u první trvanlivostní zkoušky po každém zatěžovacím cyklu byly měřeny tokové křivky pouze v rozsahu teplot 40-55°C, tedy pokud možno v intervalu teplot, při kterých probíhalo zatěžování kapaliny. Teprve až daleko detailnější druhá trvanlivostní zkouška odhalila jistou teplotní závislost meze kluzu, která se ale začala zřetelněji projevovat u MR kapaliny až v průběhu trvanlivostní zkoušky. Výsledky obou trvanlivostních zkoušek jsou srovnány dvojím způsobem. Nejprve je provedeno srovnání při střední teplotě zatěžování, tj. pro první zkoušku 50°C a pro druhou 70°C. Druhé srovnání bude na stejné - referenční teplotě, aby mohl být porovnán vliv dlouhodobého zatěžování při různých teplotách na samotný stav MR kapaliny. Pro toto srovnání byla zvolena teplota 40°C, při které se většinou udává i viskozita tekutin. Graf na obr. 6.30 ukazuje naměřené hodnoty meze kluzu v průběhu první trvanlivostní zkoušky pro teplotu 40°C a graf na obr. 6.31 ukazuje mez kluzu pro 50°C. V obou grafech je zobrazena přímka regrese, která vyjadřuje rostoucí trend meze kluzu. Každý bod v grafech je sestroměn jako průměr naměřených hodnot meze kluzu v okolí dané teploty a při příslušné hodnotě LDE a to z toho důvodu, aby každý bod v grafu měl stejnou váhu.



Obr. 6.30 Výsledky mez kluzu první trvanlivostní zkoušky (45-55°C) pro teplotu 40°C



Obr. 6.31 Výsledky mez kluzu první trvanlivostní zkoušky (45-55°C) pro teplotu 50°C

Oba průběhy jsou velice podobné. Zejména z toho důvodu, že rozdíl mezi porovnávanými teplotami je pouze 10°C. Z naměřených dat lze říci, že nárůst meze kluzu je stálý a rovnoměrný a že mez kluzu na konci trvanlivostní zkoušky dosahuje 4,1násobku (pro 40°C), resp. 3,5 násobek (pro 50°C) počáteční hodnoty. Průběh meze kluzu první trvanlivostní zkoušky pro teplotu 40°C lze interpretovat přímkou o rovnici (34):

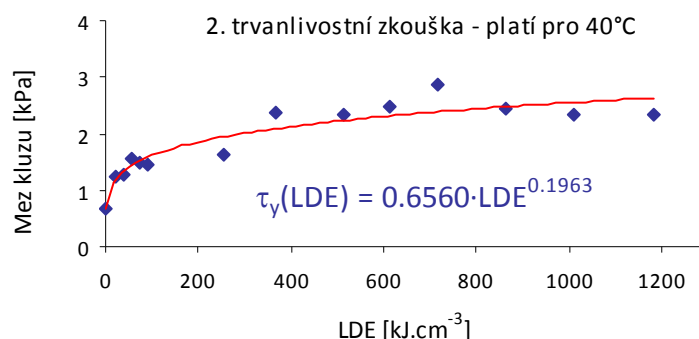
$$\tau_y(LDE) = 0,00204 \cdot LDE + 0,94 \quad (34)$$

, kde je LDE dosazováno v $\text{kJ}\cdot\text{cm}^{-3}$. Průběh meze kluzu první trvanlivostní zkoušky pro teplotu 50°C lze interpretovat rovnicí (35):

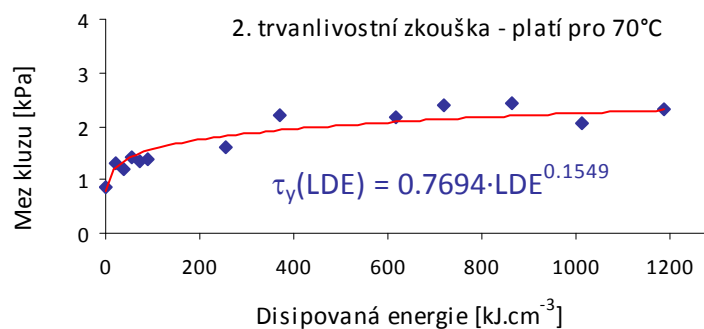
$$\tau_y(LDE) = 0,00211 \cdot LDE + 1,03 \quad (35)$$

, kde se LDE dosazuje v $\text{kJ}\cdot\text{cm}^{-3}$. Všechny naměřené hodnoty meze kluzu první trvanlivostní zkoušky jsou v **příloze VI**.

Další dva grafy na obr. 6.32 a 6.33 zobrazují mez kluzu při 40°C a při teplotě 70°C. Teplota 70°C je střed teplotního intervalu druhé trvanlivostní zkoušky.



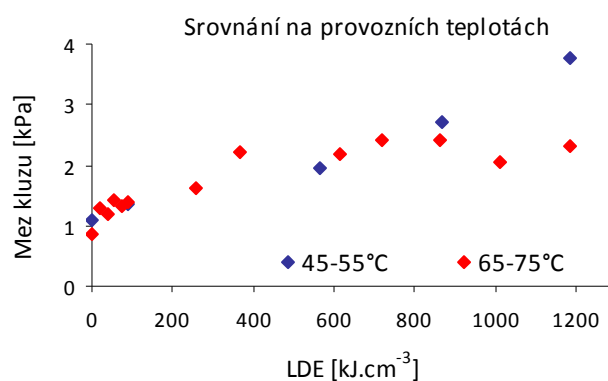
Obr. 6.32 Výsledky mez kluzu druhé trvanlivostní zkoušky (65-75°C) pro teplotu 40°C



Obr. 6.33 Výsledky mez kluzu druhé trvanlivostní zkoušky (65-75°C) pro teplotu 70°C

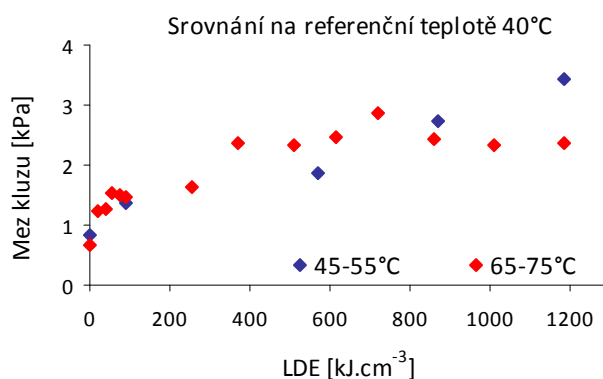
Z obou grafů je možno vyvodit, že mez kluzu naměřená při 40 i 70°C rychleji rostla v počátku zkoušky. Po rychlém nárůstu mez kluzu i nadále rostla, ale daleko pomaleji. Dále lze říci, že mez kluzu naměřená při vyšší teplotě (70°C) je o málo nižší než u teploty 40°C.

Graf na obr. 6.34 srovnává mez kluzu při provozní teplotě obou trvanlivostních zkoušek. Je zde vidět, že mez kluzu MR kapaliny při dlouhodobém zatěžování při nižší teplotě roste rychleji než při zatěžování při vyšší teplotě. Ukazovalo by to na fakt, že degradace MR kapaliny je způsobena z větší části mechanicky. Při stejných zatěžovacích podmínkách, tj. stejná rychlost pulsátoru a stejný budicí proud v pístu reometru, působilo v MR kapalině při vyšší teplotě menší smykové napětí a tím pádem i menší mechanické namáhání. Větší vliv mechanického namáhání na degradaci MR kapaliny by podpořil hypotézu, že „provozní houstnutí“ je způsobeno odlamujícími se oxidy z povrchu Fe částic. Výraznější interakce částic při větším mechanickém zatížení vede k výraznějšímu houstnutí MR kapaliny.



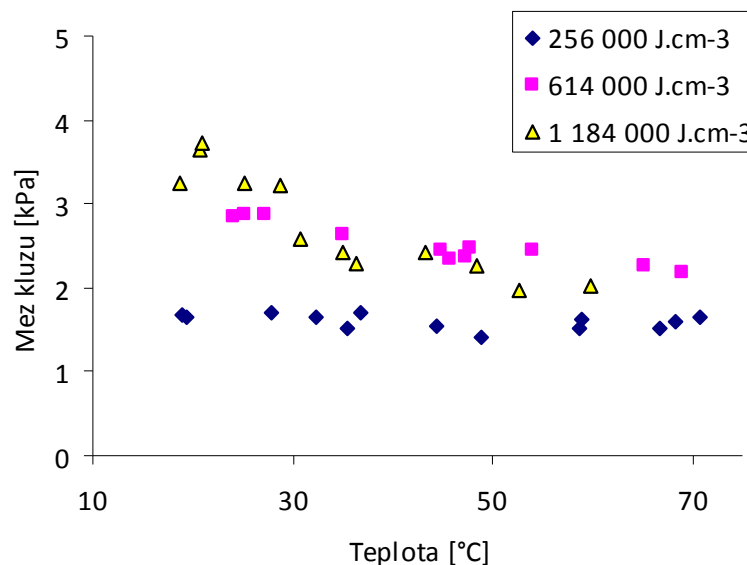
Obr. 6.34 Mez kluzu obou trvanlivostních zkoušek na provozních teplotách

Graf na obr. 6.35 porovnává mez kluzu z obou trvanlivostních zkoušek, ale naměřenou při referenční teplotě 40°C. U druhé trvanlivostní zkoušky (červené body) je mez kluzu při teplotě 40°C výraznější než jaká byla identifikována při provozní teplotě, tj. při 70°C (graf na obr. 6.34).



Obr. 6.35 Porovnání mez kluzu obou trvanlivostních zkoušek při teplotě 40°C

Ve druhé trvanlivostní zkoušce byly tokové křivky měřeny v rozmezí teplot 20 až 75°C, takže byla získána i teplotní závislost meze kluzu. Ze začátku trvanlivostní zkoušky je mez kluzu na teplotě nezávislá, ale s přibývajícím objemem LDE začíná být nárůst meze kluzu při nižších teplotách výraznější, jak ukazuje graf s výběrem některých naměřených závislostí na obr. 6.36. Z grafu lze také vyčíst, že rozdíly meze kluzu mezi teplotami 40 až 75°C jsou minimální, což dokazuje i předchozí srovnání obou zkoušek. Všechny naměřené hodnoty meze kluzu včetně regresních křivek jsou v **příloze VII**.



Obr. 6.36 Průběh meze kluzu v závislosti na teplotě v různých fázích trvanlivostní zkoušky

Naměřenými hodnotami byly prokládány exponenciální křivky ve tvaru:

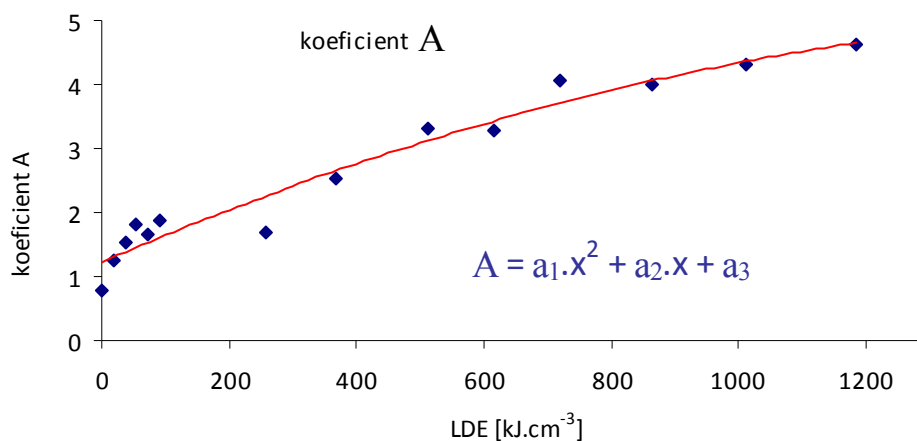
$$\tau_y(t) = A \cdot e^{B \cdot t} \quad (36)$$

V tabulce 6.4 je srovnání koeficientů rovnic regrese A a B. Je zde vidět, že tyto koeficienty se s narůstajícím LDE mění. Koeficient A roste, zatímco koeficient B klesá. Význam obou koeficientů u exponenciální rovnice lze snadno interpretovat. Nárůst koeficientu A znamená, že roste mez kluzu při teplotě 0°C. Pokles koeficientu B v záporných hodnotách znamená, že s narůstající teplotou výrazněji klesá hodnota meze kluzu. Čím více se koeficient B blíží nule, tím více má křivka přímkový tvar se směrnici A.

Tab. 6.4 Koeficienty regrese meze kluzu při druhé trvanlivostní zkoušce

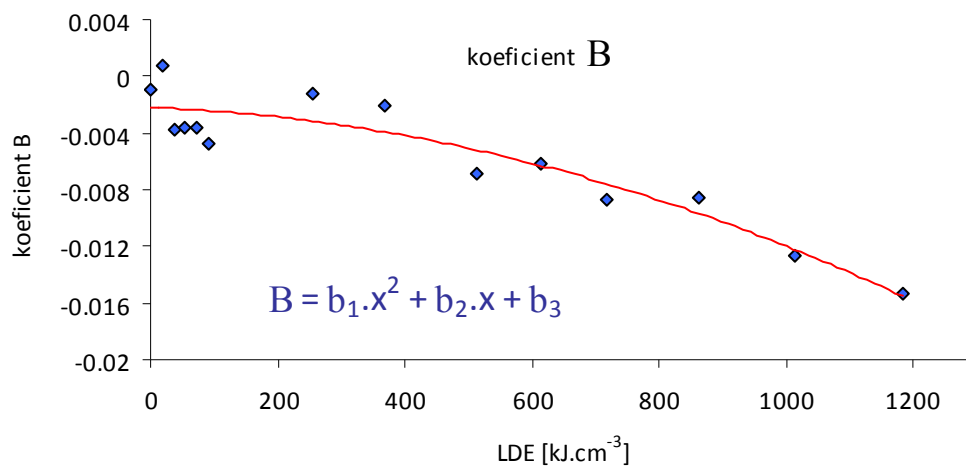
LDE [J.cm ⁻³]	A	B
1 000	0.7911	-0.001
20 370	1.2422	0.0008
37 820	1.5309	-0.0038
54 620	1.8239	-0.0036
72 700	1.6651	-0.0036
91 000	1.8866	-0.0047
256 000	1.6834	-0.0012
368 000	2.5339	-0.0021
512 000	3.3062	-0.0068
614 000	3.2852	-0.0061
719 000	4.0678	-0.0087
862 000	4.0011	-0.0085
1 012 000	4.312	-0.0127
1 184 000	4.6285	-0.0154

V grafu na obr. 6.37 jsou vyneseny koeficienty A v závislosti na objemu LDE. Trend nárůstu lze vystihnout polynomicou křivkou 2. řádu.



Obr. 6.37 Průběh koeficientu A

Graf na obr. 6.38 zobrazuje pokles koeficientu B v průběhu trvanlivostní zkoušky. Trend tohoto poklesu lze podchytit polynomicou křivkou 2. řádu stejně jako u koeficientu A.



Obr. 6.38 Průběh koeficientu B

V tabulce 6.5 jsou koeficienty polynomických křivek z grafů na obr. 6.37 a 6.38:

Tab. 6.5 Koeficienty polynomů 2. řádu

koeficient A			koeficient B		
a ₁	a ₂	a ₃	b ₁	b ₂	b ₃
-1,224.10 ⁻⁶	4,346.10 ⁻³	1,221	-8,083.10 ⁻⁹	-1,706.10 ⁻⁶	-2,197.10 ⁻³

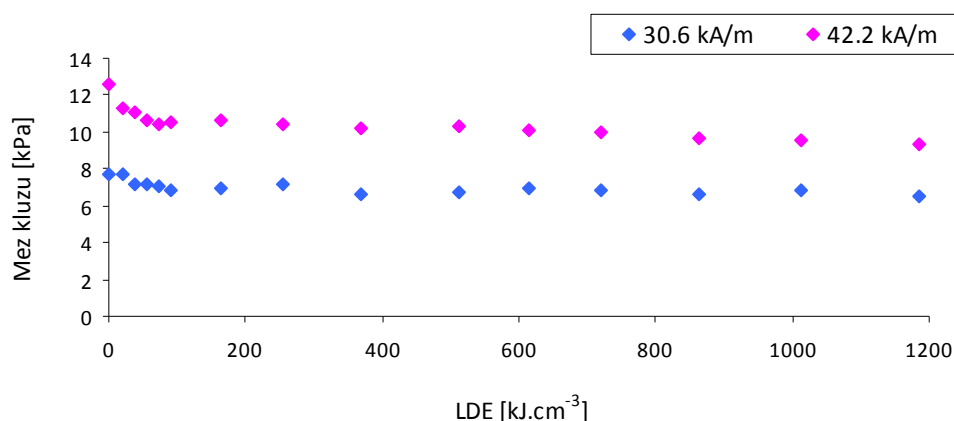
Ze získaných závislostí meze kluzu na teplotě a LDE lze sestavit rovnici, která bude popisovat chování meze kluzu v průběhu celé zkoušky. Dosazením koeficientů a_1 , a_2 , a_3 a b_1 , b_2 , b_3 do rovnice (36) získáme rovnici v tomto tvaru, kde je LDE dosazováno v kJ.cm⁻³:

$$\tau_y(LDE, t) = (a_1 \cdot LDE^2 + a_2 \cdot LDE + a_3) \cdot e^{(b_1 \cdot LDE^2 + b_2 \cdot LDE + b_3) \cdot t} \quad (37)$$

6.3 MR kapalina během trvanlivostního testu v aktivovaném stavu

6.3.1 Vliv dlouhodobého zatěžování na MR efekt

Na obr. 6.39 jsou výsledky měření meze kluzu při intenzitě magnetického pole 30,6 kA.m⁻¹ a 40,2 kA.m⁻¹. Z grafu je zřejmé, že na počátku zkoušky došlo k výraznému poklesu meze kluzu. Tento pokles se zastavil při LDE cca 50 000 J.cm⁻³ a dále si udržoval stabilní, pozvolně klesající trend.



Obr. 6.39 Pokles meze kluzu při 0,5A v průběhu 2. trvanlivostní zkoušky

Ve velikosti a v průběhu meze kluzu během trvanlivostní zkoušky při 30,6 a 42,2 kA.m⁻¹ (obr. 6.39) se musí projevit i vliv „provozního houstnutí“ MR kapaliny v neaktivovaném stavu. Pokud nebudeme tento jev uvažovat, je rozdíl meze kluzu na počátku a na konci zatěžování pro obě intenzity magnetického pole různý (viz. tab. 6.6). Oslabení MR efektu by ale mělo být při stejném oslabení magnetických vlastností Fe částic vlivem oxidace procentuálně stejné pro velký rozsah intenzit magnetického pole. Pokud se naměřená mez kluzu v aktivovaném stavu zkoriguje o mez kluzu v neaktivovaném stavu (korekce odečtením této hodnoty) dostaneme stejné výsledky – pokles o 41,2%, resp. o 40,6%. Mez kluzu v neaktivovaném stavu je totiž nezávislá na magnetickém poli. Měření aktivovaného stavu probíhalo okolo teploty 40°C. Pro tuto teplotu byla mez kluzu v neaktivovaném stavu na začátku 2. trvanlivostní zkoušky 0,66 kPa a na konci 2,35 kPa. Ověření vlivu „provozního houstnutí“ na celkovou mez kluzu v aktivovaném stavu lze provést rozdílem naměřené meze kluzu při různých intenzitách magnetického pole. Odečtením těchto dvou hodnot se zároveň odečítá i vliv provozního houstnutí v neaktivovaném stavu viz. rovnice (38). Výsledná hodnota je složka meze kluzu, která je generovaná čistě rozdílem obou magnetických polí, což je 11,6 kA.m⁻¹ (poslední řádek tabulky 6.6).

$$\tau_y(11,6 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}) = \tau_y(42,2 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1} + 0 \text{ A}) - \tau_y(30,6 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1} + 0 \text{ A}) \quad (38)$$

Tab. 6.6 Pokles meze kluzu v aktivovaném stavu

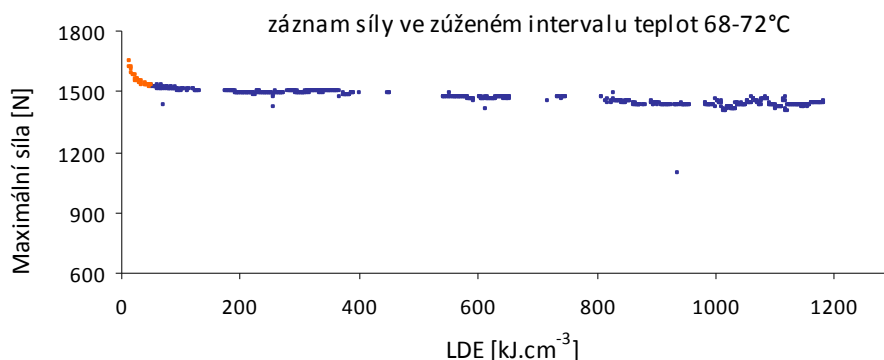
	Stav	Mez kluzu [kPa]	Pokles [%]	Korigovaná mez kluzu [kPa]	Pokles [%]
30,6 kA/m	zač.	7,71	15,2	7,05	40,6
	konec	6,54		4,19	
42,2 kA/m	zač.	12,59	25,6	11,93	41,2
	konec	9,37		7,02	
rozdíl (11,6 kA/m)	zač.	4,88	42,0	-	-
	konec	2,83		-	

Z tabulky je zřejmé, že síly vyvolané čistě magnetickým polem klesly v průběhu 2. trvanlivostní zkoušky v průměru o 41%. Tento pokles je natolik výrazný, že je nutné s ním uvažovat v regulačním algoritmu i při návrhu MR zařízení. Při uvažování tohoto poklesu je nutné brát v úvahu nárůst meze kluzu v neaktivovaném stavu vlivem provozního houstnutí.

Po odečtení meze kluzu při různých intenzitách magnetického pole byl zjištěn stejný pokles jako při provedené korekci pomocí meze kluzu v neaktivovaném stavu. To mimo jiné potvrzuje správnost naměřené meze kluzu v neaktivovaném stavu.

6.3.2 Vliv dlouhodobého zatěžování na sílu při 2A

Během celé druhé trvanlivostní zkoušky byly zaznamenávány údaje o teplotě a síle vyvolané na pístu. Při trvanlivostní zkoušce byla cívka buzena proudem 2A, což odpovídá intenzitě magnetického pole $134 \text{ kA}\cdot\text{m}^{-1}$. Graf na obr. 6.40 ukazuje pokles efektivní hodnoty síly v průběhu celého experimentu. Záznam síly byl vyfiltrován tak, aby se zúžil teplotní interval ($68\text{--}72^\circ\text{C}$) a hodnoty síly tak nebyly zatíženy změnou meze kluzu a viskozity vlivem teploty. Hodnoty v grafu jsou průměrovány po kroku $\Delta\text{LDE} = 1\,000 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-3}$, aby bylo rozložení bodů rovnoměrné.


Obr. 6.40 Pokles efektivní hodnoty síly v průběhu druhé trvanlivostní zkoušky

Z poklesu síly lze pouze přibližně odvodit, jaký bude pokles meze kluzu. Maximální sílu lze totiž rozdělit na dvě složky – viskozitní složku a složku meze kluzu. Z kap. 6.2 vyplývá, že na začátku testování došlo k výraznému poklesu viskozity. Zároveň však dochází v aktivovaném stavu i k výraznému poklesu meze kluzu, jak ukazuje graf na obr. 6.39. Oddělit vliv viskozitní složky a složky meze kluzu, pokud není k dispozici celá toková křivka, je nemožné. Navíc nelze sílu korigovat o vliv růstu meze kluzu v neaktivovaném stavu. Proto odhad meze kluzu z naměřené síly při 134 kA.m^{-1} je spíše orientační.

Tab. 6.7 Odhad poklesu meze kluzu při 134 kA.m^{-1} v průběhu 2. trvanlivostní zkoušky

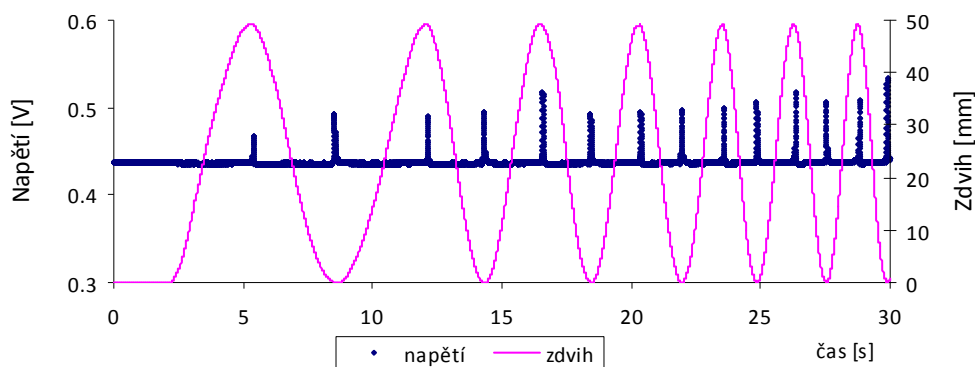
LDE [kJ.cm ⁻³]	Síla [N]	Síla [%]	Mez kluzu [kPa]
0	1650,5	100	34,8
1 180	1425,8	86,4	30,1

Z tab. 6.7 je zřejmé, že velikost efektní hodnoty síly v průběhu trvanlivostní zkoušky klesla o 13,6%. Tento pokles by odpovídal poklesu meze kluzu z 34,8 kPa (měřeno na začátku) na 30,1 kPa. Ve skutečnosti ale bude tento pokles daleko větší, protože od hodnoty síly se musejí odečíst na magnetickém poli nezávislé složky – viskozita a mez kluzu v neaktivovaném stavu. Navíc mez kluzu v průběhu dlouhodobého zatěžování roste. Tento odečet a získání přesné hodnoty meze kluzu nelze provést bez znalosti celé tokové křivky. V konečném důsledku by se měl pokles MR efektu přiblížit k 41% poklesu identifikovaném při menších intenzitách magnetického pole.

6.4 Diagnostická metoda pro určení provozního stavu MR kapaliny

6.4

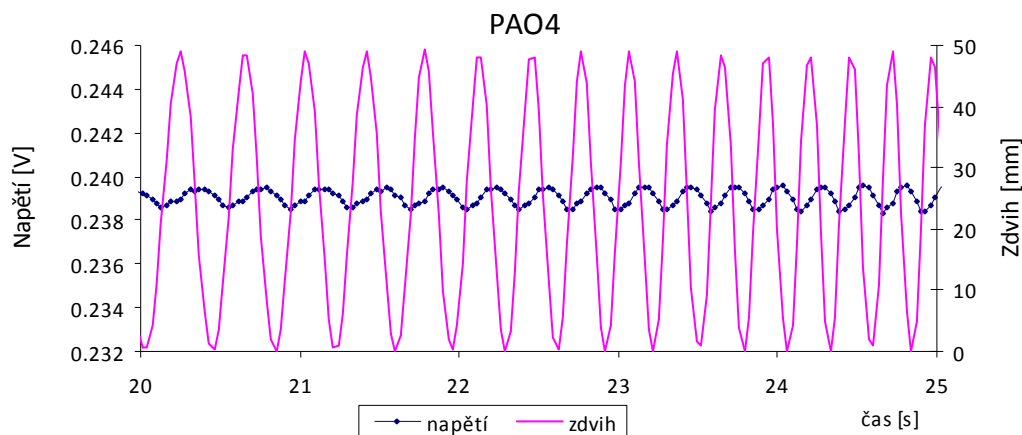
Po podrobné analýze naměřených dat během první trvanlivostní zkoušky byl zaveden nový diagnostický parametr „míra pulzací“, pomocí kterého lze stanovit provozní stav MR kapaliny. V průběhu zkoušky se zvětšovalo pulsování napětí na cívce pístu reometru až na konci zkoušky toto pulzování dosahovalo téměř 20% střední hodnoty napětí (obr. 6.41).



Obr. 6.41 Pulsace napětí na konci trvanlivostní zkoušky – MR kapalina

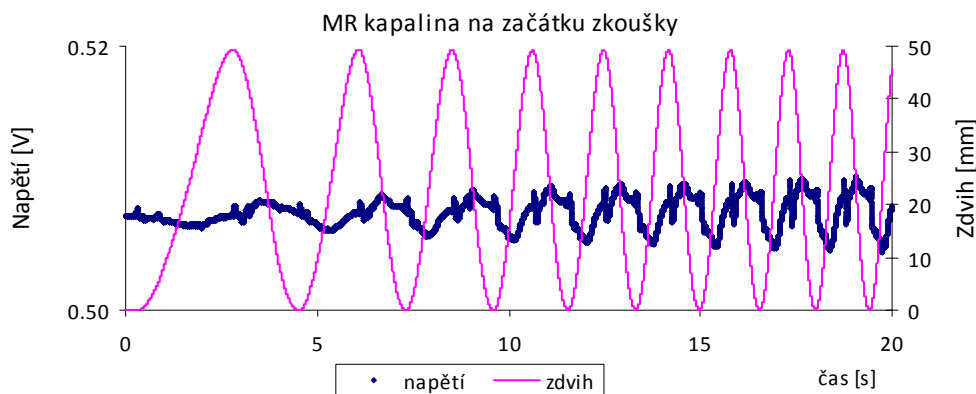
U proudu k žádným pulsacím nedocházelo, protože byl stabilizovaný. Rozsah těchto pulsací byl na začátku zkoušky zcela minimální.

Zpětnou analýzou rozběhových zkoušek bylo zjištěno, že pulsace byly přítomny i při kalibraci reometru základového oleje PAO4 (obr. 6.42). Ovšem v daleko menší míře.



Obr. 6.42 Pulsace napětí při kalibraci reometru – PAO4

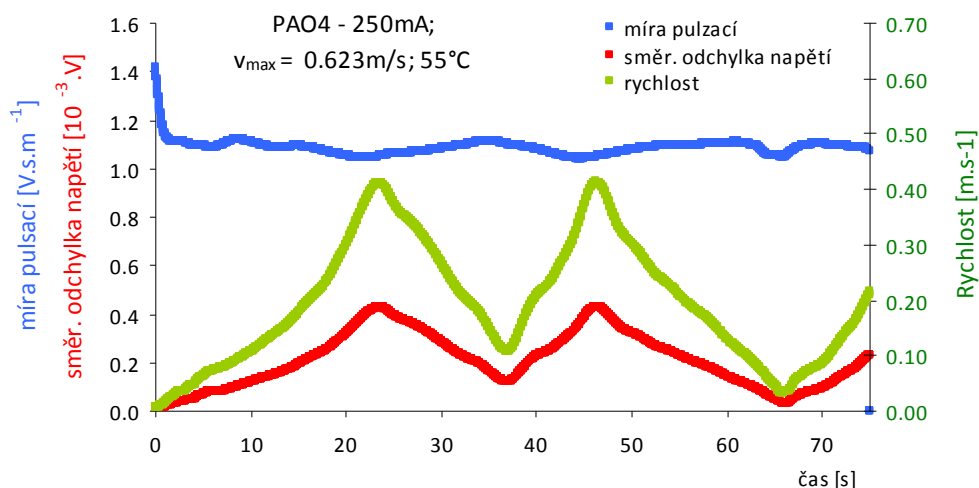
Zatímco u MR kapaliny na konci zkoušky měly pulsace výchylku až 0,1V u PAO4 to bylo o tři řády méně. U nové MR kapaliny (obr. 6.43) byly výchylky napětí 0,007V.



Obr. 6.43 Pulsace napětí na začátku trvanlivostní zkoušky – MR kapalina

U měření s PAO4 byl z důvodu měření teploty pouštěn do pístu proud 250mA. Uvnitř pístu se vytvořilo magnetické pole, které neovlivňovalo chování základového oleje. Pulsace napětí jsou způsobeny indukovaným napětím při pohybu magnetického pole ve feromagnetickém prostředí (hydraulický válec). Tyto pulsace se zvýší změnou permeability prostředí. Ta nastala v případě naplnění reometru MR kapalinou. Relativní permeabilita základového oleje je 1, relativní permeabilita MR kapaliny 140CG je 6-9. Tomu odpovídá cca 7-násobný nárůst míry pulsací (z 0,001 V na 0,007 V). Je možné, že vlivem provozního houstnutí se v aktivní zóně škrťací štěrbině

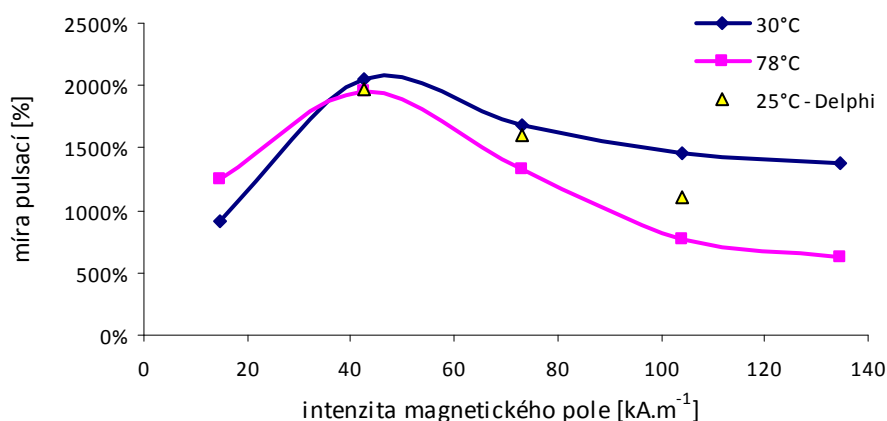
MR ventilu vytvoří shluk částic degradované MR kapaliny, které mají daleko větší permeabilitu než samotná MR kapalina a „zkratují“ magnetický obvod. Velikost indukovaného napětí je závislá na rychlosti viz. obr. 6.44 pro PAO4.



Obr. 6.44 Pulsace napětí v závislosti na max. pístové rychlosti v průběhu rozběhové zkoušky

Rychlost je znázorněna zelenými body a směrodatná odchylka napětí červenými body. Z grafu je zřejmá závislost indukovaného napětí na rychlosti. Poměr indukovaného napětí a rychlosti je konstantní pro danou teplotu, proud v pístu a zvolenou náplň. Tento poměr byl označen jako *míra pulzací*. Napětí bylo vynásobeno 1000, aby výsledky byly lépe čitelné.

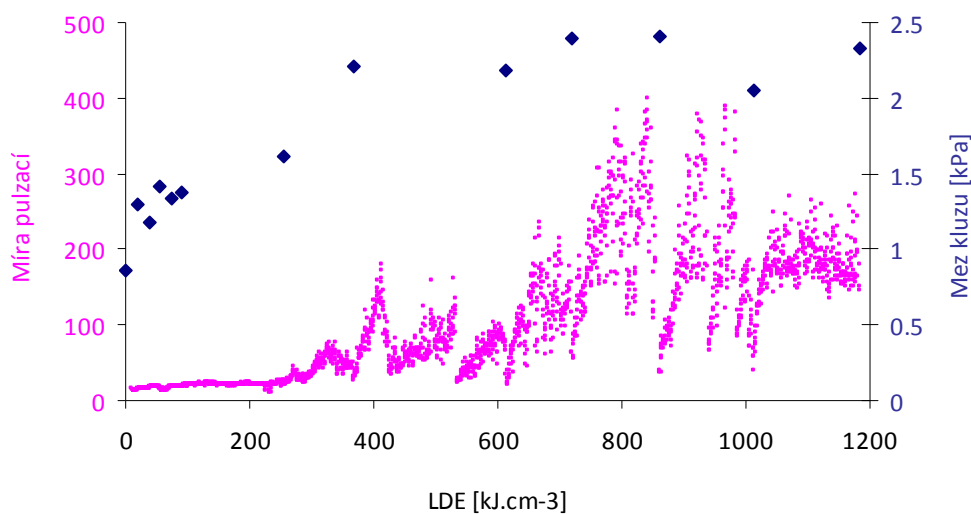
Byla identifikována závislost míry pulzací na teplotě, intenzitě magnetického pole a složení MR kapaliny (graf na obr. 6.45). Jako 100% je brána míra pulzací PAO4 při proudu 0,250A a teplotě 20°C.



Obr. 6.45 Závislost míry pulzací na teplotě, intenzitě magnetického pole a složení MR kapaliny

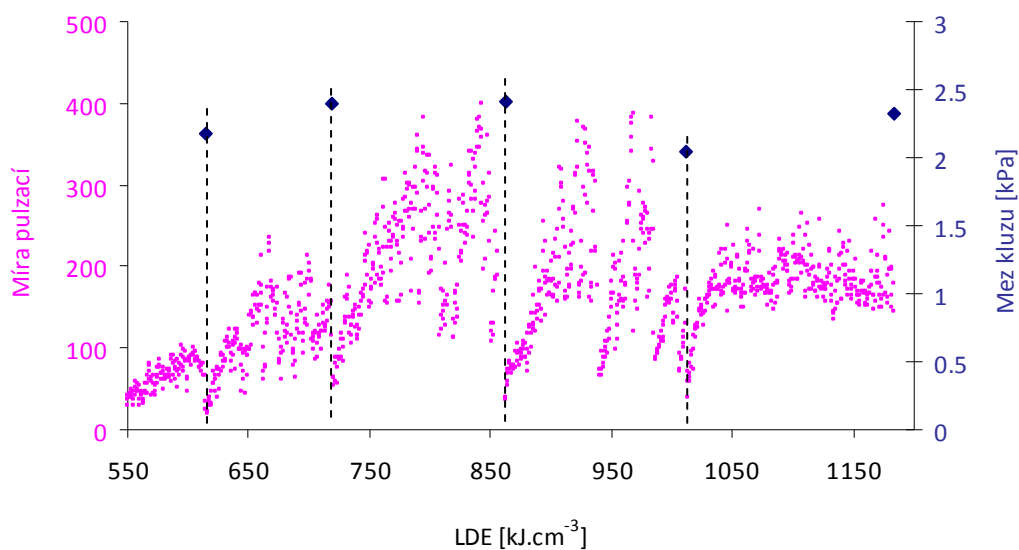
Závislost míry pulsací na složení MR kapaliny je v grafu na obr. 6.45 vidět z polohy žlutých bodů. Tyto body vyjadřují míru pulsací MR kapaliny MRF 132DG, která má menší hmotnostní podíl (72,7 hm.%) železných částic než MR140CG. Závislost míry pulsací na teplotě a intenzitě magnetického pole není úplně zřejmá.

Pulsace byly poprvé zpozorovány na konci první trvanlivostní zkoušky, kdy začaly být výrazné. Proto byl parametr *míra pulsací* kontinuálně sledován až v průběhu druhého trvanlivostního testu. V grafu na obr. 6.46 je průběh míry pulsací ve srovnání s průběhem meze kluzu v neaktivovaném stavu (modré body). Hodnoty míry pulsací jsou zprůměrovány v krocích po 500 J.cm^{-3} . Z průběhu míry pulsací je patrné několik zvláštností a poznatků. Průměrná hodnota míry pulsací se od počátku drží stabilní bez výrazných výchylek. V $\frac{1}{4}$ trvanlivostní zkoušky, tedy při cca 250 kJ.cm^{-3} , se najednou (téměř skokově) tato hodnota zvýší. Další zvláštností je, že v intervalu $600 - 1000 \text{ kJ.cm}^{-3}$ je daleko výraznější rozptyl hodnot. Míra pulsací je více nahodilá než před a po tomto intervalu. Od hodnoty 1000 kJ.cm^{-3} má míra pulsací zase stabilnější, ale daleko vyšší hodnotu než na počátku. Důležitý poznatek je, že projevy navýšení míry pulsací kopírují průběh meze kluzu v neaktivovaném stavu.



Obr. 6.46 Míra pulsací v průběhu druhého trvanlivostního testu

Další poznatek je, že při zastavení zkoušky z důvodu změření charakteristiky MR kapaliny v kontrolním bodě a následném rozjezdu, má míra pulsací téměř stejnou hodnotu jako na začátku zkoušky (obr. 6.47). Dalším zatěžováním ale míra pulsací rychle vzroste na původní hodnoty.



Obr. 6.47 Míra pulsací v průběhu druhého trvanlivostního testu (zoom x-osové osy)

Hodnota *míra pulsací* by v budoucnu mohl sloužit jako diagnostická veličina provozního stavu MR kapaliny v lineárních MR zařízeních. Je zde ovšem již zmíněné nevysvětlené chování míry pulsací v některých okamžicích, na které by ovšem další navazující výzkum mohl podat odpovědi.

7. ZÁVĚR

7.1 Splnění cílů práce

Na následujících řádcích je v bodech detailně popsáno splnění jednotlivých hlavních a vedlejších cílů této práce.

Hlavní cíle:

- Byly určeny měnící se parametry Binghamského modelu v průběhu dlouhodobého zatěžování (viskozita, mez kluzu) při vysokých smykových rychlostech ($10\,000 \div 28\,000 \text{ s}^{-1}$), což nebylo ještě publikováno.
- V neaktivovaném stavu byl popsán pokles viskozity v průběhu dlouhodobého zatěžování až o 36% a to v intervalu LDE $9\,000 \div 20\,370 \text{ J.cm}^{-3}$ z celkových $1\,184\,000 \text{ J.cm}^{-3}$
- Bylo ověřeno, že pokles viskozity v neaktivovaném stavu je nezávislý na teplotě zatěžování (střední teploty zatěžování 55 a 70°C).
- V neaktivovaném stavu byl zjištěn až 4,6násobný růst meze kluzu vůči své počáteční hodnotě.
- Byla zjištěna závislost růstu meze kluzu na teplotě zatěžování. Při zatěžování při střední teplotě 55°C byl růst meze kluzu výraznější než při teplotě 70°C. Tento jev byl pravděpodobně způsoben větším mechanickým zatížením při nižší teplotě (vyšší viskozita – vyšší zatížení).
- Byla popsána závislost meze kluzu v neaktivovaném stavu na teplotě. Nová MR kapalina vykazovala na počátku nezávislost meze kluzu na teplotě, ale v průběhu dlouhodobého zatěžování se tato závislost začala projevovat čím dál silněji. Na konci zkoušky byla mez kluzu při 20°C téměř dvojnásobná oproti mezi kluzu při 70°C.
- V aktivovaném stavu byla ověřena nezávislost meze kluzu na teplotě.
- V průběhu dlouhodobého zatěžování byl zjištěn pokles MR efektu až o 41%.
- V průběhu dlouhodobého zatěžování byl zjištěn celkový pokles efektivní hodnoty síly v plně aktivovaném stavu až o 14%. Z hodnoty síly při konstantní rychlosti pulsátoru není možné separovat mez kluzu a viskozitní složku síly. Proto je u síly pokles méně výraznější než u meze kluzu.

Vedlejší cíle práce:

- Byl stanoven vhodný parametr pro sledování změny provozního stavu MR kapaliny. Tento parametr byl označen jako *míra pulzací* a je to poměr mezi výchylkami napájecího napětí cívky a pístovou rychlostí. Výchylky napětí jsou způsobeny indukovaným napětím při pohybu magnetického pole ve feromagnetickém prostředí.
- Byl zaznamenán skokový nárůst výchylky míry pulsací při LDE 250 000 J.cm⁻³, tj. cca v jedné pětině zkoušky.
- Byly zpřesněny parametry nové MR kapaliny udávané výrobcem a v mnoha ohledech zpřesněny:
 - ověření složení MR kapaliny (chemický rozbor a FTIR analýza nosné složky, chemická mikroanalýza železných částic)
 - zpřesněny údaje o velikosti Fe částic a proveden statický rozbor rozložení velikostí částic
 - ověření hmotnostního a objemového zastoupení jednotlivých složek MR kapaliny
 - ověřena sedimentace MR kapaliny v průběhu 2355 hodin
 - změřena a zkorigována výrobcem udávaná zdánlivá viskozita a smykové napětí při 800 s⁻¹
- Byla popsána tepelná degradace nové MR kapaliny, její projevy a tendence změny chování při různých teplotách a různých dobách expozice.

Dílčí cíle:

- Bylo navrženo a úspěšně odzkoušeno experimentální zařízení pro měření tokových křivek a dlouhodobé zatěžování (reometrická zatěžovací jednotka - patent).
- Byla navržena a úspěšně odzkoušena metoda měření teploty uvnitř pístu pomocí závislosti odporu cívky na teplotě.
- Byl vyvinut SW pro analýzu tokových křivek včetně navržené metodiky měření a vyhodnocování
- Byla ověřena vhodnost použití Binghamského modelu pro popis chování MR kapaliny

7.2 Praktický význam dosažených výsledků

Dosažené výsledky lze nejlépe uplatnit v oblasti regulačních algoritmů MR zařízení a návrhu nového MR zařízení. V následujících bodech je sepsán výčet praktického využití a významu dosažených výsledků:

- Zahrnutím modelu chování MR kapaliny v průběhu dlouhodobého zatěžování lze přesněji predikovat MR zařízení na zásahy regulace.
- Snižováním MR efektu v průběhu dlouhodobého zatěžování a naopak růst meze kluzu v neaktivovaném stavu vede k výraznému poklesu dynamického rozsahu regulace, čímž se regulační algoritmus může snadno dostat mimo své meze.
- Díky modelu chování MR kapaliny v průběhu dlouhodobého zatěžování lze již při návrhu počítat se změnou vlastností MR kapaliny a s ohledem na to vhodně MR zařízení dimenzovat.
- Výsledky jsou vyhodnoceny a prezentovány v podmínkách odpovídající skutečnému provozu lineárních MR zařízení.
- Byl navržen diagnostický parametr „míra pulsací“, kterým lze bezdemontážně a on-line stanovit provozní stav MR kapaliny. Výhodou je, že tento parametr ke svému vyčíslení využívá veličiny, které je s ohledem na semi-aktivní regulaci nutné měřit. Nejsou tedy nutné další přídavné senzory, které by tuto technologii prodražovaly.

7.3 Další doporučení pro rozšíření výzkumu

Výzkum v oblasti dlouhodobého zatěžování MR kapaliny lze rozšířit ještě v několika ohledech:

- Přesný popis poklesu viskozity hned v počátku dlouhodobého zatěžování a vysvětlení příčin.
- Není zcela vyjasněna příčina tepelné degradace nové MR kapaliny. Zatím je vyslovena hypotéza, že příčinou je vliv velkého množství aditiv, především disperzantů.
- Zajímavé výsledky by mohl přinést výzkum změny reakční doby MR kapaliny při dlouhodobém zatěžování na skokovou změnu intenzity magnetického pole.

LITERATURA

- [1] GONCALVES, F.D, *Characterizing the Behavior of Magnetorheological Fluids at High Velocities and High Shear Rates*. Virginia-Blacksburg, 2005, 103 s. Disertační práce na Faculty of the Virginia Polytechnic Institute. Vedoucí disertační práce Dr. Mehdi Ahmadian.
- [2] *LORD Corporation - Adhesives, Coatings, Vibration and Motion Control, and Magnetically Responsive* [online]. Dostupné z URL: <<http://www.lord.com>> [cit. 19.7.2011].
- [3] RABINOW, J. The magnetic fluid clutch. *AIEE Trans.*, 1948, vol. 67, s. 1308.
- [4] CARLSON, J.D. Critical factors for MR fluids in vehicle systems. *International Journal of Vehicle Design*, 2003, vol. 33, nos. 1,2,3, s. 207-217.
- [5] NOVÁČEK, V. *Technologie výroby Magnetoreologických kapalin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 40 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jakub Roupec.
- [6] ULICNY, J. C., MANCE, A. M. Evaluation of electroless nickel surface treatment for iron powder used in MR fluids, *Materials Science and Engineering A*, March 2004, vol. 369, no.1-2, s. 309-313.
- [7] CAO, Z., JIANG, W., YE, X., GONG, X. Preparation of superparamagnetic Fe₃O₄/PMMA nanocomposites and their magnetorheological characteristics, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, January 2008, vol. 320, no. 2, s. 1499-1502.
- [8] PU, H., JIANG, F., YANG, Z. Preparation and properties of soft magnetic particles based on Fe₃O₄ and hollow polystyrene microsphere composite, *Materials Chemistry and Physics*, November 2006, vol. 100, no. 1, s. 10-14.
- [9] JEONG-HOI, K. *Using Magnetorheological Dampers in Semiactive Tuned Vibration Absorbers to Control Structural Vibrations*. Virginia-Blacksburg, 2003. 160 s. Disertační práce na Faculty of the Virginia Polytechnic Institute. Vedoucí disertační práce Dr. Mehdi Ahmadian.
- [10] WEISS, K. D., et. al. High strength magneto – and electro – rheological fluids. *Society of Automotive Engineers*, September 1993, Paper no. 932451.
- [11] CARLSON, J. D., WEISS, K. D. A growing attraction to magnetic fluids. *Machine Design*, August 1994, vol. 66, no. 15, s. 61-64. ISSN: 0024-9114.

- [12] NOSKIEVIČ, J. a kol., *Mechanika tekutin*. 1. vyd. Praha: SNTL/ALFA, 1987. 199 s.
- [13] CARLSON, J. D., JOLLY, M. R. MR fluid, foam and elastomer devices. *Mechatronics*, June-August 2000, vol. 10, nos. 4-5, p. 555-569.
- [14] CROSBY, M. J., KARNOPP, D. C. The active damper. *The Shock and Vibration Bulletin*, 1973, vol. 43, p. 119-133.
- [15] KARNOPP, D. C., CROSBY, M. J. *System for controlling the transmission of energy between spaced members*. April 1974, USA. Patentový spis 3807678.
- [16] LEE, H. S., CHOI, S. B. Control and response characteristics of a magnetorheological fluid damper for passenger vehicles. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Januar 2000, vol. 11, no. 1, s. 80-87.
- [17] SIMON, D. E. *An investigation of the effectiveness of skyhook suspensions for controlling roll dynamics of sport utility vehicles using magnetorheological dampers*. Virginia-Blacksburg, 2001, 211 s. Disertační práce na Virginia Polytechnic Institute. Vedoucí disertační práce Dr. Mehdi Ahmadian.
- [18] SONG, X., AHMADIAN, M., SOUTHWARD, S. C. An adaptive semiactive control algorithm for magnetorheological suspension systems. *Journal of Vibration and acoustics-transactions of the ASME*, October 2005, vol. 127, no. 5, s. 493-502.
- [19] PUND, D., et. al. The New Cars: Charting the Changes for 2002, *Car & Driver*, October 2001, vol. 47, no. 4, s. 62.
- [20] GEHM, R. Delphi Improves Cadillac's Ride. *Automotive Engineering International*, October 2001, vol. 109, no. 10, s. 32-33.
- [21] *Magnetorheological fluid - Wikipedia, the free encyclopedia*, URL: <http://en.wikipedia.org/wiki/Magnetorheological_fluid> [cit. 20.7.2011].
- [22] HALVERSON, H. *Magnetic Ride - Star Wars Meets the 50th Car*. Dostupné z URL: <<http://www.corvetteactioncenter.com>> [cit. 25.7.2011].
- [23] NGUYEN, Q. H., et al. An analytical method for optimal design of MR valve structures. *Smart Materials and Structures*, September 2009, vol. 18, no. 9. ISSN: 0964-1726.
- [24] NGUYEN, Q. H., CHOI, S. B. Optimal design of MR shock absorber and application to vehicle suspension. *Smart Materials and Structures*, March 2009, vol. 18, no. 3. ISSN: 0964-1726.

- [25] WANG, D.H., BAI, X.X., LIAO, W.H. An integrated relative displacement self-sensing magnetorheological damper: prototyping and testing. *Smart Materials and Structures*, October 2010, vol. 19, no. 10. ISSN: 0964-1726.
- [26] AYDAR, G., WANG, X., GORDANINEJAD, F. A novel two-way-controllable magneto-rheological fluid damper. *Smart Materials and Structures*, June 2010, vol. 19, no. 6. ISSN: 0964-1726.
- [27] SEONG, M.S., CHOI, S.B., HAN, Y.M. Damping force control of a vehicle MR damper using a Preisach hysteretic compensator. *Smart Materials and Structures*, July 2009, vol. 18, no. 7. ISSN: 0964-1726.
- [28] Lord Rheonetic Magnetically Responsive Technology, *MR Damper RD-1005-3*, Product Bulletin, 2003.
- [29] CARLSON, J. D., CATANZARITE, D. M., StCLAIR, K. A. Commercial magneto-rheological fluid devices. *International journal of modern physics B*, October 1996, vol. 10, no. 23-24, s. 2857-2865. ISSN: 0217-9792.
- [30] WU, X., GRIFFIN, M. J. A semi-active control policy to reduce the occurrence and severity of end-stop impacts in a suspension seat with and electrorheological fluid damper. *Journal of Sound and Vibration*, June 1997, vol. 203, no. 5, s. 781-793. ISSN: 0022-460X.
- [31] CHOI, S. B., NAM, M. H., LEE, B. K. Vibration control of MR seat damper for commercial vehicles. *Journal of Intelligent Materials System and Structures*, December 2000, vol. 11, no. 12, s. 936-944. ISSN: 1045-389X.
- [32] McMANUS, S. J., et al. Evaluation of vibration and shock attenuation performance of a suspension seat with a semi-active magnetorheological fluid damper. *Journal of Sound and Vibration*, May 2002, vol. 253, no. 1, p. 313-327. ISSN: 0022-460X.
- [33] CHOI, Y. T., WERELEY, N. M. Mitigation of biodynamic response to vibratory and blast-induced shock loads using magnetorheological seat suspensions. In *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D-Journal of Automobile Engineering*, 43313, June 2003, vol. 219, no. D6, s. 741-753. ISSN: 0954-4070.
- [34] LORD CORPORATION, *School Transportation Officials in Six States Adopt LORD Corporation's Driver Seat System for Bus Safety*. Press Release, August 2001.

- [35] DYKE, S. J., et al. Modeling and control of magnetorheological dampers for seismic response reduction. *Smart Materials and Structures*, October 1996, vol. 5, no. 5, p. 565-575. ISSN: 0964-1726.
- [36] DYKE, S. J., et al. An experimental study of MR dampers for seismic protection. *Smart Materials and Structures*, October 1998, vol. 7, no. 5, p. 693-703. ISSN: 0964-1726.
- [37] CARLSON, J. D., SPENCER Jr., B. F. Magnetorheological fluid dampers for seismic control. In *Proceedings of DETC*, Sacramento, CA, 1997, s. 29.
- [38] YANG, G., et al. Large-scale MR fluid dampers: modeling and dynamic performance considerations. *Engineering Structures*, March 2002, vol. 24, no. 3, s. 309-323. ISSN: 0141-0296.
- [39] CHEN, Ch., et al. Experimental evaluation of an adaptive inverse compensation technique for real-time simulation of a large-scale magneto-rheological fluid damper. *Smart Materials and Structures*, February 2010, vol. 19, no. 2, s. ISSN: 0964-1726.
- [40] NI, J. M., et al. Implementation of MR dampers to Dongting lake bridge for cable vibration mitigation. In *Proceedings of the 3rd World Conference on Structural Control*. Como, Italy, 2002. s. 777-786.
- [41] NI, Y. Q., et al. Optimal voltage/current input to ER/MR dampers for multi-switch control of stay cable vibration. In *Proceedings of the 3rd World Conference on Structural Control*. Como, Italy, 2002. s. 777-786.
- [42] LORD CORPORATION, *LORD Corporation Supplies 320 MR Fluid Dampers for Cable-Stayed Bridge Retrofit to Control Wind Vibration*. Press Release, March 2002.
- [43] KIM, I.H., JUNG, H.J, KOO, J.H. Experimental evaluation of a self-powered smart damping system in reducing vibrations of a full-scale stay cable, *Smart Materials and Structures*, November 2010, vol. 19, no. 11. ISSN: 0964-1726.
- [44] BIEDERMANN MOTECH GmbH&Co. KG [online], Dostupné z URL: <<http://www.biedermann.com>> [cit. 17.7.2011].
- [45] LORD CORPORATION [online], Dostupné z URL: <<http://www.lord.com>> [cit. 19.7.2011].
- [46] CARLSON, J. D., MATTHIS, W., TOSCANO, J. R., Smart prosthetics based on magnetorheological fluids. In *Proceedings of SPIE, Smart Structures and Materials 2001: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures*

- Technologies*, 5. March 2001. Newport Beach, CA, USA, 2001. vol. 4332, s. 308-316.
- [47] Lord Rheonetic Magnetically Responsive Technology, MR Brake MRB-2107-3, *Product Bulletin*, 2003.
- [48] LORD CORPORATION, *Designing with MR Fluids*. Engineering Note – Lord Corporation, 1999.
- [49] CHENG Hai-Bin. Stability and anti-oxidization of aqueous MR fluids improved by modifying iron particle surface with organic molecule. *Acta Physico-Chimica Sinica*, October 2008, vol. 24, no. 10, p. 1869-1874.
- [50] FANG, F.F., BYUNG, I.CH., CHOI, H.J. Magnetorheological characteristics of carbon nanotube wrapped carbonyl iron particles. *Journal of Physics: Conference series*, March 2009, vol. 149, no. 1, Artical no. 012047.
- [51] BOMBARD, A.J.F., et al. Magneto-rheological fluids redispersibility - a factorial design study of phosphate shell on carbonyl iron powder with dispersing additives. *Journal of Physics: Conference series*, March 2009, vol. 149, no. 1, Artical no. 012036.
- [52] LITA, M., HAN, A., SUSAN-RESIGA, D. Characterization of sedimentation and high magnetic field flow behavior of some magnetorheological fluids. *Journal of Physics: Conference series*, March 2009, vol. 149, no. 1, Artical no. 012071.
- [53] CHENG, H.B. et al. Effect of storage and ball milling on the sedimentation and rheology of a novel magnetorheological fluid, *Journal of Physics: Conference series*, March 2009, vol. 149, no. 1, Artical no. 012043.
- [54] HIEMENZ, G., CHOI, Y.T., WERELEY, N.M. Semi-active control of a vertical stroking helicopter crew seat for enhanced crashworthiness. *AIAA Journal of Aircraft*. May-June 2007, vol. 44, no. 3, s. 1031–1034.
- [55] CARLSON, J.D. What makes a Good MR fluid? *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, July 2002, vol. 13, no. 7-8, p. 431-435.
- [56] 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.
- [57] SUNKARA, S.R., et al. Iron oxidation and its impact on MR behavior. *Journal of Physics: Conference series*, March 2009, vol. 149, no. 1, Artical no. 012081.

- [58] WEITZLAB RHEOMETERS - ARES [online]. URL: http://weitzlab.seas.harvard.edu/Rheo_page/bohlin/index.html [cit. 2.2.2011].
- [59] ANTON PAAR GmbH – AUSTRIA. *Rheometer, Refractometer, Viscometer, Polarimeter, Density Meter...*; *Anton Paar.com* [online]. URL: <http://www.anton-paar.com/001/en/60/47> [cit. 10.5.2010].
- [60] GONCALVES, F.D., AHMADIAN, M., CARLSON, J.D. Investigating the magnetorheological effect at high flow velocities, *Smart Materials and Structures*, February 2006, vol. 15, no. 1, s. 75-85.
- [61] ŠINDELÁŘ, M. *Sledování technického stavu závěsu kola vozidla*. 2008, 67 s. Disertační práce na Ústavu konstruování, Fakultě strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně. Vedoucí disertační práce doc. Ing. Ivan Mazůrek, CSc.
- [62] SEDLÁČEK, J., STEINBAUER, M. *Magnetické obvody – přednáška*, Dostupné na: Ústav teoretické a experimentální elektrotechniky, 8.12.2008 [cit. 20.7.2011].

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

τ	[Pa]	- smykové napětí
η	[Pa.s]	- dynamická viskozita
du	[m.s ⁻¹]	- relativní rychlost pohybu smykových rovin
D	[s ⁻¹]	- gradient rychlosti
γ'	[s ⁻¹]	- smykový spád
τ_0	[Pa]	- mez kluzu
τ_y	[Pa]	- mez kluzu
ϕ	[Wb]	- magnetický tok
M_s	[T]	- hodnota magnetického nasycení
M_R	[T]	- hodnota magnetické remanence
H_{coe}	[A.m ⁻¹]	- hodnota koercitivního pole
LDE	[J.cm ⁻³]	- Life Dissipated Energy
V	[m ³]	- objem MR kapaliny
P	[W]	- mechanický výkon
R	[Ω]	- odpor cívky tlumiče
t	[°C]	- teplota
I	[A]	- napájecí proud cívky pístu
U	[V]	- napájecí napětí na vývodech cívky pístu
K	[°C. Ω^{-1}]	- násobný koeficient kalibrační přímky teploty
Q	[°C]	- offset kalibrační přímky teploty
k_1	[°C. Ω^{-1} .I ⁻²]	- koeficient regresního polynomu 2. řádu pro koeficient K
k_2	[°C. Ω^{-1} .I ⁻¹]	- koeficient regresního polynomu 2. řádu pro koeficient K
k_3	[°C. Ω^{-1}]	- koeficient regresního polynomu 2. řádu pro koeficient K
q_1	[°C.I ⁻²]	- koeficient regresního polynomu 2. řádu pro koeficient Q
q_2	[°C.I ⁻¹]	- koeficient regresního polynomu 2. řádu pro koeficient Q
q_3	[°C]	- koeficient regresního polynomu 2. řádu pro koeficient Q
μ	[H.m ⁻¹]	- absolutní permeabilita
μ_0	[H.m ⁻¹]	- magnetická konstanta (permeabilita vakua)
μ_r	[-]	- relativní permeabilita
B	[T]	- magnetická indukce
H	[A.m ⁻¹]	- intenzita magnetického pole
F	[N]	- síla vyvozená reometrem
v	[m.s ⁻¹]	- rychlost pístu reometru
Δp	[Pa]	- celkový tlakový spád ve škrtící štěrbíně reometru
Δp_η	[Pa]	- tlakový spád generovaný viskozitní částí
Δp_τ	[Pa]	- tlakový spád generovaný částí meze kluzu

h	[m]	- tloušťka škrťící štěrbinu reometru
b	[m]	- šířka škrťící štěrbinu reometru
l	[m]	- celková délka škrťící štěrbinu reometru
Q	[m ³ .s ⁻¹]	- objemový průtok MR kapaliny škrťící štěrbinou
v_s	[m.s ⁻¹]	- střední rychlost rychlostního profilu
S_t	[m ²]	- třecí plochy ve škrťící štěrbině
h_1	[m]	- tloušťka škrťící štěrbinu v aktivní zóně
l_1	[m]	- délka škrťící štěrbinu v aktivní zóně
h_2	[m]	- tloušťka škrťící štěrbinu mimo aktivní zónu
l_2	[m]	- délka škrťící štěrbinu mimo aktivní zónu
H_1	[A.m ⁻¹]	- intenzita magnetické pole v aktivní zóně škrťící štěrbinu
H_2	[A.m ⁻¹]	- intenzita magnetické pole mimo aktivní zónu
k_h	[-]	- koeficient poklesu magnetického pole mimo aktivní zónu
v_p	[m.s ⁻¹]	- okamžitá rychlost pístu reometru
S_p	[m ²]	- činná plocha pístu reometru
S_s	[m ²]	- plocha škrťící štěrbinu
τ_m	[Pa]	- nekorigovaná mez kluzu
η_m	[Pa.s]	- nekorigovaná dynamická viskozita
Δt	[°C]	- rozpětí teploty MR kapaliny během rozběhové zkoušky
ρ	[kg.m ⁻³]	- hustota

CI	<i>Carbonyl Iron</i>
EMI	Elektromagnetické indukční zařízení
EPMA	<i>Electron Probe Micro-Analyzer</i>
FTIR	<i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i>
GM	General Motors
IGF	<i>Inert Gas Fusion</i>
IUT	<i>In-Use-Thickening</i>
MR	magnetoreologický
MTS	<i>Material Test System</i>
NI	National Instruments
PAO	polyalfaolefin
RTG	rentgenové záření
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
SEM	<i>Scanning Electron Microscopy</i>
SW	software
XML	<i>Extensible Markup Language</i>

SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 1.1 Tlumič Motion Master od firmy Lord Corporation [2]	13
Obr. 2.1 Snímek železných částic pod elektronovým mikroskopem	17
Obr. 2.2 Částice karbonylu železa s niklovým povlakem [6]	17
Obr. 2.3 Aktivace MR kapaliny: (a) bez mag. pole; (b) s mag. polem; (c) plně zřetěžené částice [9]	18
Obr. 2.4 Rychlostní profil toku kapaliny mezi pohyblivou a nepohyblivou deskou [12]	18
Obr. 2.5 Toková a viskozitní křivka	19
Obr. 2.6 Možné příčiny změny viskozity neneutonských kapalin [12]	19
Obr. 2.7 Tokové a viskozitní charakteristiky některých neneutonských kapalin [12]	20
Obr. 2.8 Nejčastěji používané modely popisující chování MR kapaliny [1]	21
Obr. 2.9 Zatěžovací módy MR kapaliny (a) ventilový; (b) smykový; (c) tahovo-tlakový [13]	22
Obr. 2.10 Řez pístem předního tlumiče z Audi TT (Roupec)	23
Obr. 2.11 Systému Magnetic Selective Ride Control na modelu Chevrolet Corvette C5 [22]	23
Obr. 2.12 Proudová charakteristika tlumiče Delphi pro Audi TT (vlastní měření)	24
Obr. 2.13 Schematická konstrukce optimalizovaného (a) MR ventilu; (b) MR tlumiče [23]	24
Obr. 2.14 MR ventil s axiálním uspořádáním (vlevo); sestava tlumící jednotky (vpravo) [26]	25
Obr. 2.15 Částečný řez schématickým zobrazením seizmického tlumiče od firmy Lord [37]	26
Obr. 2.16 Experimentální sestava pro real-time testy MR tlumiče [39]	26
Obr. 2.17 „Smart damping system“ instalovaný na mostovém lanu [43]	27
Obr. 2.18 Nožní protéza od firmy Biedermann Motech [42]	27
Obr. 2.19 MR brzda RD-2087 od firmy Lord Corporation [45]	28
Obr. 2.20 Sedimentace po 1,2,3 a 4 týdnech a hustota sedimentu [52]	29
Obr. 2.21 Sedimentace MR kapaliny MRF-140WUT [53]	30
Obr. 2.22 Nárůst síly v neaktivovaném stavu při dlouhodobém zatěžování [4]	31
Obr. 2.23 Historický vývoj MR kapalin firmy LORD – závislost síly na počtu cyklů [55]	31
Obr. 2.24 Viskozita v neaktivovaném stavu s přidáními nanočásticemi [55]	32
Obr. 2.25 SEM snímek výbrusu železných částic (vlevo) nové částice; (vpravo) po 540 hod. [56] ...	33
Obr. 2.26 Snímky koncentrace kyslíku v železných částicích nové MR kapaliny a zatěžované [56] .	34
Obr. 2.27 Výstupní ot. MR spojky při konst. vstupních ot. v průběhu trvanlivostního testu [56]	35
Obr. 2.28 Rozsahu oxidace železných částic (vlevo), vliv stupně oxidace na mez kluzu [57]	36
Obr. 5.1 (a) Physica MCR 300 - Anton Paar [59]; (b) <i>Slit-flow</i> reometr [60]	39
Obr. 5.2 Řez předním tlumičem typu McPherson Delphi MagneticRide	40
Obr. 5.3 Řez reometrem Dolfus	41
Obr. 5.4 Stanice Gillop se zabudovaným reometrem Dolfus	42
Obr. 5.5 Řez pístem	43
Obr. 5.6 Zjednodušené schéma pístu	43
Obr. 5.7 Ucpávka	44
Obr. 5.8 Plovoucí píst s odvodušňovacím šroubem	45

Obr. 5.9 Umístění teploměrů při kalibraci cívky	46
Obr. 5.10 Odpor cívky při ohřevu a chladnutí (vlevo); závislost odporu na teplotě (vpravo)	46
Obr. 5.11 Závislost koeficientů K a Q na proudu I	47
Obr. 5.12 Magnetometr F.W.Bell 5070 (vlevo); rozložení magnetické indukce (vpravo).....	48
Obr. 5.13 Závislost intenzity magnetického pole na budícím proudu.....	49
Obr. 5.14 Stabilizovaný zdroj MN 40V-10A.....	49
Obr. 5.15 Detail na (a) siloměr HBM U2AD1; (b) indukčnostní snímač polohy SD2	50
Obr. 5.16 Detail na (a) napájení cívky – měření napětí; (b) bočník; (c) měření otáček pulsátoru	50
Obr. 5.17 DEWE 800 (a) stanice na měřicím pracovišti; (b) rack se zesilovacími moduly.....	51
Obr. 5.18 Maska programu Datalogger.....	52
Obr. 5.19 Maska měřicího programu Dewesoftu.....	53
Obr. 5.20 Průtok kapaliny mezerou	55
Obr. 5.21 Zjednodušené schéma pístové skupiny s definovanými rozměry	58
Obr. 5.22 (a) naměřená množina bodů ; (b) vybrané body síly s nulovým zrychlením pístnice.....	58
Obr. 5.23 (a) množina bodů s vyrovnanou četností; (b) Binghamský model MR kapaliny ($t=35^{\circ}\text{C}$,...)	59
Obr. 5.24 (a) Viskozitní křivky etalonových olejů; (b) rotační viskozimetr RotoVisco	60
Obr. 5.25 (a) Průběh smykového tření; (b) Závislost smykového tření na vnitřním tlaku reometru ...	61
Obr. 5.26 Maska programu MultiVisco	62
Obr. 5.27 Dialogové okno pro načtení analyzovaného souboru	63
Obr. 5.28 Dialogové okno pro nastavení zesilovacích modulů Dewetronu	64
Obr. 5.29 Diagram průběhu životnostní zkoušky	64
Obr. 5.30 Kontrolní body obou trvanlivostních zkoušek	67
Obr. 5.31 Naměřená toková křivka a její polynomická regresní křivka (nízké smykové spády).....	68
Obr. 5.32 Naměřená toková křivka a její mocninná regresní křivka (nízké smykové spády).....	69
Obr. 5.33 Extrapolovaná toková křivka z naměřených dat (fialově)	69
Obr. 5.34 Extrapolovaná toková křivka v intervalu 2 600 až 35 000 s^{-1}	70
Obr. 5.35 Extrapolovaná toková křivka v intervalu 5 000 až 35 000 s^{-1}	70
Obr. 5.36 Extrapolovaná toková křivka v intervalu 10 000 až 35 000 s^{-1}	71
Obr. 5.37 Extrapolovaná toková křivka v intervalu 10 000 až 25 000 s^{-1}	71
Obr. 5.38 Procentuální pokles viskozity při růstu teploty o Δt	72
Obr. 5.39 (a) Rotační viskozimetr RotoVisco s chlazením; (b) měřicí senzor Z20 DIN Ti.....	73
Obr. 6.1 Toková křivka MRF 140CG v neaktivovaném stavu.....	74
Obr. 6.2 B-H křivka sycení MRF 140CG	75
Obr. 6.3 Závislost meze kluzu na intenzitě magnetického pole	75
Obr. 6.4 Snímek Fe částic z rastrovacího elektronového mikroskopu	76
Obr. 6.5 Sediment a separovaná nosná kapalina (a) MRF 140CG; (b) MR kapalina za 2 hod.....	77
Obr. 6.6 Výsledky sedimentace nové kapaliny MRF 140CG (růžové body – % podíl sedimentu).....	77
Obr. 6.7 Odebraná nosná kapalina	78
Obr. 6.8 Nosná kapalina (a) závislost viskozity na teplotě při $\dot{\gamma}=800 \text{ s}^{-1}$; (b) sweep při $t=23^{\circ}\text{C}$	78
Obr. 6.9 MR kapalina 140CG (a) závislost viskozity na teplotě; (b) sweep při teplotě $22,5^{\circ}\text{C}$	79

Obr. 6.10 MR kapalina 140CG (a) po temperaci na $t=150^{\circ}\text{C}$ po 2hod; (b) po krátkém rozmíchání ...	80
Obr. 6.11 Tokové křivky nerozmíchaných vzorků MR kapaliny po tepelném zatížení	81
Obr. 6.12 Tokové křivky 1x rozmíchaných vzorků MR kapaliny po tepelném zatížení	81
Obr. 6.13 Viskozita nové MR kapaliny 140CG před (a) první zkouškou; (b) druhou zkouškou	82
Obr. 6.14 Porovnání viskozitních křivek měřených na RotoVisco a Dolfusu	83
Obr. 6.15 Mez kluzu před (a) první zkouškou; (b) druhou zkouškou.....	83
Obr. 6.16 Závislost meze kluzu MR kapaliny v aktivovaném stavu na teplotě a proudu.....	84
Obr. 6.17 Závislost meze kluzu na intenzitě magnetického pole.....	85
Obr. 6.18 Prezentace tepelné degradace při vysokých smykových spádech	86
Obr. 6.19 Změna charakteru tokových křivek na začátku a na konci trvanlivostní zkoušky.....	86
Obr. 6.20 Konzistence MR kapaliny před začátkem a na konci trvanlivostní zkoušky.....	87
Obr. 6.21 Viskozita v průběhu první trvanlivostní zkoušky.....	87
Obr. 6.22 Viskozita v intervalu LDE 90 760 až 1 180 600 $\text{J}\cdot\text{cm}^{-3}$ během první trv. zkoušky	88
Obr. 6.23 Viskozita v průběhu druhé trvanlivostní zkoušky	88
Obr. 6.24 Viskozita v průběhu druhé trvanlivostní zkoušky v intervalu 37 820 až 1 184 350 $\text{J}\cdot\text{cm}^{-3}$..	89
Obr. 6.25 Viskozita MR kapaliny před 1. trv. zkouškou s energetickou rozvahou	89
Obr. 6.26 Viskozita MR kapaliny před 1. trv. zkouškou s energetickou rozvahou	90
Obr. 6.27 Dodatečně naměřená viskozita při 14 440 $\text{J}\cdot\text{cm}^{-3}$ v porovnání s novou MR kapalinou.....	90
Obr. 6.28 Porovnání naměřené viskozity u obou trvanlivostních zkoušek.....	92
Obr. 6.29 Vypočítaná viskozita z regresních průběhu při 40°C u obou zkoušek	92
Obr. 6.30 Výsledky mez kluzu první trvanlivostní zkoušky ($45\text{-}55^{\circ}\text{C}$) pro teplotu 40°C	93
Obr. 6.31 Výsledky mez kluzu první trvanlivostní zkoušky ($45\text{-}55^{\circ}\text{C}$) pro teplotu 50°C	93
Obr. 6.32 Výsledky mez kluzu druhé trvanlivostní zkoušky ($65\text{-}75^{\circ}\text{C}$) pro teplotu 40°C	94
Obr. 6.33 Výsledky mez kluzu druhé trvanlivostní zkoušky ($65\text{-}75^{\circ}\text{C}$) pro teplotu 70°C	94
Obr. 6.34 Mez kluzu obou trvanlivostních zkoušek na provozních teplotách	95
Obr. 6.35 Porovnání mez kluzu obou trvanlivostních zkoušek při teplotě 40°C	95
Obr. 6.36 Průběh meze kluzu v závislosti na teplotě v různých fázích trvanlivostní zkoušky	96
Obr. 6.37 Průběh koeficientu A.....	97
Obr. 6.38 Průběh koeficientu B.....	98
Obr. 6.39 Pokles meze kluzu při 0,5A v průběhu 2. trvanlivostní zkoušky.....	99
Obr. 6.40 Pokles efektivní hodnoty síly v průběhu druhé trvanlivostní zkoušky	100
Obr. 6.41 Pulsace napětí na konci trvanlivostní zkoušky – MR kapalina	101
Obr. 6.42 Pulsace napětí při kalibraci reometru – PAO4	102
Obr. 6.43 Pulsace napětí na začátku trvanlivostní zkoušky – MR kapalina	102
Obr. 6.44 Pulsace napětí v závislosti na max. pístové rychlosti v průběhu rozběhové zkoušky	103
Obr. 6.45 Závislost míry pulsací na teplotě, intenzitě magnetického pole a složení MR kapaliny ...	103
Obr. 6.46 Míra pulsací v průběhu druhého trvanlivostního testu	104
Obr. 6.47 Míra pulsací v průběhu druhého trvanlivostního testu (zoom x-osové osy)	105

SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1 Hmotnostní množství kyslíku u různých vzorků železných částic [56].....	33
Tab. 5.1 Koeficienty regresních přímek závislosti odporu na teplotě.....	46
Tab. 5.2 Koeficienty polynomu 2. řádu (kalibrace teploty).....	47
Tab. 5.3 Seznam snímačů a měřených veličin a k tomu odpovídající moduly v DEWE 800.....	51
Tab. 6.1 Hodnoty MRF 140CG udávané výrobcem	74
Tab. 6.2 Porovnání naměřených hodnot s hodnotami výrobce	79
Tab. 6.3 Koeficienty exponenciální regrese a viskozita pro 40°C	91
Tab. 6.4 Koeficienty regrese meze kluzu při druhé trvanlivostní zkoušce	97
Tab. 6.5 Koeficienty polynomů 2. řádu	98
Tab. 6.6 Pokles meze kluzu v aktivovaném stavu	100
Tab. 6.7 Odhad poklesu meze kluzu při 134 kA.m ⁻¹ v průběhu 2. trvanlivostní zkoušky	101

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: reagujeme na 3. kolo recenze.

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.

KLAPKA, M.; MAZŮREK, I.; ROUPEC, J. Radial flexible bearings suitable stiffness estimation. *MECCANICA*. 2010. 46(2). p. 293 - 302. ISSN 0025-6455.

ČÍŽ, P.; ROUPEC, J.; MAZŮREK, I. Laboratorní simulátor vozovky. In *FSI Junior conference*. 1. Brno, VUT FSI v Brně. 2010. p. 153 - 159. ISBN 978-80-214-4116-3.

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.

MAZŮREK, I.; KLAPKA, M.; ROUPEC, J. Noise Reduction of the Differential Sleeve Bearing. *Engineering Mechanics*. 2009. 16(2). p. 93 - 102. ISSN 1802-1484.

ROUPEC, J.; MAZŮREK, I. Studium a měření tokových křivek magnetoreologických kapalin s pomocí adaptovaného MR hydraulického tlumiče. In *FSI Junior conference 2008*. 1. Brno, VUT FSI v Brně. 2009. p. 120 - 128. ISBN 978-80-214-3834-7.

KLAPKA, M.; ROUPEC, J.; MAZŮREK, I. Evaluation Method of Sleeve Bearing Noise from Vibrations Data. In *International Conference on Fascinating Advancements in Mechanical Engineering Proceedings*. Mepco Engg. College - 626005, Sivakasi, Virudhunagar district, Tamilnadu, India, Mepco Schlenck Engineering College Sivakasi. 2008. p. 483 - 488. ISBN 978-81-907108-0-0.

KLAPKA, M.; ROUPEC, J. Roller bearing fatigue test with help of CAN bus and internet. In *49. Mezinárodní konference kateder částí a mechanismů strojů*. Plzeň, Západočeská univerzita v Plzni. 2008. p. 129 - 132. ISBN 978-80-7043-718-6.

ROUPEC, J.; MAZŮREK, I. The solution of CAN Bus incompatibility. In *31. mezinárodní konference TD 2008 - DIAGON 2008 - Sborník přednášek*. Academia Centrum UTB, Mostní 5139, Zlín, Academia centrum UTB ve Zlíně. 2008. p. 60 - 64. ISBN 978-80-7318-707-1.

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha I – Foto z výměny vzorku v reometru Gillop

Příloha II – FTIR analýza nosné složky MR kapaliny

Příloha III – SEM analýza

Příloha IV – vliv teploty na chování MR kapaliny

Příloha V – Průběh viskozity v 2. trvanlivostní zkoušce

Příloha VI – naměřená mez kluzu v 1. trvanlivostní zkoušce

Příloha VII – naměřená mez kluzu v 2. trvanlivostní zkoušce

PŘÍLOHA I – FOTO Z VÝMĚNY VZORKU V REOMETRU GILLOP



Upnutí reometru před rozebráním



Povolení šroubení (konec bez tlakovacího ventilku)



Vyjmutí úchytu a otevření reometru



Povolení odvzdušňovací šroubu z plovacího pístu



Vytažení plovacího pístu za závit po odvzdušňovacím šroubu



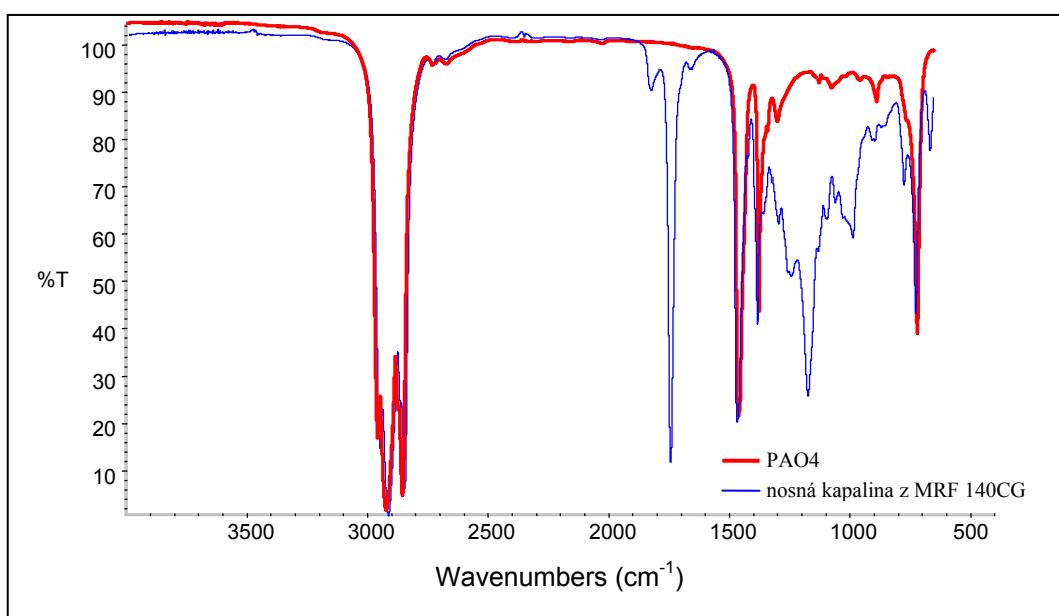
Vytlačení náplně z reometru pomocí pístu

PŘÍLOHA II – FTIR ANALÝZA NOSNÉ SLOŽKY MR KAPALINY

Laboratoř: ALS Laboratory Group

Datum provedení zkoušky: 9.-16.2.2010

Na obrázku je zřetelně vidět, že všechny složky spektra základového oleje PAO4 jsou obsaženy i v nosné kapalině použité v MR kapalině MRF 140CG. Nosná kapalina obsahuje navíc další složky na jiných frekvencích IR spektra, které představují přidaná aditiva.

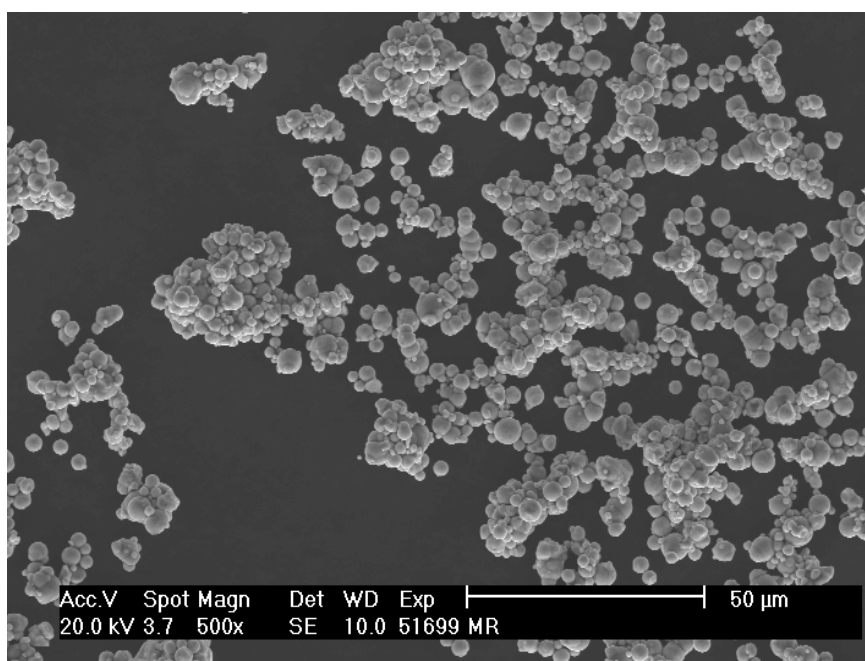
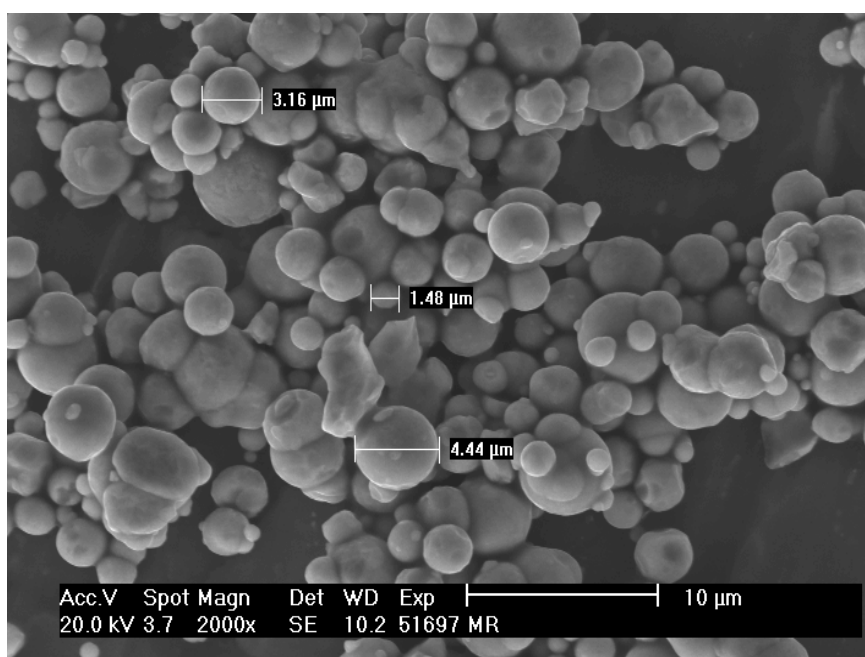


IR spektrum základového oleje PAO4 a nosné kapaliny z MRF 140CG

PŘÍLOHA III – SEM ANALÝZA

Vzorek MR kapaliny byl nanesen na speciální hliníkový přípravek, který se přímo vkládá do vakuové komory elektronového mikroskopu. Aby mohl být vzorek měřen, musel být vysušen a musel ulpívat na přípravku. V opačném případě by volné částice mohly znečistit přístroj. Vzorek byl proto nalepen na uhlíkovou pásku a sušen v proudu teplého vzduchu (50-60 °C) asi po dobu 3 hodin.

SEM analýza byla provedena na přístroji Philips XL30 – EDAX.



Na základě několika snímků při zvětšení 2 000 bylo provedeno měření velikosti částic. Diagram četnosti a detaily statistického souboru viz. níže:

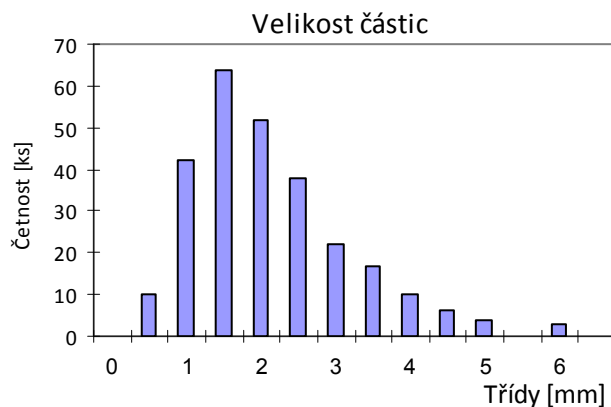
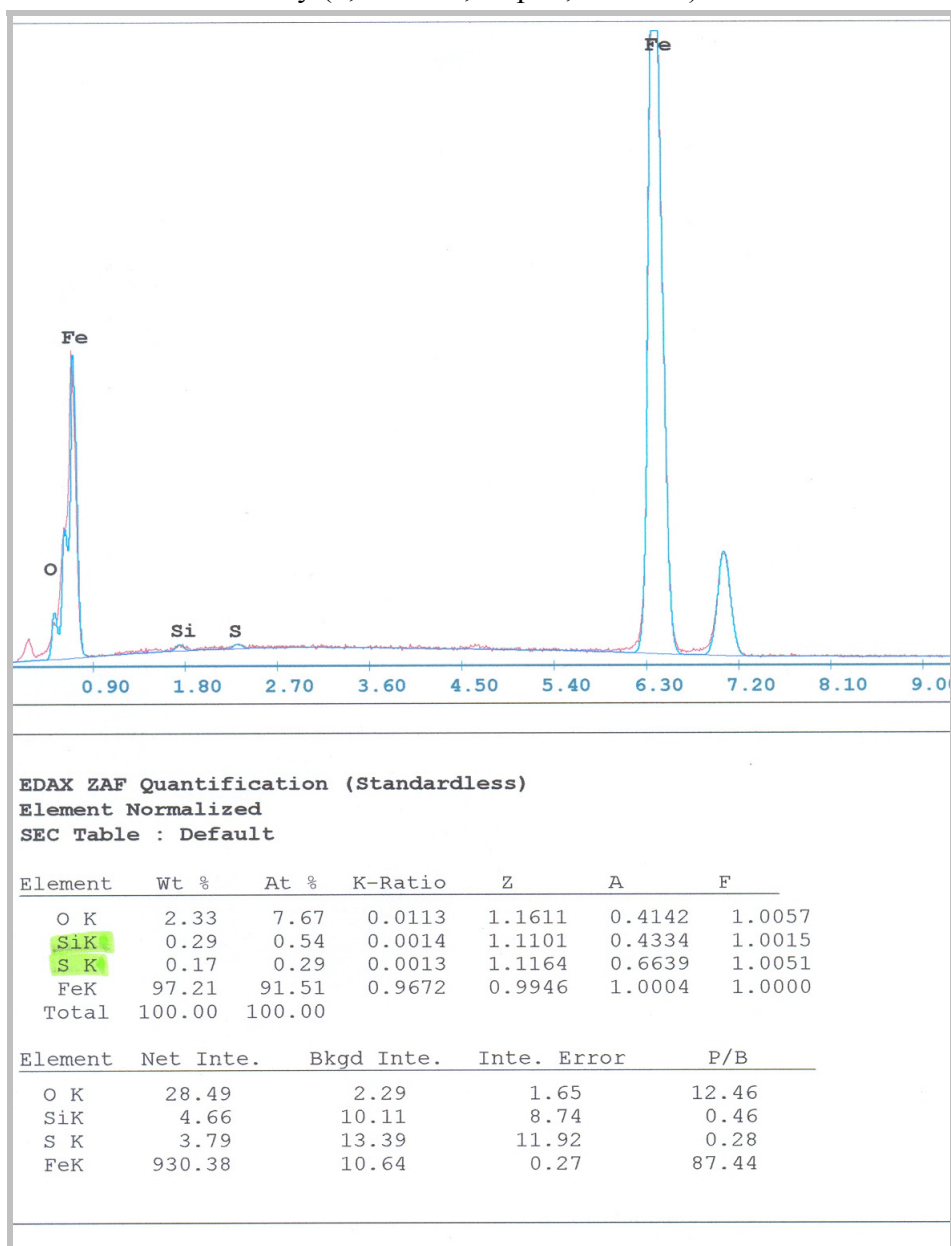


Diagram četnosti velikosti Fe částic v MR kapalině

Tabulka ukazatelů statistického souboru dat

Stř. hodnota	2.03
Chyba stř. hodnoty	0.07
Medián	1.80
Směr. odchylka	1.01
Rozptyl výběru	1.03
Špičatost	1.61
Šikmost	1.13
Rozdíl max-min	6.09
Minimum	0.63
Maximum	6.72
Součet	439.06
Počet	216
Největší (1)	6.72
Nejmenší (1)	0.63
Hladina spolehlivosti (95.0%)	0.14

Chemická mikroanalýza železných částic ukazuje na 97,21 hm.% zastoupení čistého železa, 2,33 hm.% kyslíku (pravděpodobně v oxidech na povrchu částic) a na velice malé množství křemíku a síry (0,29 hm%, resp. 0,17 hm.%).

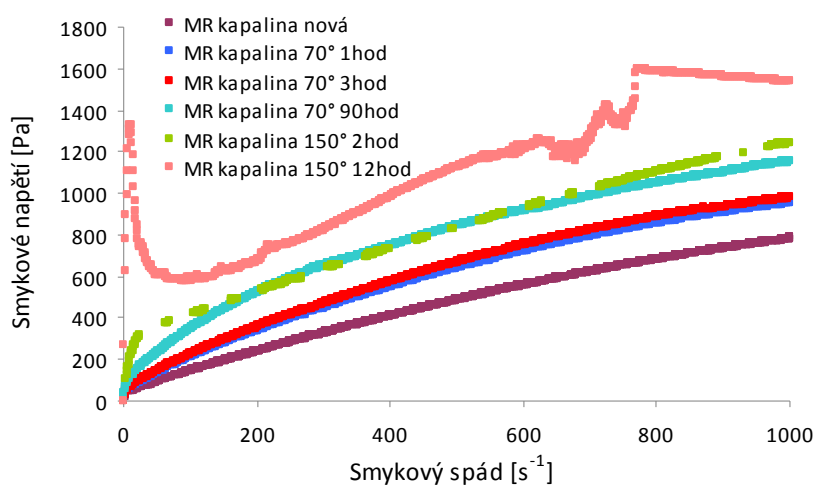


Chemická mikroanalýza metodou EPMA

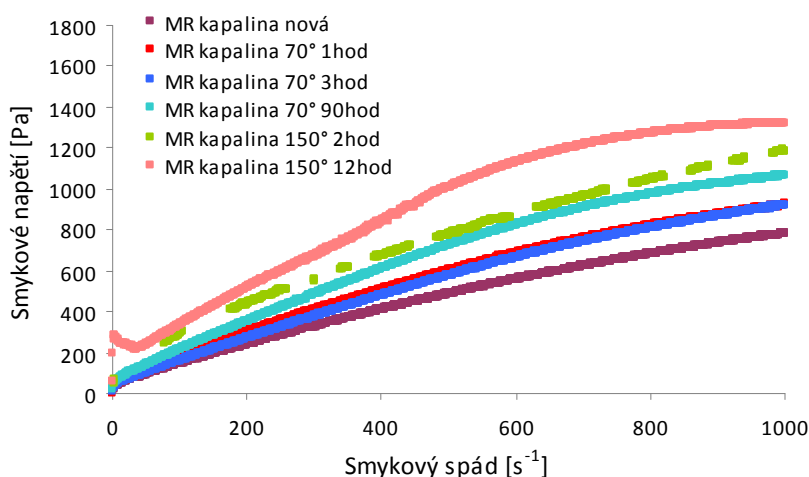
PŘÍLOHA IV – VLIV TEPLoty NA CHOVÁNÍ MR KAPALINY

Následující grafy ukazují závislost tokových křivek na různých teplotách temperace a různých dobách expozice. Z grafů na obr. IV.1 až IV.3 lze pozorovat, že se kapalina postupným měřením rozmíchává a její stav se pomalu blíží stavu nové MR kapaliny. Čím déle a čím vyšší teplotě byla MR kapalina vystavena, tím větší je rozdíl mezi její tokovou křivkou a tokovou křivkou nové MR kapaliny.

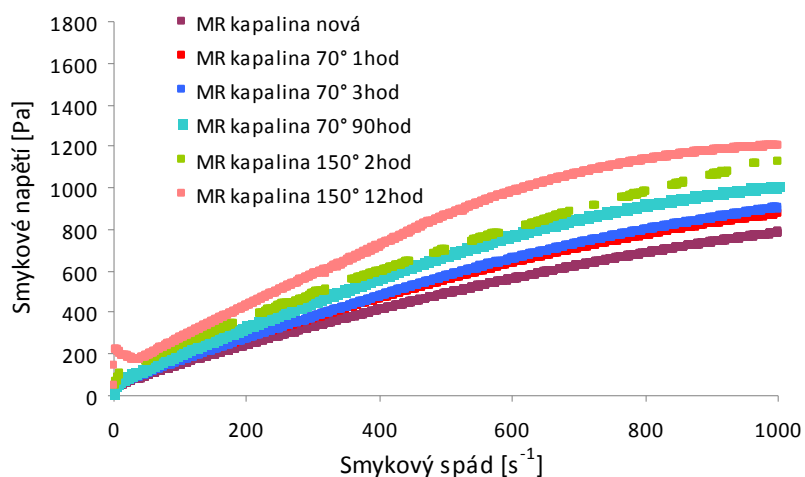
Měření probíhalo na viskozimetru RotoVisco. Byl použit senzor Z20DIN Ti a dynamika sweeput byla nastavena na $1\text{ s}^{-1}/\text{s}$, tzn. že rozsah 1000 s^{-1} byl naměřen za 1000 s .



Obr. IV.1 Různá temperace a expozice - nerozmíchaná MR kapaliny (1. měření)

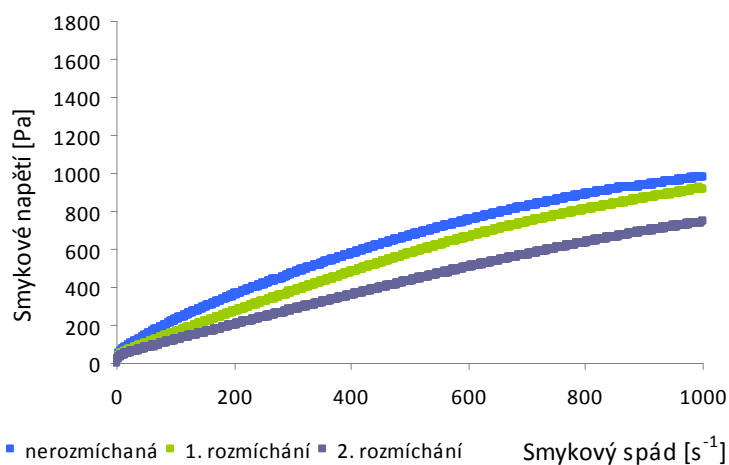


Obr. IV.2 Různá temperace a expozice - poprvé rozmíchaná MR kapaliny (2. měření)



Obr. IV.3 Různá teplota a expozice - podruhé rozmíchaná MR kapalina (3. měření)

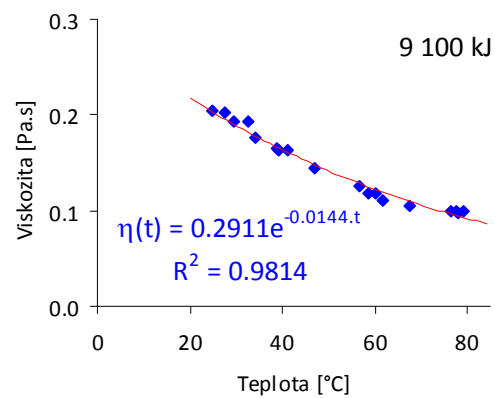
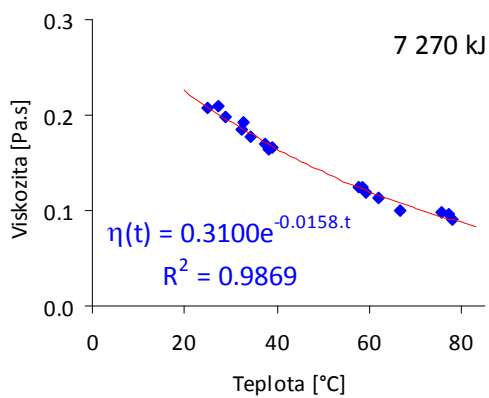
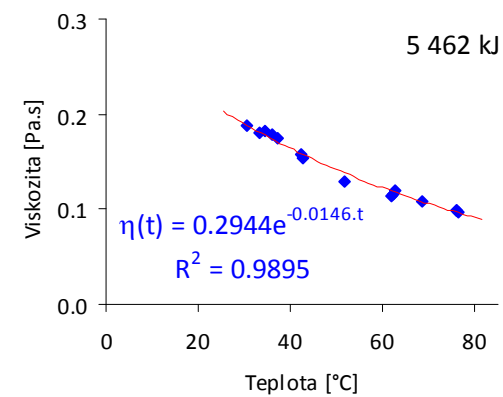
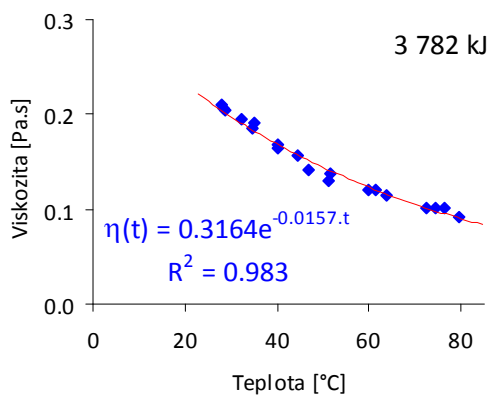
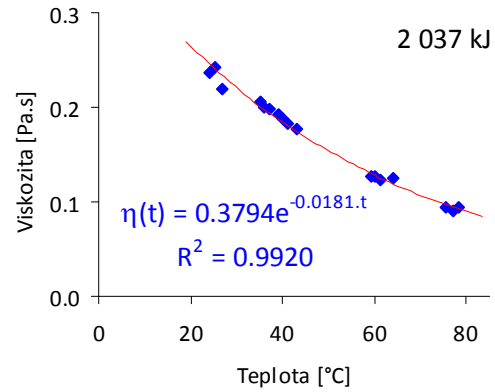
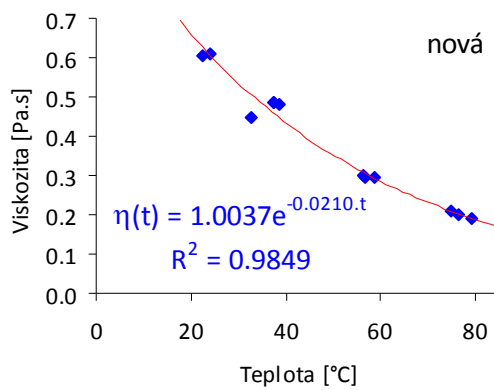
Graf na obr. IV.4 ukazuje vliv rozmíchání MR kapaliny při teplotě na 70°C po dobu 3 hodin.



Obr. IV.4 Různý stav MR kapaliny při teplotě na 70°C po dobu 3 hodin

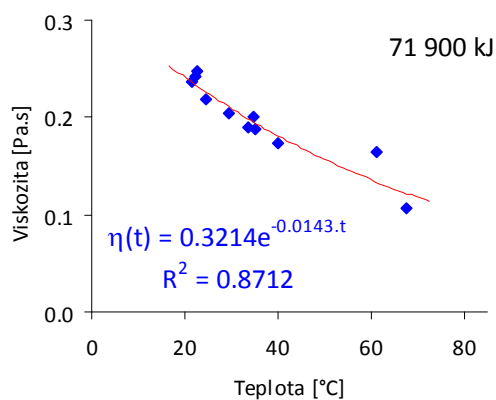
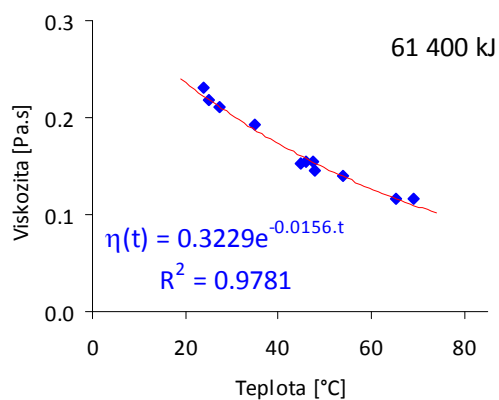
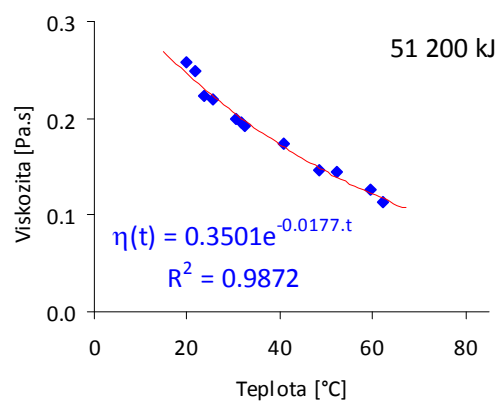
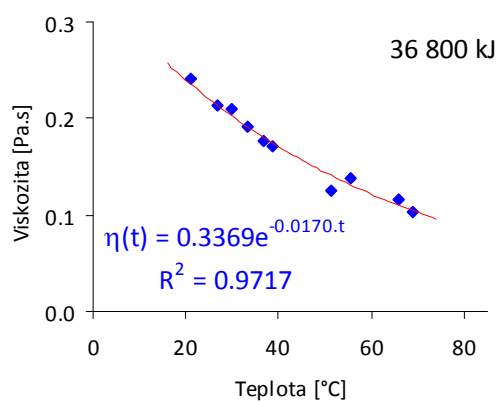
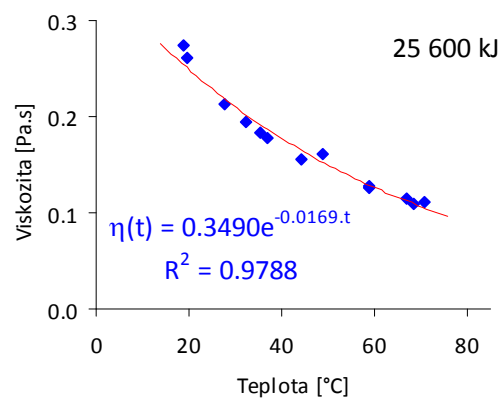
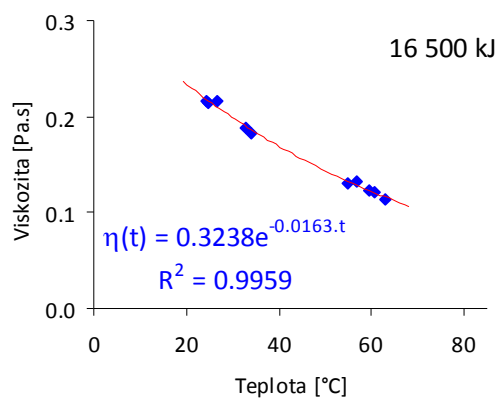


Obr. IV.5 Tepelně degradovaná MR kapalina na senzoru viskozimetru RotoVisco

PŘÍLOHA V – PRŮBĚHY VIZKOZITY V 2. TRVANLIVOSTNÍ ZKOUŠCE 1/3

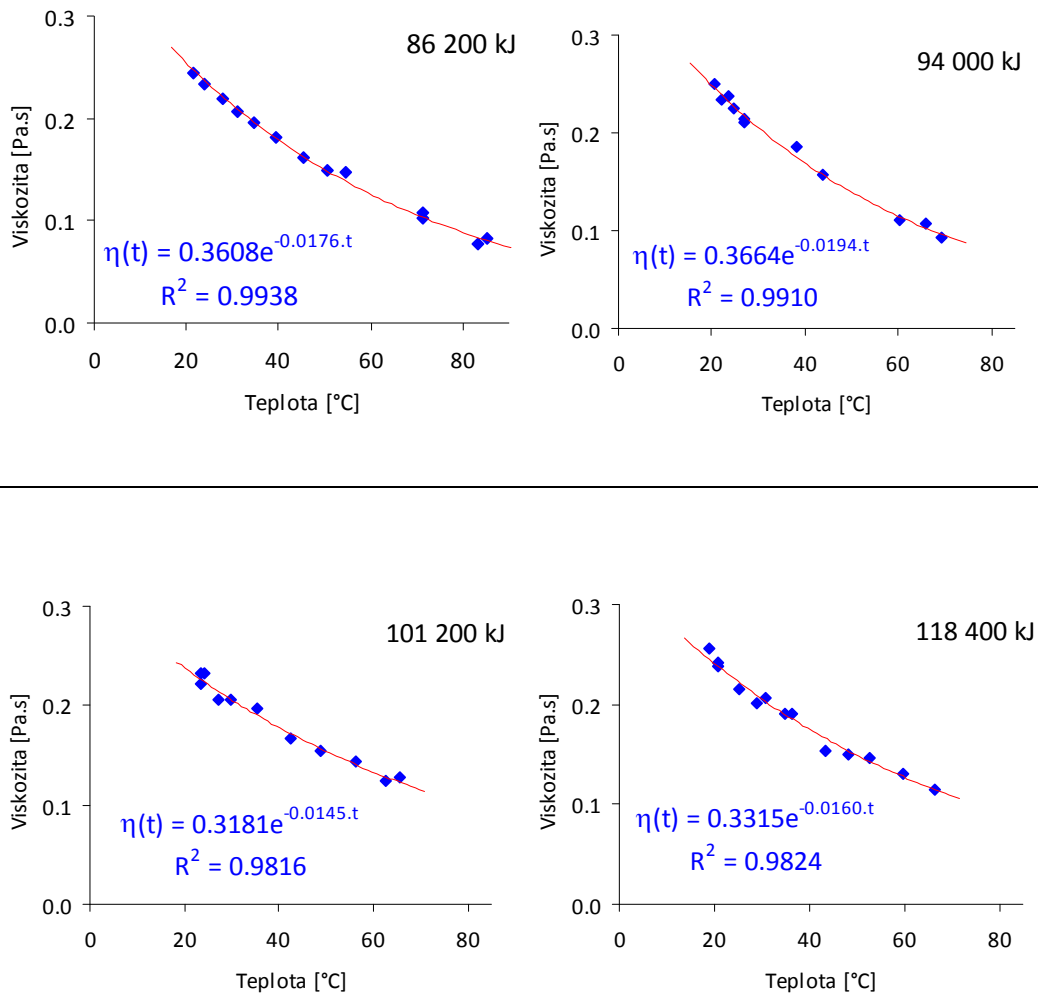
PŘÍLOHA V – PRŮBĚHY VIZKOZITY V 2. TRVANLIVOSTNÍ ZKOUŠCE

2/3

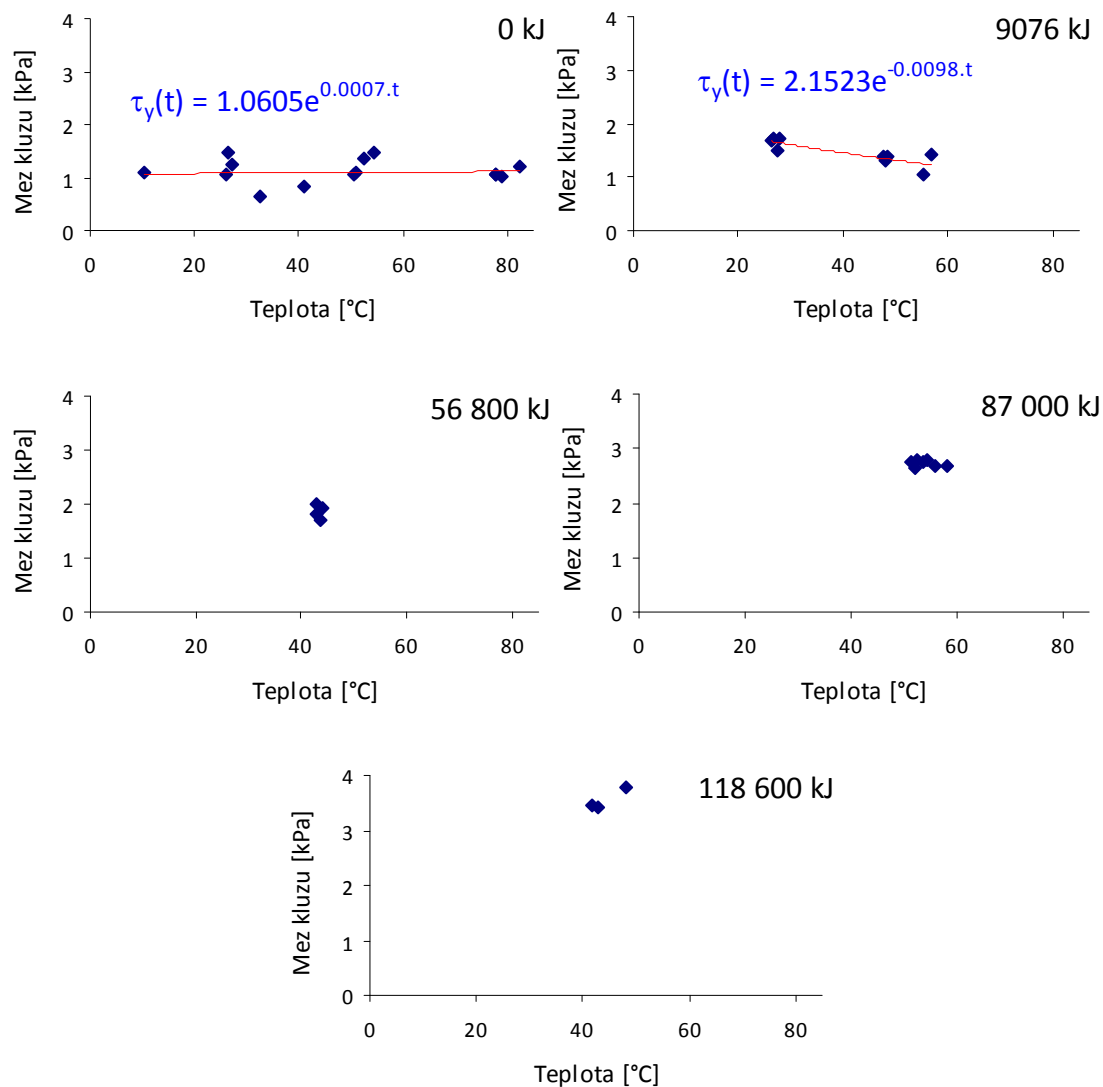


PŘÍLOHA V – PRŮBĚHY VIZKOZITY V 2. TRVANLIVOSTNÍ ZKOUŠCE

3/3

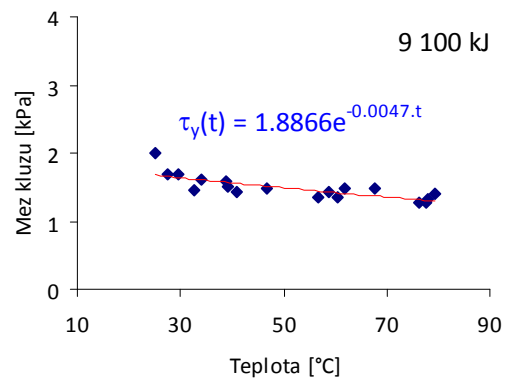
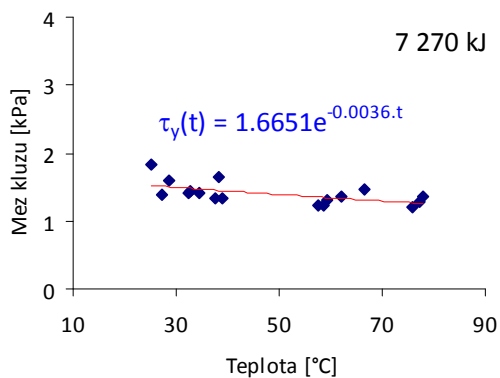
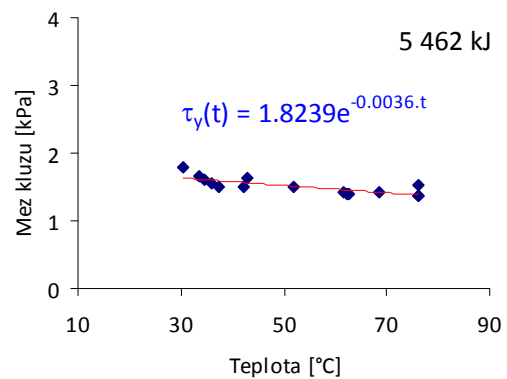
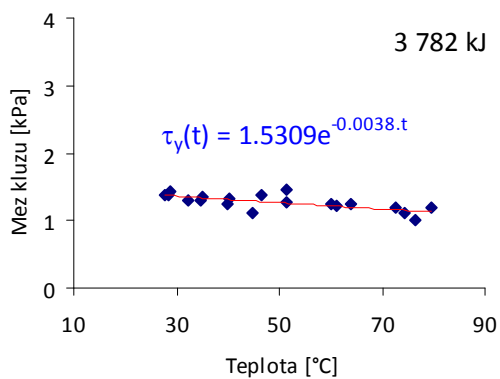
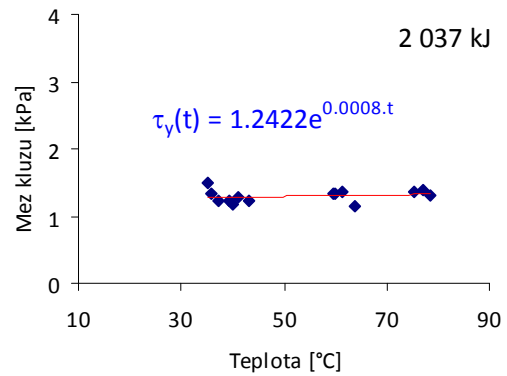
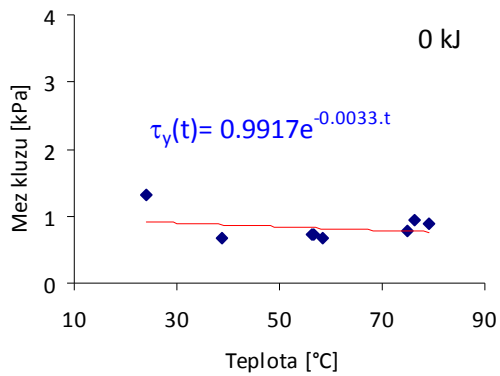


PŘÍLOHA VI – NAMĚŘENÁ MEZ KLUZU V 1. TRVANLIVOSTNÍ ZKOUŠCE



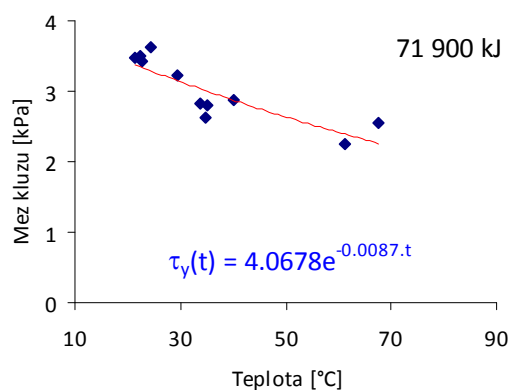
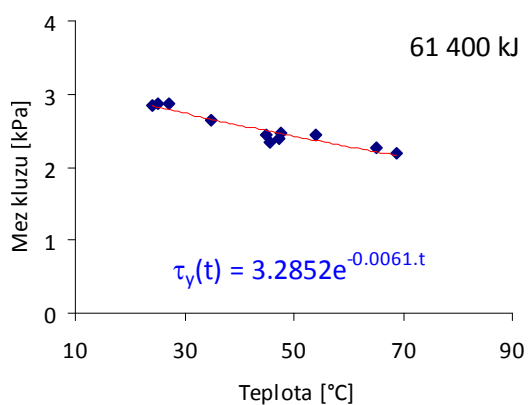
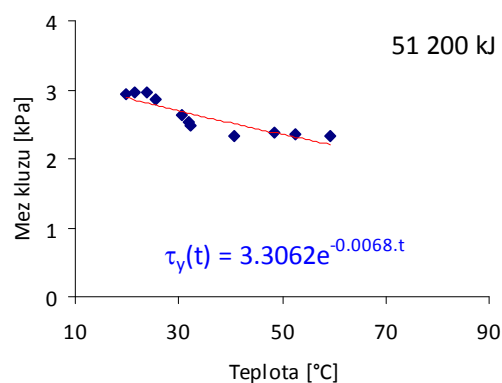
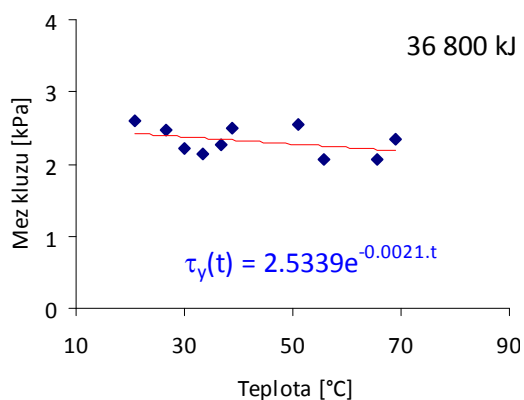
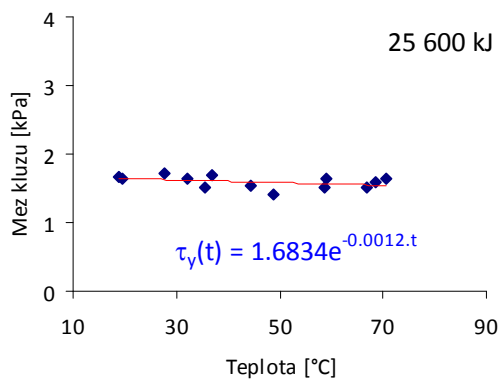
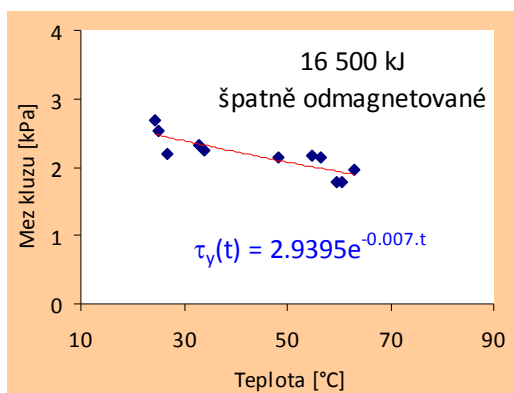
**PŘÍLOHA VII – NAMĚŘENÁ MEZ KLUZU V 2.
TRVANLIVOSTNÍ ZKOUŠCE**

1/3



**PŘÍLOHA VII – NAMĚŘENÁ MEZ KLUZU V 2.
TRVANLIVOSTNÍ ZKOUŠCE**

2/3



**PŘÍLOHA VII – NAMĚŘENÁ MEZ KLUZU V 2.
TRVANLIVOSTNÍ ZKOUŠCE**

3/3

