

TEORINIAI IŠMANIOJO SKYSČIO TAIKYMO MIKROPAVAROMS KLAUSIMAI

Andrius Klevinskis¹, Vytautas Bučinskas², Lukas Daujotas³

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

El. paštas: ¹andrius.klevinskis@vgtu.lt; ²vytautas.bucinskas@vgtu.lt; ³lukas.daujotas@gmail.com

Santrauka. Darbe apžvelgtos išmaniosios magnetinės medžiagos, pateiktos pagrindinės išmaniųjų magnetinių skysčių charakteristikos, aptarti pagrindiniai šių medžiagų darbo režimai. Teoriniais skaičiavimais nustatyta mikropavaroje veikiančio magnetoreologinio skysčio savybių kitimo priklausomybė nuo išorinio magnetinio lauko. Darbe pateikti tyrimo metu gautų rezultatų grafikai ir išvados.

Reikšminiai žodžiai: magnetoreologinis skystis, mikropavara, eksperimentinis tyrimas.

Įvadas

Kuriant mikropavaras svarbu užtikrinti stabilų ir patikimą jų darbą. Išmanieji skysčiai, kurie nuo išorinio šilumos, elektros srovės, magnetinio lauko ar kitokio poveikio keičia savo būseną, yra medžiagos, galinčios užtikrinti nesudėtingą mikropavaros konstrukciją, mažą skaičių konstrukcijoje judančių detalių ir patogų valdymą, keičiant išmaniojo skysčio išorinio poveikio dydį. Kuriant našias ir patikimas mikropavaras, naudojančias išmaniuosius skysčius, svarbu tinkamai parinkti jų konstrukciją, išrinkti tinkamą išmanųjį skystį ir atlikti pavaros modelio skaičiavimus.

Tyrimo tikslas

Pagrindinis darbo tikslas – apžvelgti teorinius išmaniojo skysčio naudojimo mikropavaroms aspektus. Šiam tikslui pasiekti suformuoti tokie uždaviniai:

- Atlikti išmaniųjų magnetinių skysčių apžvalgą.
- Nustatyti labiausiai mikropavaroms tinkantį išmanųjį magnetinį skystį.

- Nustatyti magnetinio skysčio slėgio priklausomybę nuo išorinio magnetinio lauko.
- Atlikti teorinius išmaniojo skysčio magnetinio lauko skaičiavimus baigtinių elementų metodu.

Išmaniųjų magnetinių skysčių klasifikavimas

Išmanieji magnetiniai skysčiai klasifikuojami į feromagnetinius, elektromagnetinius, magnetoreologinius ir elektromagnetoreologinius (Carlson 2007; Koyama 1995). Šių skysčių pagrindinės savybės pateiktos 1 lentelėje.

Feromagnetiniais skysčiais vadinamos skystos kolidinės suspensijos, gautos dispergavus magnetinės medžiagos daleles skystoje terpėje (Papell 1965; Scherer 2005; LORD... 2012). Feromagnetiniuose skysčiuose disperguotos dalelės, veikiamos išorinio magnetinio lauko, nesukuria tvirtų grandinių, todėl poveikis į indo sienelės būna nereikšmingas.

1 lentelė. Išmaniųjų magnetinių skysčių klasifikavimas

Table 1. Classification of smart magnetic fluids

Medžiaga	Feromagnetiniai skysčiai	Elektromagnetiniai skysčiai	Magnetoreologiniai skysčiai	Elektromagnetoreologiniai skysčiai
Dalelių medžiaga	Feromagnetikai, ferimagnetikai	Polimerai	Feromagnetikai, ferimagnetikai	Feromagnetikai, ferimagnetikai, polimerai
Dalelių dydis	<10 nm	0,1–10 μm	0,1–10 μm	0,1–10 μm
Skystis	Druskos tirpalai	Alyvos, dielektriniai geliai, polimerai	Vanduo, sintetinės alyvos	Alyvos, dielektriniai geliai, polimerai
Slėgis	–	10 kPa	100 kPa	50 kPa
Žadinimas	Elektromagnetai, nuolatiniai magnetai	Elektromagnetai, nuolatiniai magnetai	Elektromagnetai, nuolatiniai magnetai	Elektromagnetai, nuolatiniai magnetai, elektros srovė

Elektroreologiniais ir magnetoreologiniais skysčiais vadinamos suspensijos, kuriuose suspenduotos 1–7 μm dydžio feromagnetinės arba ferimagnetinės dalelės. Elektroreologiniai skysčiai fizikines savybes keičia veikiami elektrinio lauko, o magnetoreologiniai skysčiai – išorinio magnetinio lauko. Šie skysčiai, veikiami elektrinio ir magnetinio lauko, sukuria tvirtas kietų dalelių grandines, todėl šių skysčių poveikis indo sienelėms yra gerokai didesnis.

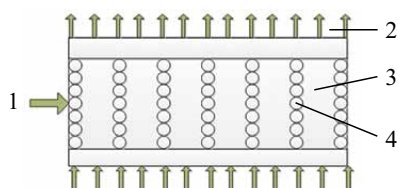
Elektromagnetoreologiniai skysčiai turi savybių, būdingų elektroreologiniams ir magnetoreologiniams skysčiams, todėl jie savybes keičia ir veikiami elektrinio lauko, ir išorinio magnetinio lauko.

Magnetoreologiniai skysčiai, veikiami išorinio magnetinio lauko, sukuria didžiausią slėgį į indo sienelės, todėl mikropavarose jie yra tinkamiausi naudoti (1 lentelė). Magnetoreologiniuose skysčiuose kietosios dalelės laikui bėgant gali nusėsti ant indo dugno, tačiau prietaisuose, kuriuose magnetoreologinis skystis juda dėl mechaninių judesių arba išorinio magnetinio lauko, dalelių nusėdimo išvengiama (LORD... 2012).

Magnetoreologinių skysčių darbo režimai

Magnetoreologiniai skysčiai dažniausiai naudojami vienu iš keturių režimų: vožtuvo tipo, šlyties, spūdinio arba spaudimo režimu (Adjerid 2011; Ghorbany 2011; Farjoud 2011).

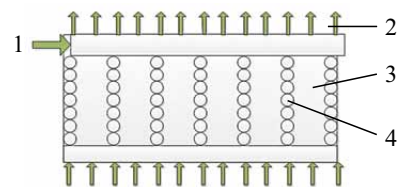
Vožtuvo tipo (1 pav.) darbo režimo mechanizmuose magnetoreologinis skystis teka tarp dviejų plokštelių, o išorinis magnetinis laukas nukreipiamas statmenai skysčio tekėjimo kryptčiai. Skysčio pasipriešinimas kontroliuojamas keičiant išorinio magnetinio lauko stiprį.



1 pav. Vožtuvo tipo magnetoreologinio skysčio darbo režimas: 1 – slėgis; 2 – magnetinis laukas; 3 – magnetoreologinis skystis; 4 – kietosios geležies dalelės

Fig. 1. An operating mode of a valve-like magnetoreological fluid device: 1 – pressure; 2 – applied magnetic field; 3 – magnetoreological fluid; 4 – magnetisable particles

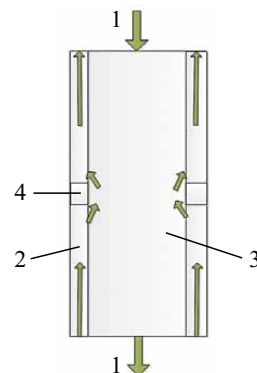
Šlyties tipo darbo režimo (2 pav.) mechanizmuose tarp dviejų plokštelių esantis magnetoreologinis skystis yra veikiamas statmenai plokštelėms veikiančio išorinio magnetinio lauko. Viena iš plokštelių yra veikiamas išorinės jėgos, o jėgos dydis, reikalingas plokštelėms judėti viena kitos atžvilgiu, kontroliuojamas keičiant išorinio magnetinio lauko stiprumą.



2 pav. Šlyties tipo magnetoreologinio skysčio darbo režimas: 1 – jėga; 2 – magnetinis laukas; 3 – magnetoreologinis skystis; 4 – kietosios geležies dalelės

Fig. 2. An operating mode of a direct shear-like magnetoreological fluid device: 1 – force; 2 – applied magnetic field; 3 – magnetoreological fluid; 4 – magnetisable particles

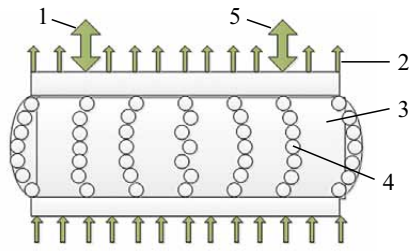
Spūdinio tipo darbo režimo metu magnetoreologinis skystis nukreipiamas tarp dviejų plokštelių, o išorinis magnetinis laukas – išilgai skysčio tekėjimo kryptties (3 pav.). Mechanizmo sienelės yra atskiriamos blogai magnetinį lauką praleidžiančia medžiaga, todėl išorinis magnetinis laukas magnetoreologiniame skystyje pasiskirsto netolygiai ir, skirtingai negu vožtuvo tipo mechanizmuose, skystyje dalelės suformuoja kietas struktūras ne visame skysčio tekėjimo plotyje, o tik šalia sienelių. Keičiant išorinį magnetinį lauką, kontroliuojamas tekančio magnetoreologinio skysčio pralaidumas.



3 pav. Spūdinio tipo magnetoreologinio skysčio darbo režimas: 1 – slėgis; 2 – magnetinis laukas; 3 – magnetoreologinis skystis; 4 – magnetinio lauko nepraleidžianti medžiaga

Fig. 3. An operating mode of a pinch-like magnetoreological fluid device: 1 – pressure; 2 – applied magnetic field; 3 – magnetoreological fluid; 4 – non-magnetic spacer

Spaudžiamo magnetoreologinio skysčio darbo režimo metu tarp dviejų plokštelių esantis magnetoreologinis skystis spaudžiamas statmenai plokštelėms nukreipta jėga (4 pav.). Jėgos dydis, reikalingas suspausti plokštelėms, kontroliuojamas keičiant magnetoreologinį skystį veikiančio išorinio magnetinio lauko stiprumą. Šio tipo darbo režimo mechanizmuose plokštelių poslinkis nuo išorinio magnetinio lauko yra vos keletas milimetrų, tačiau jėgos, atsirandančios dėl išorinio magnetinio lauko, santykinai didelės.



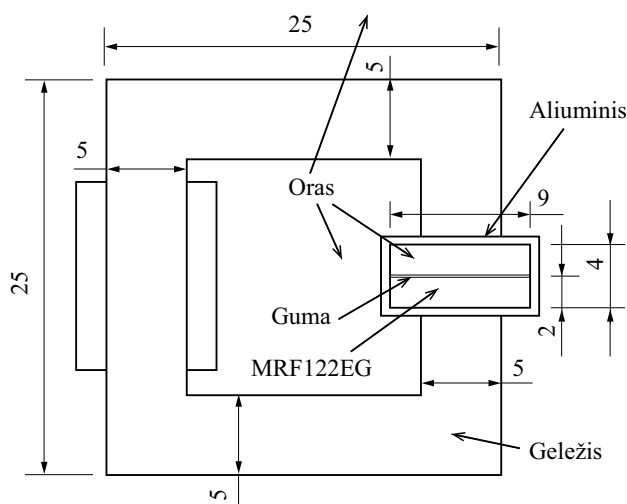
4 pav. Spaudžiamo magnetoreologinio skysčio darbo režimas: 1 – jėga; 2 – magnetinis laukas; 3 – magnetoreologinis skystis; 4 – kietosios geležies dalelės; 5 – poslinkis

Fig. 4. An operating mode of a squeeze-like magnetoreological fluid device: 1 – force; 2 – applied magnetic field; 3 – magnetoreological fluid; 4 – magnetisable particles; 5 – displacement

Teorinio tyrimo metodika

Magnetoreologinio skysčio magnetinio lauko stiprumui mikropavaroje nustatyti buvo naudojama *Femm 4.2* programa, kuria sukurtas dvimatis U formos solenoido modelis. Solenoido šerdies gale įmontuota talpykla, kuri gumine membrana padalinta į dvi lygias dalis. Apatinėje talpyklos dalyje esantis magnetoreologinis skystis, veikiamas solenoido kuriamo magnetinio lauko, sukuria slėgimą į skysčio sienes ir deformuoja guminę membraną. Periodinis membranos judėjimas sukuria mikropavaros judesį. Solenoidas padarytas iš 500 vijų 0,5 mm skersmens varinės vielos, kuria teka 1 A srovės stipris. Tikslūs modelio matmenys pateikti 5 paveiksle.

Naudojant sukurtą mikropavaros dvimatį modelį, taikant baigtinių elementų metodą, apskaičiuotas magnetinio lauko stiprio pasiskirstymas magnetoreologiniame skystyje.



5 pav. Mikropavaros matmenys

Fig 5. Dimensions of a microactuator

Sprendžiant magnetostatines problemas laikas nėra kintamasis dydis, todėl (Meeker 2010):

$$\nabla \times H = J, \quad (1)$$

$$\nabla \times B = 0, \quad (2)$$

čia: H – magnetinio lauko stiprumas; B – magnetinio srauto tankis.

Ryšys tarp B ir H kiekvienoje medžiagoje išreiškiamas taip (Meeker 2010):

$$B = \mu H, \quad (3)$$

čia μ – magnetinė skvarba.

Medžiagų, turinčių netiesines fizikines savybes, magnetinė skvarba

$$\mu = \frac{B}{H(B)}. \quad (4)$$

Femm programa ieškoma sprendinio, kuris tenkintų 1 ir 3 lygtis. Magnetinio srauto tankis išreiškiamas per magnetinio lauko vektoriaus potencialą (Meeker 2010):

$$B = \nabla \times A, \quad (5)$$

čia A – magnetinio lauko vektoriaus potencialas.

Atsižvelgdami į 2 išraišką, 1 formulę galime perrašyti taip (Meeker 2010):

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu(B)} \nabla \times A \right) = J. \quad (6)$$

Izotropinėms medžiagoms 6 formulę galima supaprastinti iki (Meeker 2010):

$$-\frac{1}{\mu} \nabla^2 A = J. \quad (7)$$

Magnetoreologinis skystis, neveikiamas išorinio magnetinio lauko, yra niutoninis skystis, tačiau skystį veikiant magnetiniu lauku, jis tampa Binghamo plastikumu ir gali būti parašytas formule (Meeker 2010):

$$\tau = \tau_y(H) + \eta \dot{\gamma}, \text{ kai } \tau \geq \tau_y, \quad (8)$$

čia: τ – bendri šlyties įtempimai; τ_y – takumo riba; H – magnetinio lauko stiprumas; η – skysčio klampa, neveikiant išoriniam magnetiniam laukui.

$$\tau = G\gamma, \text{ kai } \tau < \tau_y. \quad (9)$$

Mikropavaroje naudoto magnetoreologinio skysčio MRF-122EG fizikinės charakteristikos pateiktos 2 lentelėje.

2 lentelė. Magnetoreologinio skysčio MRF-122EG fizikinės charakteristikos

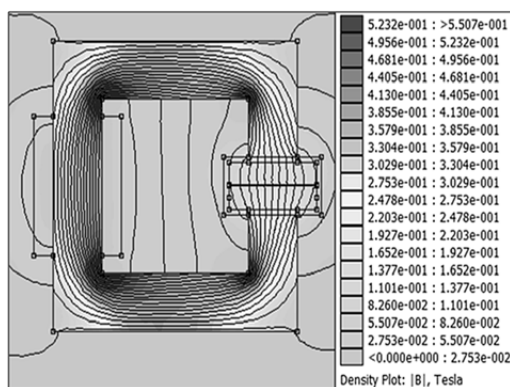
Table 2. Properties of magnetoreological fluid MRF-122EG

Savybė	Reikšmė
Išvaizda	Tamsus pilkas skystis
Kietųjų dalelių kiekis, %	72
Tankis, g/cm ³	2,28
Darbinė temperatūra, °C	(-40–130)
Klampumas, Pa · s	0,042±0,020
Plyksnio temperatūra, °C	>150
Atsakas į magnetinio lauko pokytį	Staigus ir grįžtamasis

Triangle.exe programa pavaros modelis suskaidytas į 7842 mazgus. Magnetoreologinis skystis, guminė membrana ir šiuos du elementus gaubiantis aliuminio korpusas yra mažas, lyginant su visu pavaros modeliu, todėl baigtinių elementų tinklas šiuose elementuose sukurtas smulkesnis.

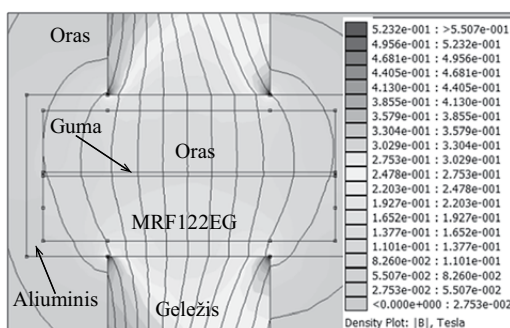
Atlikus skaičiavimus išmatuotas pavaroje veikiančio solenoido sukurtą magnetinio srauto tankio ir magnetinio lauko stiprio pasiskirstymas įrenginyje (žr. 6 ir 7 pav.).

Magnetinio lauko linijos, pereinamos iš vienos medžiagos į kitą, lūžta, priklausomai nuo medžiagos fizikinių savybių (žr. 7 pav.).



6 pav. Magnetinio srauto tankio pasiskirstymas solenoido veikiant 1 A srovės stipriui

Fig. 6. The distribution of simulated magnetic flux density under the action of solenoid 1 A currents

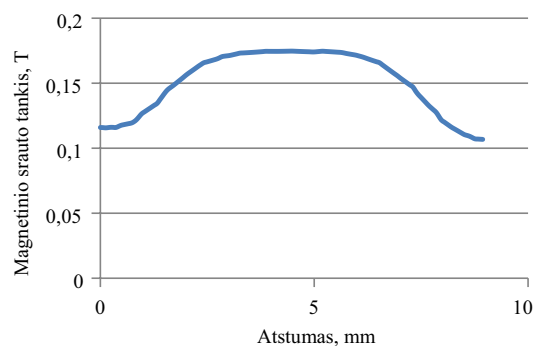


7 pav. Magnetinio srauto tankio pasiskirstymas magnetoreologiniame skystyje veikiant 1 A srovės stipriui

Fig. 7. The distribution of simulated magnetic flux density under the action of magnetoreological fluid MRF-122EG

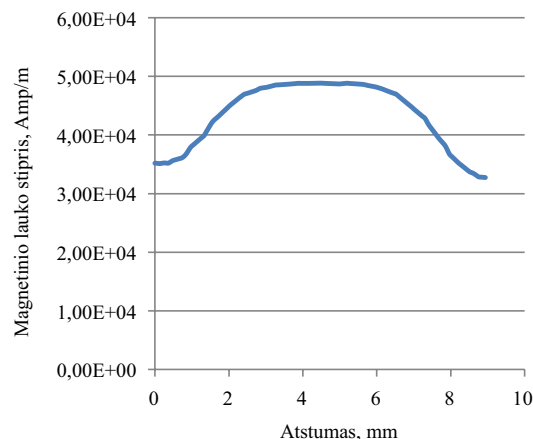
Atlikus skaičiavimus išmatuotas magnetoreologinį skystį veikiantis magnetinio srauto tankis ir magnetinio lauko stipris (žr. 8 ir 9 pav.).

Pagal MRF-122EG skysčio dokumentacijos pateiktą τ_y ir H priklausomybę, nustatėme, kad magnetoreologinį skystį veikiant vidutiniškai 40 kA/m magnetinio lauko stipriui, takumo riba siekia 8 kPa.



8 pav. Magnetinio srauto tankio pasiskirstymas magnetoreologiniame skystyje per skysčio talpos vidurį

Fig. 8. The curve of magnetic field flux density in the middle of the magnetoreological fluid



9 pav. Magnetinio lauko stiprio pasiskirstymas magnetoreologiniame skystyje per skysčio talpyklos vidurį

Fig. 9. The curve of magnetic field intensity in the middle of the magnetoreological fluid

Išvados

Atlikę tyrimą galime teigti, kad:

1. Išmaniųjų magnetinių skysčių sukuriamas magnetinis laukas gali būti naudojamas mikropavaroms.
2. Mikropavaroms modeliuoti labiausiai tinka magnetoreologiniai skysčiai, nes jų sukuriamas slėgis yra didžiausias.
3. Magnetoreologinių skysčių sukuriamas slėgis į įrenginio sienelės priklauso nuo magnetinio lauko stiprio magnetoreologiniame skystyje, todėl atliekant mikropavarų,

kuriose naudojami magnetiniai skysčiai, modeliavimą, magnetinio lauko pasiskirstymui įrenginyje galime taikyti baigtinių elementų metodą.

- Atlikus mikropavaros magnetinio lauko stiprumo skaičiavimus nustatyta, kad solenoidui veikiant MRF-122EG skystį 40 kA/m stiprumo magnetiniu lauku, magnetoreologinio skysčio takumo riba yra 8 kPa.

Literatūra

- Adjerid, K. 2011. *A Study on the Dynamic Characterization of a Tunable Magneto-Rheological Fluid-Elastic Mountin Squeeze Mode Vibration*. Virginia Polytechnic Institute and State University. 121 p.
- Carlson, J. D. 2007. *CISM Course: Semi-Active Vibration Suppression – the Best from Active and Passive Technologies*. Udine, Italy.
- Farjoud, A.; Ahmadian, M.; Mahmoodi, N.; Zhang, X.; Craft, M. 2011. Nonlinear modeling and testing of magneto-rheological fluids in low shear rate squeezing flows, *Smart Materials and Structures* 20(8): 1–14.
<http://dx.doi.org/10.1088/0964-1726/20/8/085013>
- Ghorbany, D.; Karimi, H. R.; Iskandarani, Y. 2011. MR damper hysteresis characterization for the semi-active suspension system, *Far East Journal of Dynamical Systems* 17(1): 55–72.
- Koyama, K.; Minagawa, K.; Watanabe, T.; Kumakura, Y.; Takimoto, J. 1995. Electro-magneto-rheological effects in parallel-field and crossed-field systems, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* 58(2–3): 195–206.
[http://dx.doi.org/10.1016/0377-0257\(95\)01353-W](http://dx.doi.org/10.1016/0377-0257(95)01353-W)
- LORD Magneto-Rheological (MR) [interaktyvus], [žiūrėta 2012 m. sausio 16 d.]. Prieiga per internetą: [http://www.lord.com/products-and-solutions/magneto-rheological-\(mr\).xml](http://www.lord.com/products-and-solutions/magneto-rheological-(mr).xml)
- Meeker, D. 2010. *Finite Element Method Magnetics*. Femm 4.2 User's Manual. 158 p.
- Papell, S. S. 1965. Low viscosity magnetic fluid obtained by the colloidal suspension of magnetic particles, *United States Patent*, Patent number 3, 215, 572.
- Scherer, C.; Figueiredo Neto, A. M. 2005. Ferrofluids: Properties and Applications, *Brazilian Journal of Physics* 35(3A): 718–727.
<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-97332005000400018>

THEORETICAL QUESTIONS OF APPLYING SMART MATERIALS FOR MICROACTUATORS

A. Klevinskis, V. Bučinskis, L. Daujotas

Abstract

The article provides an overview of smart magnetic materials, including the essential properties of smart magnetic liquid materials and discusses the main operating modes of these materials. Theoretical calculations have disclosed changes in the behavior of the magnetorheological fluid determined under the influence of an external magnetic field of the microactuator. Finally, the paper presents the results and conclusions of the conducted experiments.

Keywords: magnetorheological fluid, microactuator, experimental research.