

MAGNETO-INDUCIRANE POVRŠINSKE STRUKTURE

KATJA ARH

Fakulteta za matematiko in fiziko
Univerza v Ljubljani

V članku bodo predstavljeni magneto-aktivni elastomeri ter nastanek površinskih struktur v zunanjem magnetnem polju. Opisano bo grobo zrnato modeliranje magneto-aktivnih elastomerov s simulacijo po principu molekularne dinamike. Nato bodo predstavljene optične metode za preučevanje površine in rezultati meritev hrapavosti ter časovnega odziva snovi. Z obravnavo različnih vzorcev bo določena optimalna sestava za največjo spremembo hrapavosti v prisotnosti magnetnega polja.

MAGNETO-INDUCED SURFACE MORPHOLOGIES

This article introduces magneto-active elastomers and investigates the formulation of surface morphologies in the presence of an external magnetic field. The first part of the article describes coarse-grained modelling of magneto-active elastomers by means of molecular dynamics simulation. In the second part, optical methods for surface studies are presented, followed by measurements of surface roughness and time response of material. Finally, several samples are compared in order to determine optimal material composition for tunable surface roughness in presence of magnetic field.

1. Uvod

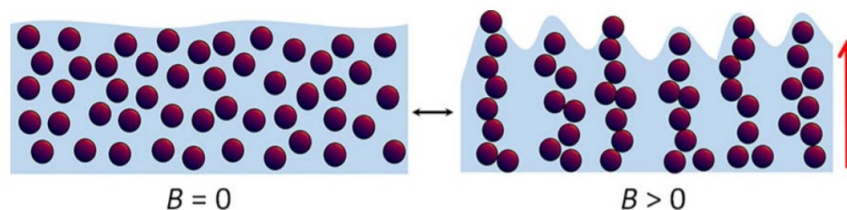
Magneto-reološki (MR) materiali so snovi, katerih mehanske lastnosti lahko spreminjamo z zunanjim magnetnim poljem. Znan primer so feromagnetne tekočine, ki so koloidne raztopine magnetnih nanodelcev v tekočem mediju. Iz tekočega stanja se v zunanjem magnetnem polju spremenijo v trdno snov z nagubano površino. Ne-tekoči analog feromagnetnih tekočin so magneto-aktivni elastomeri (MAE). V njih so mikrometrski feromagnetni delci vgrajeni v polimerno matriko. Ta omejuje premike magnetnih delcev in pokrbi za edinstven odziv snovi na magnetno polje.

Magneto-reološki efekt je odkril Rabinov v štiridesetih letih prejšnjega stoletja, leta 1985 pa so prvič poročali o magneto-aktivnem elastomeru. Leta 1996 je Jolly predstavil kvazistatični model za opis MAE in rezultate potrdil tudi eksperimentalno [1]. To je bil začetek mnogih raziskav reoloških lastnosti MAE. Ob prisotnosti zunanjega magnetnega polja se jim prožnostni in strižni dinamični modul povečata tudi za nekaj velikostnih redov. Potrjeno je, da se poleg mehanskih spremenijo tudi električne in akustične lastnosti snovi. Leta 1997 sta Raphael in de Gennes predpostavila, da bi z dodajanjem feromagnetnih delcev lahko vplivala na omakanje gume. Eksperimenti njune teorije niso potrdili, saj so bili izvedeni s trdimi polimeri, ki so preprečevali premike delcev [2]. Poleg sprememb prožnostnih volumskih lastnosti materiala pa se spremembe dogajajo tudi na površini. Nedavne slike površine z elektronsko mikroskopijo so razkrile zanimive, goram podobne površinske strukture na površju MAE v prisotnosti magnetnega polja. Površinska struktura ima velik vpliv na trenje, lepljenje in omakanje površine, zato je tema pritegnila pozornost mnogih raziskovalnih skupin.

V nadaljevanju bo, po opisu MAE, predstavljeno modeliranje teh materialov s simulacijo molekularne dinamike. Nato bodo opisani načini opazovanja površine in prikazani eksperimentalni rezultati analize površinskih sprememb v odvisnosti od magnetnega polja.

2. Lastnosti MAE

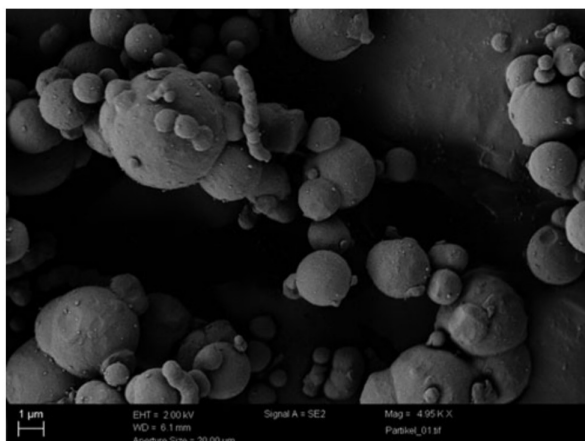
Magneto-aktivni elastomeri so dvokomponentni kompozitni materiali. Aktivna komponenta so mikrometrski feromagnetni delci, ki so vgrajeni v zamreženo polimerno matriko. Če je polimerna



Slika 1. Magnetni delci se v prisotnosti polja uredijo v verižne strukture orientirane vzdolž magnetnih silnic. Skica iz [2].

matrika dovolj prožna, omogoča premike gradnikov. Feromagnetni delci v elastomeru se v prisotnosti polja uredijo v verižne strukture orientirane vzdolž magnetnih silnic. Če je magnetno polje pravokotno na površino, to povzroči nastanek stožčastih površinskih struktur. Podobne strukture se pojavijo tudi pri feromagnetnih tekočinah, vendar so pri MAE, zaradi vpliva polimerne mreže, kompleksnejše. Nastanek površinskih struktur lahko opazimo tudi s prostim očesom: prej gladka površina vzorca v prisotnosti magnetnega polja manj odseva svetlobo.

Kot magnetne delce uporabljamo prah karbonilnega železa, ki je prikazan na sliki 2. Oblika delcev je zelo podobna idealni sferi, njihova gostota pa je skoraj enaka gostoti železa. Delci so veliki od nekaj sto nanometrov do nekaj mikrometrov [3]. Elastomerna matrika mora biti diamagnetna



Slika 2. Prah karbonilnega železa, slikan z vrstično elektronsko mikroskopijo (SEM). Slika iz [3].

z majhno magnetno susceptibilnostjo, da ne oslabi magnetnega polja v vzorcu. Zaradi primernih lastnosti (so stabilni, nestrupeni in nevnetljivi) in preproste sinteze se največkrat uporabljajo polidimetilsiloksanski (PDMS) materiali. Med pripravo se začetni mešanici polimerov in zamreževalca doda silikonsko olje in prah karbonilnega železa. Nato se vzorci trdijo. Če mešanica med strjevanjem ni v magnetnem polju, je porazdelitev magnetnih delcev izotropna. V vzorcih, ki trdijo v magnetnem polju, pa se že med pripravo magnetni delci uredijo v verige v smeri magnetnega polja.

3. Teoretično modeliranje

Posebnost magneto-aktivnih elastomerov je prepletanje magnetnih in elastičnih lastnosti. Elastomerna matrika mora biti dovolj mehka, da sta magnetna energija induciranih magnetnih dipolov in prožnostna energija matrike istega reda velikosti. Predlaganih je bilo več analitičnih pristopov obravnave MAE s teorijo povprečnega polja in kontinuumskim modelom, razvija pa se tudi modeliranje z računalniškimi simulacijami [3]. Podrobneje bomo predstavili grobo zrnato modeliranje s simulacijo na osnovi principov molekularne dinamike.

Simulacija po principu molekularne dinamike napove obnašanje kompleksnih sistemov, če znamo zapisati zvezne potenciale, ki vplivajo nanje. Definiramo začetno lego in hitrost vsakega delca. Simulacija na vsakem koraku iz potenciala določi sile na delce in preko gibalne enačbe izračuna njihove premike ter nove hitrosti. Nato popravi koordinate in hitrosti in ponovi postopek [4]. Zaradi velikega števila podatkov (6 n koordinat za n delcev) in malih časovnih korakov je ta metoda računsko zelo zahtevna.

V članku [5] so predstavljeni rezultati tovrstne simulacije za model tanke trodimenzionalne plasti MAE materiala na ravnem substratu. Magnetni delci so predstavljeni kot mehke kroglice s točkastim magnetnim dipolom v središču, polimerna matrika pa kot mreža elastičnih vzmeti med njimi.

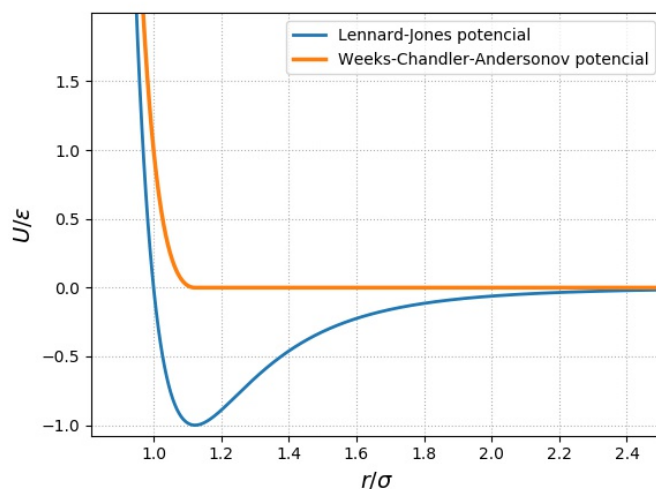
Interakcijo med mehкими kroglicami s premerom σ opišemo z Weeks-Chandler-Andersonovim potencialom

$$U_{WCA} = \begin{cases} U_{LJ}(r; \epsilon, \sigma) - U_{LJ}(r_{min}; \epsilon, \sigma), & r < r_{min} \\ 0, & r \geq r_{min}, \end{cases} \quad (1)$$

kjer je

$$U_{LJ}(r; \epsilon, \sigma) = 4\epsilon \left[\left(\frac{\sigma}{r} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r} \right)^6 \right] \quad (2)$$

Lennard-Jonesov potencial z globino epsilon in minimumom pri r_{min} . V izrazu 1 je ta potencial odre-
zan pri minimumu in prestavljen navzgor, da je interakcija povsod odbojna. Potential v reduciranih koordinatah je prikazan na sliki 3.



Slika 3. Weeks-Chandler-Andersonov potencial med mehкими kroglicami v reduciranih koordinatah.

Magnetne lastnosti kroglic predstavimo s točkastim dipolom \mathbf{m} v njihovem središču. Med točkastima dipoloma deluje potencial,

$$U_{dd}(\mathbf{r}_{ij}; \mathbf{m}_i, \mathbf{m}_j) = \frac{\mathbf{m}_i \cdot \mathbf{m}_j}{r^3} - \frac{3[\mathbf{m}_i \cdot \mathbf{r}_{ij}][\mathbf{m}_j \cdot \mathbf{r}_{ij}]}{r^5}, \quad (3)$$

kjer \mathbf{r}_{ij} povezuje središči delcev.

Če postavimo dipole v zunanje magnetno polje, se pojavi še Zeemanov potencial

$$U_Z(\mathbf{m}_i, \mathbf{B}) = -\mathbf{m}_i \cdot \mathbf{B}, \quad (4)$$

ki jih poskuša usmeriti v smer polja.

Polimerna matrika je predstavljena implicitno kot mreža elastičnih vzmeti med središči kroglic. Uporabimo potencial harmonske vzmeti,

$$U_K(r) = \frac{K}{2} (r - R_0)^2, \quad (5)$$

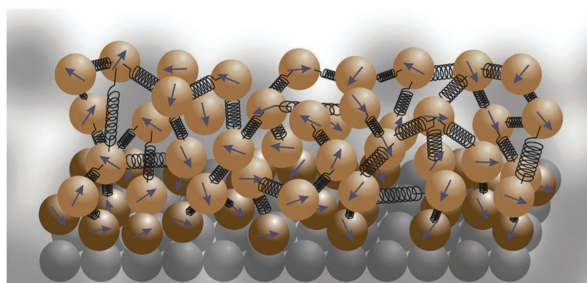
kjer je K elastična konstanta vzmeti, R_0 pa ravnovesna razdalja med središčema povezanih delcev. S tako definiranim potencialom polimerna matrika otežuje translacijo delcev, ne vpliva pa na njihovo rotacijo na določenem mestu.

Obnašanje magnetnih delcev opišemo s translacijsko in rotacijsko Langevinovo enačbo. Dobimo jo tako, da Newtonovim enačbam gibanja prištejemo stohastične člene in translacijsko ter rotacijsko trenje.

$$\begin{aligned} m_i \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} &= \mathbf{F}_i - \Gamma_T \mathbf{v}_i + \boldsymbol{\xi}_{i,T}, \\ \mathbf{J}_i \frac{d\boldsymbol{\omega}_i}{dt} &= \mathbf{M}_i - \Gamma_R \boldsymbol{\omega}_i + \boldsymbol{\xi}_{i,R}, \end{aligned} \quad (6)$$

kjer sta \mathbf{F}_i in \mathbf{M}_i sila in navor, ki delujeta na delec z maso m_i in tenzorjem vztrajnostnega momenta \mathbf{J}_i . Γ_T in Γ_R sta konstanti translacijskega in rotacijskega notranjega trenja. $\boldsymbol{\xi}_{i,T}$ in $\boldsymbol{\xi}_{i,R}$ sta Gaussovska porazdeljena naključna sila in navor, s katerima upoštevamo termično gibanje polimerov. Ker je namen simulacije opazovanje statičnih lastnosti, so vrednosti trenja nepomembne in so izbrane tako, da je čas relaksacije čim manjši.

Uporabljene so reducirane spremenljivke, masa delca je $m_i = 1$, reduciran premer $\sigma = 1$, $\epsilon = 1$, dipolni moment $\mu = 2$. Opazovali bomo polja $B \leq 7$. Spodnja plast delcev je adsorbirana na substrat, kar pomeni, da se delci v tej plasti lahko premikajo samo vzporedno s substratom.

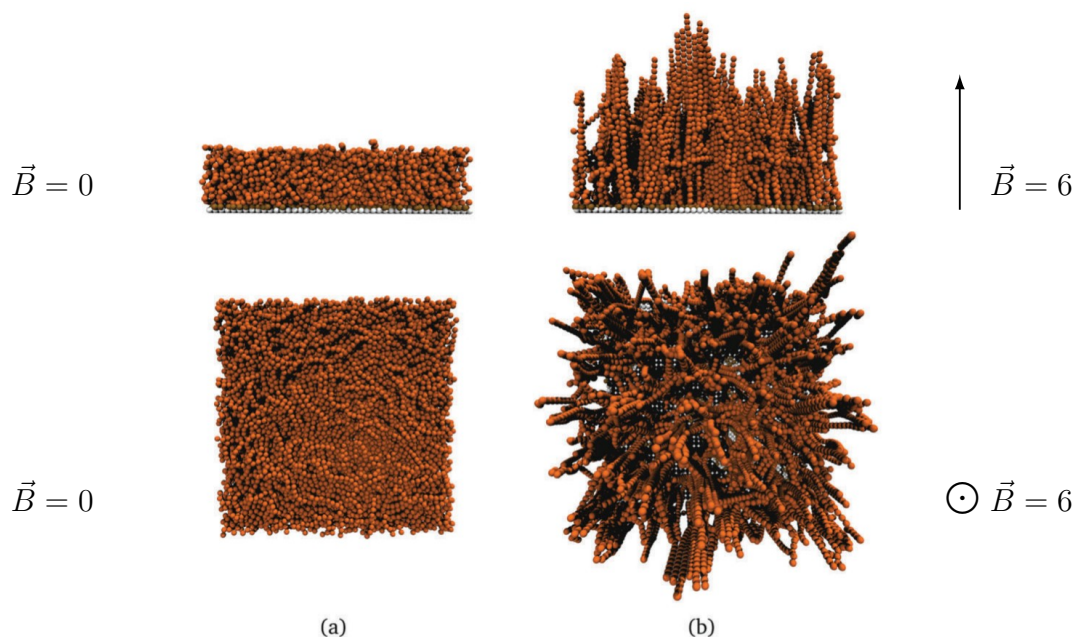


Slika 4. Skica modela MAE. Magnetni delci so prikazani kot kroglice s točkastim dipolom v središču, povezujejo pa jih vzmeti. Skica iz [5].

Začetno stanje, ki je prikazano na sliki 4, pripravimo tako, da homogeno razporejene kroglice z naključno usmerjenim magnetnim dipolnim momentom povežemo z vzmetmi. Naključno izberemo pare kroglic, katerih središča so oddaljena manj kot $r \leq 5$ (5 premerov delcev) in jim priredimo harmonski potencial (enačba 5). Ravnovesna razdalja R_0 je razdalja med središčema delcev v trenutku, ko dodamo vzmet. Vrednost K je dodeljena iz normalne porazdelitve s povprečjem $\bar{K} = \frac{K_{min} + K_{max}}{2}$ in standardno deviacijo $s^2 = \left(\frac{K_{max} - K_{min}}{6} \right)^2$, kjer vrednosti omejimo med K_{min} in K_{max} . Izbira parametrov K_{min} in K_{max} določi prožnost matrike. Vsak delec je lahko povezan z največ 6 vzmetmi.

Simulacija teče, dokler sistem ne doseže stacionarnega stanja, torej da energija ostaja konstantna in da so premiki delcev zanemarljivo majhni. Iz rezultatov simulacije na sliki 5 (a) vidimo, da delci v odsotnosti zunanega magnetnega polja tvorijo verige v ravninah, ki so vzporedne substratu. Energija dipolne interakcije je najmanjša, ko se južni magnetni pol delca približa severnemu polu drugega delca. Tako orientirani delci lahko tvorijo verigo. Za nastavek verige v horizontalni ravnini

Magneto-inducirane površinske strukture



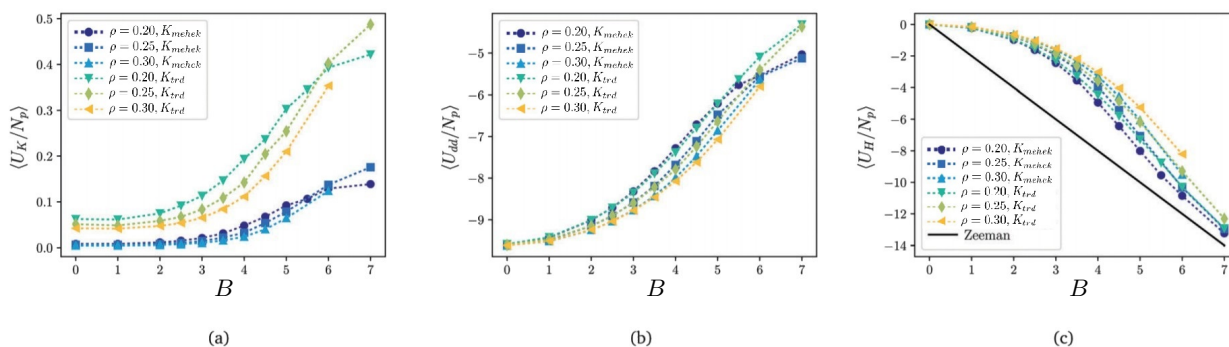
Slika 5. Rezultati simulacije. Zgoraj je stranski pogled, spodaj pa tloris vzorca. (a) Stanje sistema v $B = 0$. (b) Sistem v magnetnem polju $B = 6$. Slika iz [5].

so potrebni manjši premiki in zasuki delcev, ki le malo povečajo elastično energijo, zato je to stanje energijsko ugodno.

Stanje se precej spremeni, ko vključimo magnetno polje pravokotno na substrat (slika 5 (b)). Ker poravnava dipolov s smerjo magnetnega polja manjša energijo, lahko kompenzira velike elastične deformacije, ki so potrebne za tvorbo navpičnih verig. Pojavijo se igličaste površinske strukture. Efekt je močnejši pri manjših vrednostih K , torej pri bolj prožni mreži vzmeti.

3.1 Obravnava energij

Z izračunom razmerij energij lahko bolj podrobno opazujemo tekmovanje med elastičnimi in magnetnimi lastnostmi. Na grafih 6 (a) in (b) opazimo, da prožnostna energija in energija dipolov rasteta

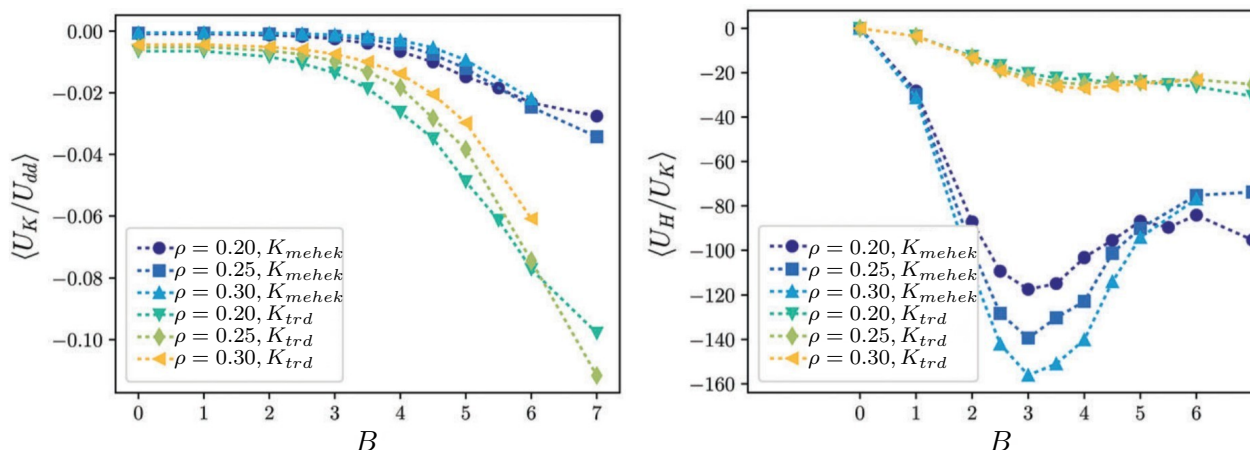


Slika 6. Povprečne vrednosti energij na delec (a - c), izračunano iz simulacije za več gostot delcev in trdot matrike. U_K , U_{dd} in U_H so po vrsti prožnostna energija, energija dipolov in Zeemanova energija. Prirejeno po [5].

s poljem. To pomeni, da sile med magnetnimi dipoli in prožnostne sile nasprotujejo nastanku površinskih struktur. Dipolna energija raste zaradi neugodnih interakcij med vzporednimi verigami. Zeemanova energija (6 (c)) pa se seveda manjša, saj se dipoli obračajo v smer polja.

Iz grafov (a) - (c) na sliki 6 je razvidno tudi, da se v zmernem polju elastična energija bolj poveča vzorcem z manjšo gostoto delcev. V teh vzorcih nastane več verig, ki so poravnane z magnetnim

poljem, zato ima ta vzorec najmanjšo Zeemanovo energijo. V sistemih s tršo matriko opazimo višje vrednosti prožnostne energije.



(a) Razmerje prožnostne in dipolne energije.

(b) Razmerje Zeemanove in prožnostne energije.

Slika 7. Razmerja energij. Prirejeno po [5].

Poglejmo si še graf 7 (a), ki prikazuje razmerje prožnostne in dipolne energije. Dipolna energija raste hitreje kot prožnostna. To pomeni, da šibko polje povzroči rotacijo dipolov, višja polja pa povzročijo znatne premike delcev.

To ugotovitev potrди tudi graf 7 (b), ki prikazuje razmerje Zeemanove in elastične energije. Graf ima izrazit minimum za sisteme z mehko matriko. To pomeni, da imamo dva režima v odzivu elastomera na polje. Za polja, manjša od $B \sim 3$, dominirajo rotacije, pri višjih poljih pa prevladuje translacijska preureditev delcev.

3.2 Hrapavost površine

Iz rezultatov simulacije lahko določimo tudi nekatere lastnosti površin. Na sliki 8 je prikazan zemljevid višine površine. Opazimo nastanek vrhov v prisotnosti zunanega magnetnega polja. Ti so višji in bolj razmaknjeni v primeru mehkejše matrike.

Potrebno je omeniti, da na dosedanjih slikah ni prikazana polimerna matrika, saj je v modelu prikazana implicitno kot sistem vzmeti. Konfiguraciji na sliki 8 (c) dodamo preproste modele polimerov kot verige, ki povezujejo prej izbrane delce. S tem pokrijemo vse regije na substratu, ampak površina vseeno ni gladka. Rezultat je prikazan na sliki 8 (d). Ozki vrhovi se spremenijo v goram podobne strukture, kar se ujema z eksperimentalnimi ugotovitvami. Model površine horizontalno diskretiziramo in izračunamo RMS hrapavost.

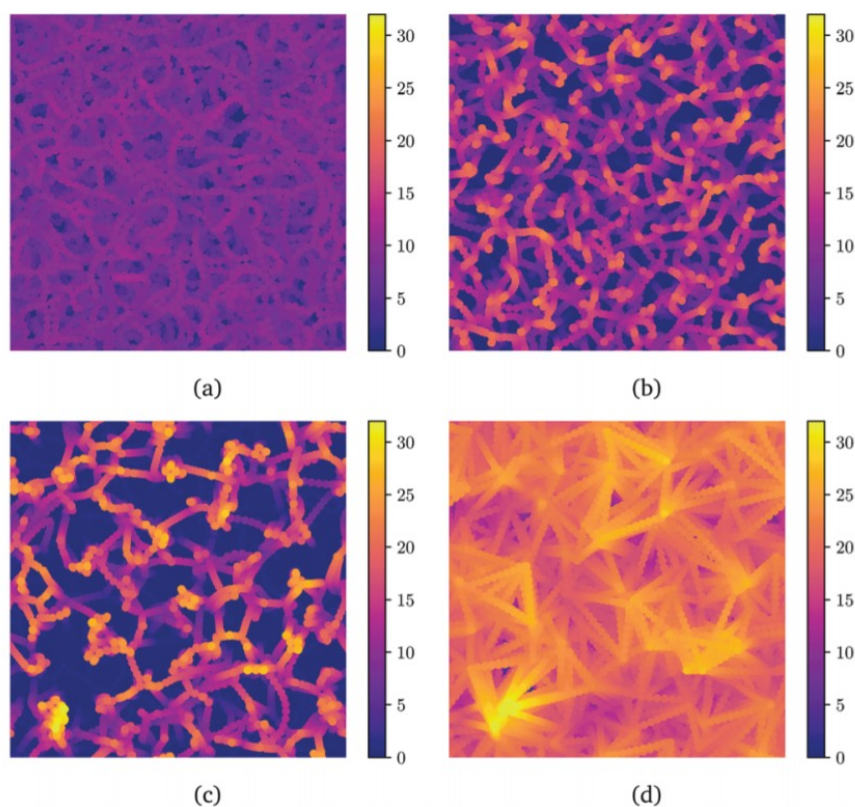
Root mean square (RMS) hrapavosti je parameter, s katerim ovrednotimo hrapavosti površine. Definiran je z enačbo

$$R_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2}, \quad (7)$$

kjer je \bar{z} povprečna višina površine.

Na grafu 9 je prikazana odvisnost RMS hrapavosti vzorcev od magnetnega polja. Kot pričakujemo, je hrapavost večja za sisteme z mehkejšo matriko in pri vseh vzorcih raste, ko povečujemo magnetno polje. Vidimo, da se hrapavost najbolj poveča sistemom z zmerno gostoto delcev. Iz tega lahko sklepamo, da za določeno trdoto matrike obstaja optimalna koncentracija delcev za nastanek površinskih struktur v magnetnem polju.

Magneto-inducirane površinske strukture



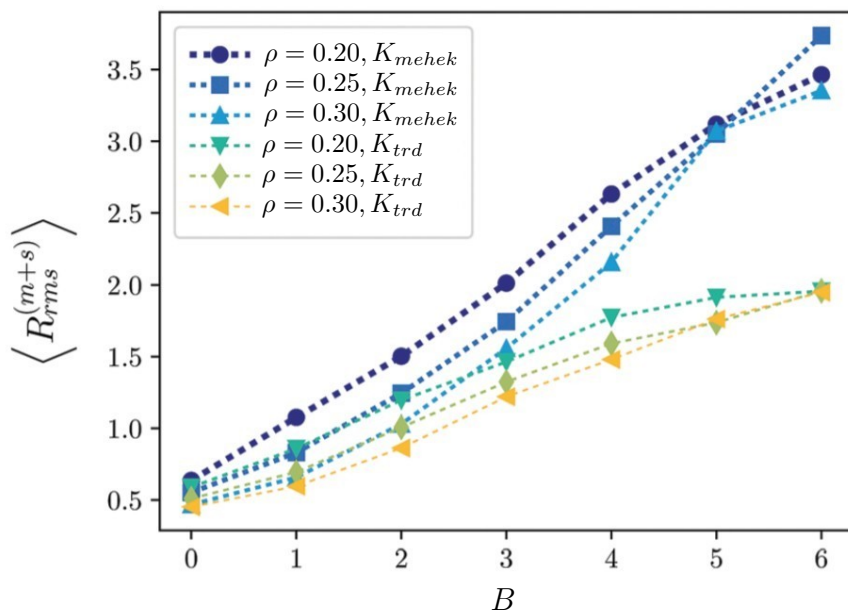
Slika 8. Zemljevidi višine površine z enako gostoto delcev in a) trdo matriko, $B = 0$, b) trdo matriko, $B = 6$, c) mehko matriko, $B = 6$ in d) enaki parametri kot v c) z dodanim prikazom vzmeti. Slika iz [5].

4. Opazovanje površinskih struktur in merjenje hrapavosti

Teoretične napovedi in tudi opazovanje s prostim očesom nas prepričajo, da se površina magnetoaktivnega elastomera spremeni v magnetnem polju. Za podrobno analizo teh sprememb uporabljamo različne metode. Površinske strukture lahko opazujemo z vrstičnim elektronskim mikroskopom (SEM), ki ima ločljivost velikostnega reda nanometer, ali pa z mikroskopom na atomsko silo (AFM). Na sliki 10 je prikazana površina MAE z 70 masnimi odstotki karbonilnega železa, slikana s SEM.

Na sliki 10 vidimo, da imajo površinske strukture lateralno dimenzijo reda velikosti mikrometrov, zato jih lahko zaznamo tudi z optičnimi mikroskopi. Ločljivost slik optičnega mikroskopa je približno 1000x manjša, vendar pa imajo optične metode veliko prednost. Optične meritve lahko izvajamo v prisotnosti magnetnega polja, medtem ko bi pri elektronski mikroskopiji magnetno polje ukrivilo pot curka in popačilo sliko. Vzorci za elektronsko mikroskopijo so med trdenjem izpostavljeni magnetnim poljem različnih jakosti. Nastanejo trdni vzorci s hrapavo površino, ki je ne moremo spreminjati. Med slikanjem magnetno polje ni prisotno.

V nadaljevanju opisane meritve so izvedene na izotropnih MAE, ki trdijo v odsotnosti magnetnega polja. Ti vzorci so zelo gladki in postanejo hrapavi šele v prisotnosti zunanega magnetnega polja. Hrapavost je manjša kot pri prej opisanih vzorcih, vendar pa so spremembe reverzibilne. To nam omogoča opazovanje površinskih struktur z optičnimi metodami v realnem času. Med meritvijo lahko spreminjamo magnetno polje. Če uporabljamo permanentni magnet, spreminjamo oddaljenosti magneta od vzorca. Druga možnost je uporaba elektromagneta, ki nam omogoča spreminjanje gostote magnetnega polja s tokom.



Slika 9. RMS hrapavosti površine v odvisnosti od magnetnega polja za sisteme z različnimi parametri. V izračun je bil upoštevan tudi sistem vzmeti. Prirejeno po [5].

4.1 Meritve hrapavosti na osnovi razpršenega odboja svetlobe

Meritve razpršenega odboja svetlobe opravimo z laserskim žarkom, ki se odbije od površine vzorca. Žarek preusmerimo na zaslon. Če je površina vzorca ravna, je odboj zrcalni. Če pa je površina hrapava, pride do razpršenega oz. difuznega odboja. Svetloba se razprši v konično območje prostora, kar na oddaljenem zaslonu vidimo kot okroglo liso. Bolj kot je površina hrapava, večji je kot θ (glej sliko 11) in večji je polmer lise. Sliko zajamemo s kamero ali pa s premikanjem fotodiode izmerimo prečni profil intenzitete odbite svetlobe. Povzeti bodo rezultati, objavljeni v [2].

Grafa na sliki 12 prikazujeta krajevno odvisnost intenzitete odbite svetlobe na oddaljenem zaslonu. Vidimo, da se svetloba bolj razprši, ko je vzorec v magnetnem polju, torej je takrat njegova površina bolj hrapava. Profilu intenzitete nato prilagajamo Gaussovo funkcijo in širino na polovični višini $FWHM = 2\sqrt{2 \ln 2} \sigma$ uporabimo za izračun efektivnega kota koničnega širjenja žarka

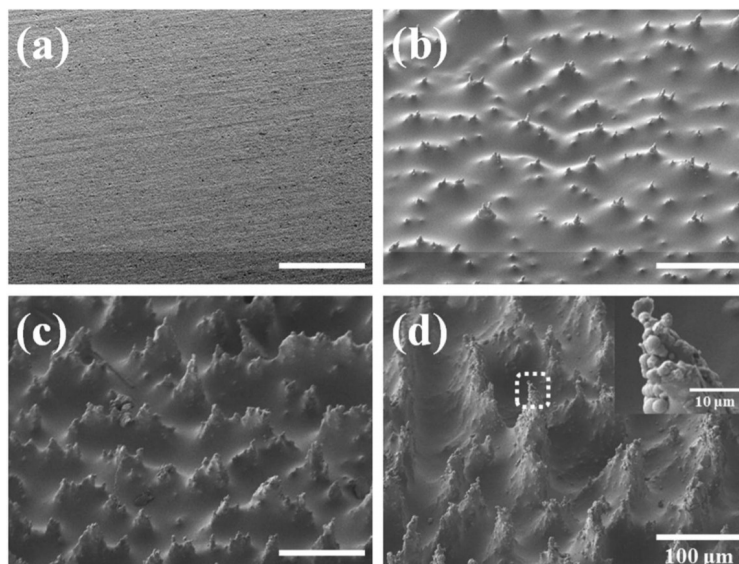
$$\theta = \frac{FWHM}{2d}, \quad (8)$$

kjer je d razdalja od vzorca do zaslona.

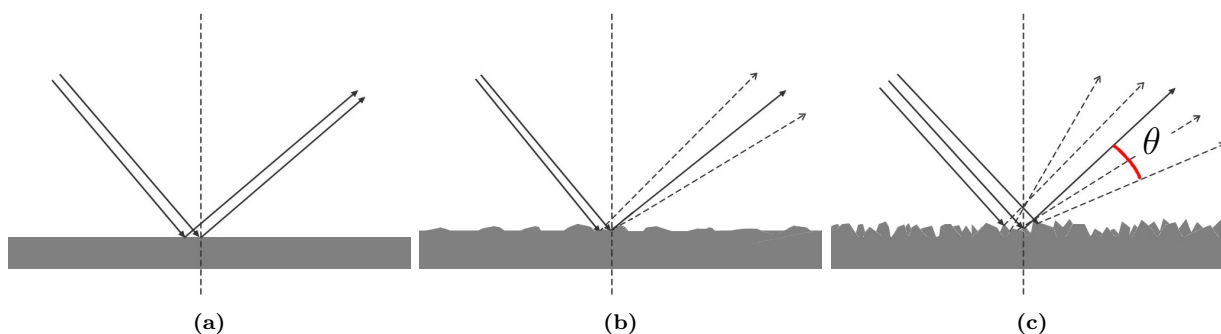
Na sliki 13 so prikazani rezultati meritev razpršenega odboja za mehak elastomer (realni del strižnega modula $G' = 7.5$ kPa oz. $G' = 419$ kPa v magnetnem polju $B = 0.23$ T) s 70 masnimi odstotki kroglic karbonilnega železa s polmerom $4.5 \mu\text{m}$. Rezultati kažejo izrazito histerezo, ki je značilna tudi za spremembe reoloških lastnosti mehkih magneto-aktivnih elastomerov. Vidimo, da so spremembe reverzibilne.

4.2 Izračun hrapavosti iz analize razpršenega odboja

Če poznamo karakteristično vzdolžno dimenzijo in predpostavimo določeno obliko površinskih struktur, lahko iz vrednosti θ , prikazanih na sliki 11, določimo RMS hrapavost materiala. Predpostavimo, da so površinske strukture trikotne oblike z vzdolžno dimenzijo $L \sim 100 \mu\text{m}$ (slika 14). Trikotno obliko opišemo s funkcijo $z(x) = \frac{2h}{L}x$.



Slika 10. Slika površine MAE. Vzorec je bil trjen v magnetnem polju a) 0 mT, b) 155 mT, c) 210 mT, d) 250 mT. Slika iz [6].



Slika 11. Zrcalni odboj od ravne površine in razpršen odboj od hrapavih površin. Hrapavost narašča proti desni.

Hrapavost takšne površine izračunamo kot

$$R_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L z^2(x) dx} = \frac{h}{\sqrt{3}}, \quad (9)$$

kjer je h višina trikotnika.

Sedaj pa izračunajmo kot širjenja razpršene svetlobe po odboju od trikotne površine z naklonom γ . Kot med žarkoma, ki se zrcalno odbijeta na stranicah, je 4γ . S θ smo označili polovični kot razpršenega žarka, torej $\theta = 2\gamma$ oz. $\gamma = \frac{\theta}{2}$. Sedaj lahko iz geometrije trikotnika izrazimo

$$\tan \frac{\theta}{2} = \frac{2h}{L}, \quad (10)$$

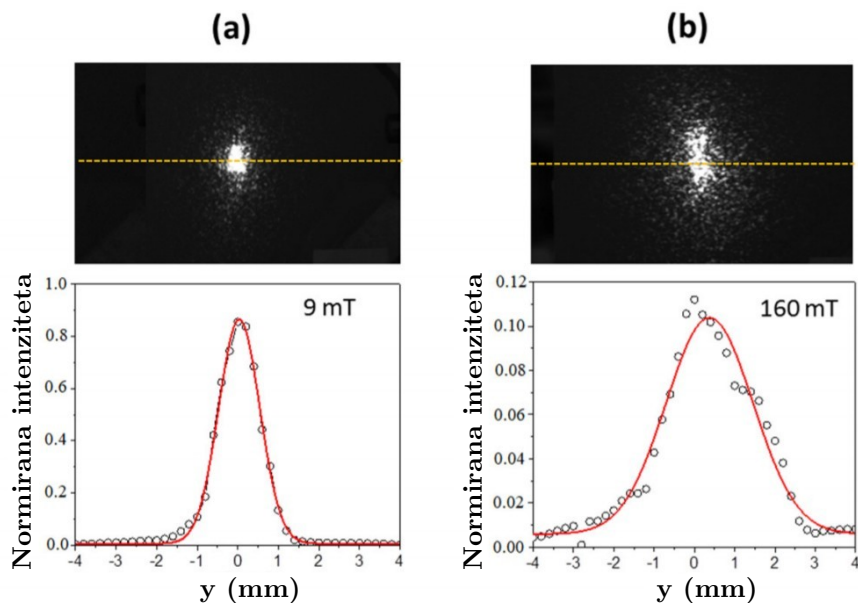
torej je

$$R_{RMS} = \frac{L}{2\sqrt{3}} \tan \frac{\theta}{2} \quad (11)$$

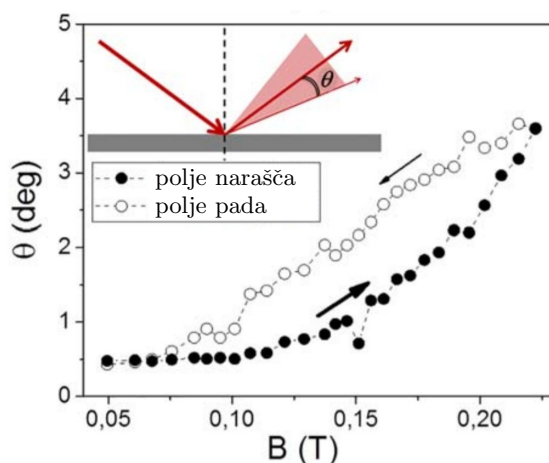
izraz za RMS hrapavost površine dobljen iz meritev razpršenega odboja.

4.3 Optimizacija sestave materiala

Nadaljne raziskave, povzete po [7], so bile posvečene optimizaciji sestave MAE za doseganje čim večjih sprememb RMS hrapavosti površine. Primerjali bomo štiri vzorce, ki se razlikujejo po velikosti



Slika 12. Slika odbite svetlobe s površine vzorca na oddaljenem zaslonu (zgoraj) in prečni profil intenzitete slike vzdolž rumene linije na zgornji sliki (spodaj). Vzorec je v magnetnem polju (a) $B = 9$ mT (b) $B = 160$ mT. Prirejeno po [7].

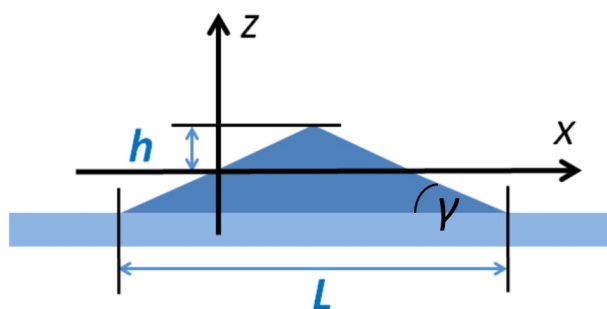


Slika 13. Rezultati meritve optične reflektivnosti. Prirejeno po [2].

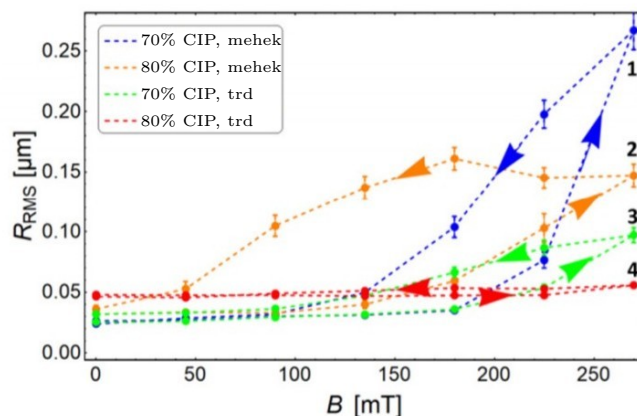
strižnega modula (mehek, trd) in masnem odstotku delcev karbonilnega železa (CIP) (70 masnih %, 80 masnih %). Na grafu 15 so prikazane odvisnosti RMS hrapavosti od magnetnega polja za našete vzorce. Vidimo, da dosežemo večji odziv pri vzorcih z mehko matriko. Pri enaki trdoti matrike pa se hrapavost bolj poveča vzorcu z manjšo koncentracijo delcev karbonilnega železa. Največja opažena sprememba hrapavosti je $1 \frac{\mu\text{m}}{\text{T}}$.

Za potencialne aplikacije je pomembna tudi časovna skala odziva materiala na spremembe magnetnega polja. Opazujemo spreminjanje intenzitete svetlobe v sredini lise na zaslonu po vklopu oz. izklopu elektromagneta. Rezultati meritev so prikazani na grafu 16.

Odziv na izklop elektromagneta je sprva hiter, nato pa se nadaljuje v počasno popolno relaksacijo. Dobljene krivulje so prilagojene na vsoto dveh eksponentnih funkcij, krajši karakteristični čas pa upoštevamo kot vklopni čas τ_{ON} . Na grafu 16 opazimo nemonoton potek intenzitete pri ugašanju magnetnega polja. Karakteristični čas za ugašanje polja τ_{OFF} je določen kot interval med trenutkom izklopa polja in prvim maksimumom krivulje. Vrednosti τ_{OFF} so nekajkrat daljše od τ_{ON} in naraščajo z naraščajočim magnetnim poljem.



Slika 14. Skica predpostavljene površinske strukture.

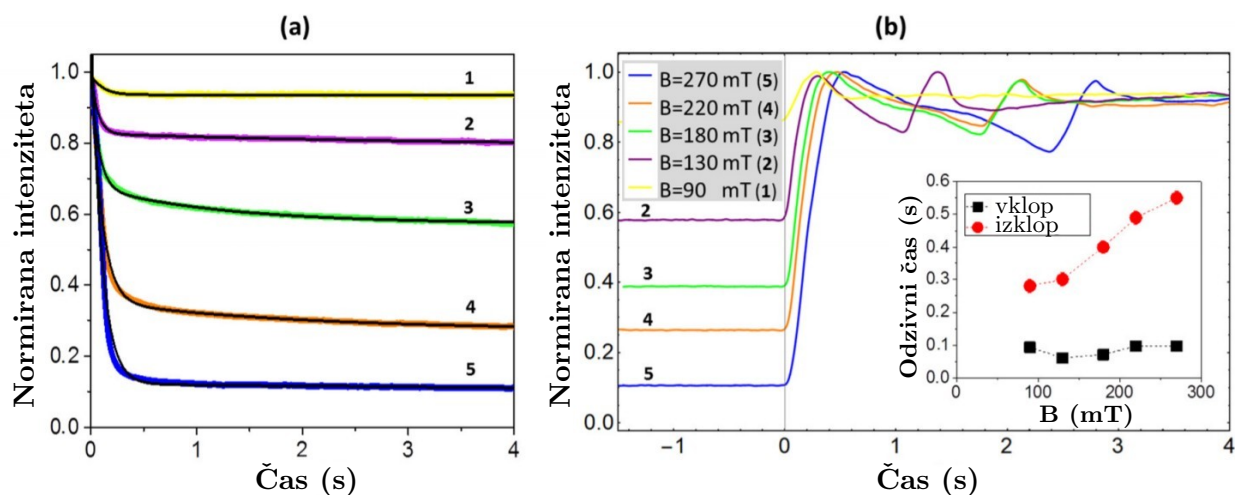


Slika 15. Odvisnost RMS hrapavosti površine MAE od zunanjega magnetnega polja. Prirejeno po [7].

5. Zaključek

Simulacije in eksperimenti kažejo, da lahko z magnetnim poljem spreminjamo hrapavost magnetno-aktivnih elastomerov. Pojav je reverzibilen. Nadzor nad mikroskopsko strukturo površin je zanimiv s stališča premazov, katerih lastnosti spreminjamo z magnetnim poljem.

Raziskuje se vpliv magnetnega polja na kontaktni kot kapljice na MAE površini. Poleg površinske hrapavosti na kontaktni kot vplivajo tudi hidrofilni ali hidrofobni premazi magnetnih delcev. Spreminjajoča se površinska struktura materialov je zanimiva tudi za biologe, saj vpliva na rast celic. Za medicinske namene pa potekajo raziskave kontrolirane razpršitve pri depoziciji kapljic na trdne substrate. Razpršitev kapljice je povezana s hrapavostjo, zato so MAE materiali odlični za preučevanje tega pojava. Razvijajo se tudi nove metode izdelave MAE, na primer s 3D tiskanjem. Z razumevanjem lastnosti MAE se pojavlja vedno več idej za njihovo uporabo, zato lahko v naslednjih letih pričakujemo hiter razvoj na tem področju.



Slika 16. Časovni potek intenzitete odbite svetlobe po (a) vklopu ali (b) izklopu elektromagneta. Prirejeno po [7].

LITERATURA

- [1] L. Yancheng in dr., *A state-of-the-art review on magnetorheological elastomer devices*, Smart Materials and Structures **23** (12) (2014), 1-24.
- [2] G. Glavan in dr., *Tunable surface roughness and wettability of a soft magnetoactive elastomer*, Journal of Applied Polymer Science **135** (2018), 46221-1-8.
- [3] D. Ivaneyko in dr., *Magnetorheological Elastomers*. Encyclopedia of Polymeric Nanomaterials (2014).
- [4] R. Dror, *Molecular dynamics simulation [online]*. 2019. [ogled 10. feb. 2020]. Dostopno na: <https://web.stanford.edu/class/cs279/lectures/lecture4.pdf>
- [5] P. A. Sánchez in dr., *Surface relief of magnetoactive elastomeric films in a homogeneous magnetic field: molecular dynamics simulations*. Soft Matter **15** (2019), 175–189.
- [6] S. Lee in dr., *Magnetorheological Elastomer Films with Tunable Wetting and Adhesion Properties*. ACS Applied Materials & Interfaces **7** (2015), 19853–19856.
- [7] G. Glavan in dr., *Effect of Material Composition on Tunable Surface Roughness of Magnetoactive Elastomers*. Polymers **11** (2019), 594.