



ATOMINIŲ JĖGŲ MIKROSKOPO JUTIKLIO MECHANINĖS STRUKTŪROS ANALIZĖ

Andrius DZEDZICKIS¹, Vytautas BUČINSKAS²

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

El. paštas: ¹andrius.dzedzickis@vgtu.lt; ²vytautas.bucinskas@vgtu.lt

Santrauka. Atominės jėgos mikroskopija (AJM) – metodas, leidžiantis gauti ypač didelės skiriamosios gebos tiriamojo bandinio paviršiaus vaizdą. Straipsnyje nagrinėjamos problemos, susijusios su atominių jėgų mikroskopo jutiklio mechaninės struktūros modeliavimu. Remiantis mokslininkų atliktais darbais aprašomi dažniausiai taikomi modeliavimo metodai, pateikiamos pagrindinės lygtys, nagrinėjama įvairių veiksnių įtaka sistemos dinaminėms charakteristikoms, aptariami atliktų tyrimų rezultatai.

Reikšminiai žodžiai: atominių jėgų mikroskopija, modeliavimas, sistemos dinaminės charakteristikos.

Įvadas

Atominės jėgos mikroskopija (AJM) – metodas, leidžiantis gauti ypač didelės skiriamosios gebos tiriamojo bandinio paviršiaus vaizdą. Atominės jėgos mikroskopas yra universaliausias įrenginys tarp įrenginių, turinčių skenuojančio zondo technologiją. Šių įrenginių veikimo principas yra pagrįstas pastovios sąveikos jėgos tarp zondo ir bandinio paviršiaus užtikrinimu. Darbo metu atominių jėgų mikroskopas labai aštriu antgaliu (zondų) paliečia tiriamąjį paviršių ir pradeda judėti jo paviršiumi. Skenuojančio zondo judėjimo trajektorija vertikalioje kryptimi atitinka tiriamojo paviršiaus formą. Skenuojant yra stengiamasi užtikrinti minimalią sąveikos jėgą tarp zondo ir tiriamojo paviršiaus. Pastovi sąveikos jėga užtikrinama matuojant zondo poslinkį ir per atgalinį ryšį valdant pjezoelektrines pavaras, kurios naudojamos bandiniui pozicionuoti. Jei sąveikos jėgos didėja, bandinys nuleidžiamas žemiau, jei mažėja, keliamas aukštyn. Svarbiausias ir labiausiai mokslininkus dominantis atominio mikroskopo mazgas – mechaninė jutiklio dalis. Daug dėmesio yra skiriama šioms mechaninėms struktūroms modeliuoti, gaminti ir jų dinaminėms charakteristikoms tirti.

Pirmųjų atominių mikroskopų jutikliai buvo pagaminti iš deimantinės adatos, kuri buvo tvirtinama prie 25 mikrometrų storio ir 0,8 milimetro ilgio aukso folijos atplaišos. Aukso folijos gabalėlis, kurio vienas galas buvo tvirtinamas nejudamai, atlikdavo svirtelės vaidmenį. Būtent ši svirtelė ir leisdavo adatai judėti statmena paviršiui kryptimi. Ši svirtelė

buvo pati sudėtingiausia mikroskopo mechaninė detalė. Ją buvo sudėtinga pagaminti, nes reikėjo pasiekti, kad ji būtų gana plona ir deformuotųsi dėl atominių jėgų, veikiančių tarp deimantinės adatos antgalio ir tiriamojo paviršiaus. Svirtelė taip pat turėjo būti gana lengva, kad jos savasis virpesių dažnis siektų kelis kilohercus. Esant žemesniems rezonansiniams dažniams atsiranda tikimybė, jog darbo metu adata nebeseks paviršiaus, bet pradės virpėti rezonansiniu svirtelės dažniu (Lindley 2012).

Atominių jėgų mikroskopo jutiklio mechaninės dalies konstrukcija išliko nepakitusi iki šių dienų, pasikeitė tik svirtelės geometrinė forma, matmenys ir medžiaga, naudojama jos gamybai. Priklausomai nuo skenavimo greičio, norimų gauti duomenų tikslumo, tiriamos medžiagos fizinių savybių yra naudojamos stačiakampės arba trikampės svirtelės. Šiuo metu svirtelės yra gaminamos iš silicio nitrido (Si_3N_4); taikant ėsdinimo technologijas svirtelių ilgis dažniausiai neviršija 400 μm , plotis būna iki 50 μm , storis nuo 0,5 iki 8 μm (Ardešhir, Mohammadi 2010). Nepaisant to, kad jutiklio konstrukcija nesikeičia jau daug metų ir kad yra sukauptas didžiulis žinių kiekis, svirtelės modeliavimo ir optimalių geometrinų parametrų paieškos klausimas išlieka aktualus. Jutiklio mechaninės sistemos dinaminės charakteristikos tebėra aktualus klausimas, ypač didinant mikroskopo skenavimo greitį ir matavimo rezultatų tikslumą bei patikimumą.

Atominių jėgų mikroskopo jutiklio mechaninės struktūros modeliavimas

Atominių jėgų mikroskopo jutiklio mechaninė struktūra dažniausiai yra modeliuojama kaip netiesinis deformuojamos plokštelės uždavinys. Mokslininkai M. H. Korayem, M. Damircheli (2014) straipsnyje „The effect of fluid properties and geometrical parameters of cantilever on the frequency response of atomic force microscopy“ aprašo tokį jutiklio mechaninės struktūros modelį, kuris pateikiamas 1 pav.

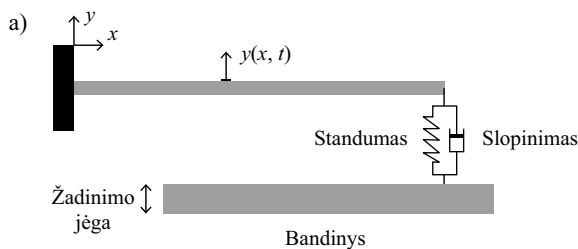
Tyrėjai sprendė uždavinį taikydami Timošenko (Timoshenko) pasiūlytą metodą, tinkantį deformuojamoms, stačiakampėms pastovaus skerspjūvio svirtelėms skaičiuoti. Timošenko modelis nuo modelio, aprašomo Eulerio ir Bernulio lygtimis, skiriasi tuo, kad tiriant sistemos dinaminį atsaką yra įvertinama skenuojančios adatos glėžimo deformacija bei sukamųjų judesių inercija. Šis modelis paprastai yra taikomas trumpoms svirtelėms skaičiuoti, nes įvertinama daugiau faktorių, gaunami tikslesni rezultatai (Korayem, Damircheli 2014). Taikant šį modelį tiriamoji sistema yra aprašoma dinamine pusiausvyros lygtimi:

$$[M]\{\ddot{d}\} + [c]\{\dot{d}\} + [K]\{d\} = \{Fe\}, \quad (1)$$

čia $\{Fe\}$ – žadinimo jėga

$$\{Fe\} = A\omega^2 e^{i\omega t} [M]\{1, 0, 1, 0, \dots\}^T. \quad (2)$$

Šiame modelyje yra taikoma prielaida, jog glėžimo įtempiai nėra lygūs nuliui, todėl, palyginti su tradicine teorija, uždavinio sąlygoje skiriasi tik standumo ir masės matricių išraiškos (Arinero, Lévêque 2003). Mokslininkai tai pat įvertino sąlygą, jog skenavimas atominių jėgų mikroskopu dažniausiai vykdomas bandinio paviršių padengus skysčio sluoksniu, t. y. svirtelė virpa ne ore, bet skystyje, todėl tyrėjai savo darbe vertino ne tik plokštelės geometrinį parametrą, bet ir skysčio įtaką sistemos dinaminėms savybėms.



Statmena kryptimi sąveikos jėga skystyje modeliuojama remiantis Derjaguin, Landau, Verwey ir Overbeek (DLVO) bei DMT teorija (Korayem, Damircheli 2014). Sąveikos jėga tarp sferinės zondo viršūnės ir plokščiojo paviršiaus aprašoma lygčių sistema.

$$F_{sk-n}(d) = \begin{cases} F_{DLVO}(d) = \frac{4\pi\lambda_D R_t}{\epsilon\epsilon_0} \sigma_T \sigma_S e^{-d/\lambda_D} - \\ \frac{AR_t}{6d^2}, & d \geq a_0 \\ F_{DMT}(d) = \frac{4E_{eff}\sqrt{R_t}}{3} (a_0 - d)^{3/2} + \\ F_{DLVO}(a_0), & d < a_0 \end{cases}, \quad (3)$$

čia λ_D , σ_T , σ_S , ϵ , ϵ_0 , d – elektrostatinį efektą aprašantis Deby (Debye Length) koeficientas, zondo bei bandinio paviršinio krūvio tankis, dielektrinė terpės konstanta, dielektrinė skvarba, atstumas tarp zondo antgalio ir bandinio paviršiaus; E_{eff} – tamprumo modulis tarp skenuojančio antgalio ir tiriamojo paviršiaus; R_t – zondo viršūnės apvalinimo spindulys.

Skenuojančio zondo ir tiriamo paviršiaus sąveikos jėgą liestinės kryptimi mokslininkai aprašė (Korayem, Damircheli 2014) remdamiesi Herco teorija. Pagal šią teoriją liestinė sąveikos jėga aprašoma:

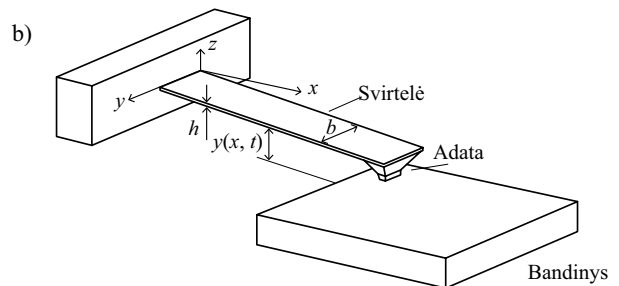
$$F_{sk-t}(d) = \begin{cases} 0, & d \geq a_0 \\ -8G_{eff} = \left(\frac{3R_t f_c}{4E_{eff}}\right)^{1/3} \Delta_t, & d < a_0 \end{cases}, \quad (4)$$

čia G_{eff} – šlyties modulis, f_c – normalinė sąveikos jėga.

Sumodeliavę sąveikos jėgas tarp zondo ir tiriamojo paviršiaus, tyrėjai užrašė dvi svirtelės poslinkių lygtis. Kai svirtelė virpa ore (5) ir kai svirtelė virpa skystyje (6):

$$\begin{aligned} (-\omega^2[M] + i\omega[c] + [K])\{\phi\} = \\ A\omega^2[M]\{1, 0, 1, 0, \dots\}^T; \end{aligned} \quad (5)$$

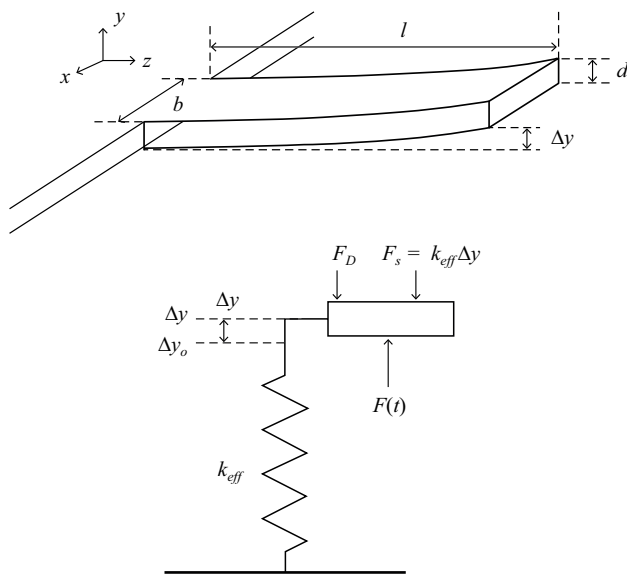
$$\begin{aligned} (-\omega^2[M + M_a] + i\omega[c + c_a] + [K])\{\phi\} = \\ A\omega^2[M + M_a] - i\omega[c_a]\{1, 0, 1, 0, \dots\}^T. \end{aligned} \quad (6)$$



1 pav. Atominių jėgų mikroskopo jutiklio mechaninės struktūros schema: a – dinaminis modelis; b – svirtelės konstrukcinė schema (Korayem, Damircheli 2014)

Fig. 1. Scheme for a mechanical structure of a microscope sensor of atomic force, a – dynamic model; b – construction scheme for the lever (Korayem, Damircheli 2014)

Panašų darbą atliko ir amerikiečių mokslininkai M. J. Martin, H. K. Fathy bei B. H. Houston. Pagrindinis jų darbo tikslas buvo nustatyti atominių jėgų mikroskopo jutiklio, kaip mechaninės sistemos, perdavimo funkciją. Spręsdami šią užduotį jie nagrinėjo modeliavimo klausimus, vertino skysčio įtaką svirtelės dinaminėms charakteristikoms. Atliktą darbą jie aprašė straipsnyje „Dynamic simulation of atomic force microscope cantilevers oscillating in liquid“ (Martin *et al.* 2008). Šie mokslininkai trimatį svirtelės modelį supaprastino iki dvimačio ir nagrinėjo svirtelės skerspjūvio poslinkius (2 pav.) kaip vieno laisvės laipsnio sistemos virpesius.



2 pav. Svirtelės skaičiuojamoji schema ir dinaminis modelis (Martin *et al.* 2008)

Fig. 2. Calculation scheme for the cantilever and a dynamic model (Martin *et al.* 2008)

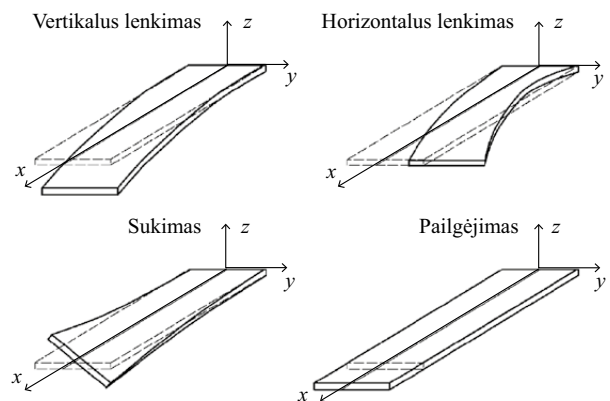
Mokslininkai savo dinaminį modelį aprašė taikydami parametrinį modeliavimo metodą. Siekiant supaprastinti modelio skaičiuojamąją schemą, skysčio įtaka virpesiams yra laikoma tiesiškai priklausančia nuo skenavimo greičio. Tokiu atveju modelis gali būti supaprastinamas iki tradicinio vieno laisvės laipsnio modelio, susidedančio iš masės, standumo ir slopinimo elementų (Sadeghi, Zohoor 2010). Supaprastintame modelyje atsiranda kitų problemų – nenustatomas fazės skirtumas tarp didžiausio greičio ir maksimalios skysčio sukeltos slopinimo jėgos (Moosapour *et al.* 2012). Siekiant neprarasti šio efekto įtakos, modeliuojant yra laikomasi to paties požiūrio, kaip ir makroskopinėje skalėje modeliuojant skysčio ir paviršiaus sąveiką (Martin *et al.* 2008). Svirtelės poslinkio lygtis yra sujungiamos su Navje ir Stokso (Navier Stokes) lygtimis,

apibūdinančiomis skysčio srauto sąveiką su skenuojančiu antgaliu taikant ryšio lygtis. Tuomet galutinė sistemos poslinkių lygtis:

$$m_{eff} \frac{d^2 y}{dt^2} = F(t) - F_D - k_{eff}(y - y_0), \quad (7)$$

čia žadinimo jėga $F(t) = F_0 \sin(\omega t)$, F_D – hidrodinaminė slopinimo jėga, k_{eff} – standumo koeficientas, $k_{eff} = \frac{8EI}{l^4}$, $m_{eff} = \frac{8m}{k_n^4}$, k_n – virpesių formos konstanta, E – medžiagos tamprumo modulis, I – inercijos momentas, l – svirtelės ilgis, m – svirtelės masė.

Tyrėjai Y. Song, B. Bhushan savo straipsnyje „Simulation of dynamic modes of atomic force microscopy using a 3D finite element model“ (2007) taip pat aprašo atominių jėgų mikroskopo jutiklio mechaninės dalies dinaminį savybių tyrimus. Šie mokslininkai įvertino svirtelės deformacijų formas skirtingomis kryptimis (3 pav.) bei smulkiai analizavo skenuojančios adatos ir paviršiaus sąveiką.



3 pav. Plokštelės deformacijos skirtingomis kryptimis (Song, Bhushan 2007)

Fig. 3. Deformation of plates in different directions (Song, Bhushan 2007)

Straipsnyje mokslininkai aptarė kiekvienos deformacijos formos įtaką bendroms sistemos savybėms. Pateikė visų keturių formų rezonansinius dažnius, aptarė atvejus, kada galima nevertinti horizontalaus lenkimo bei sukimo įtakos. Straipsnyje tyrėjai pateikė tiesinį ir netiesinį zondo sąveikos su tiriamuoju paviršiumi modelį. Netiesinį sąveikos modelį jie aprašė remdamiesi tomis pačiomis (3), (4) lygtimis kaip ir jų kolegos.

Tiesinį sąveikos aprašymo modelį galima taikyti, jei yra tenkinama prielaida, jog svirtelė virpa nedidele amplitude aplink pusiausvyros padėtį (Song, Bhushan 2007).

Tuomet sąveikos jėgos liestine, skersine ir statmena kryptimis išreiškiamos:

$$\begin{aligned} f_t &= -k_t(\Delta_t - a_t) - c_t(\dot{\Delta}_t - \dot{a}_t), \\ f_{sk} &= -k_{sk}(\Delta_{sk} - a_{sk}) - c_{sk}(\dot{\Delta}_{sk} - \dot{a}_{sk}), \\ f_n &= -k_n(\Delta_n - a_n) - c_n(\dot{\Delta}_n - \dot{a}_n), \end{aligned} \quad (8)$$

čia $k_p, k_{sk}, k_n, c_p, c_{sk}, c_n$ – standumo ir slopinimo koeficientai atitinkamai liestine, skersine ir statmena kryptimi, $\Delta_p, \Delta_{sk}, \Delta_n$ – svirtelės poslinkiai trimis kryptimis, a_p, a_{sk}, a_n – tiriamojo paviršiaus poslinkiai.

Atominių jėgų mikroskopo jutiklio dinamines savybes tyrinėjo daug šiame straipsnyje nepaminėtų mokslininkų, jų darbai daugiau ar mažiau panašūs į aprašytus šiame tekste, taikomi analogiški modeliai, sprendžiamos panašios problemos, kinta geometriniai svirtelės parametrai, skystį apibūdinantys koeficientai ir sąveikos jėgas tarp zondo ir tiriamojo paviršiaus aprašantys modeliai.

Atominių jėgų mikroskopo jutiklio mechaninės struktūros modeliavimo rezultatai

Tyrėjai M. H. Korayem, M. Damircheli pagal savo skaičiuojamąją schemą sumodeliavo svirtelę (1 pav.), kurios parametrai pateikti 1 lentelėje (Korayem, Damircheli 2014).

Tyrimo rezultatus mokslininkai pateikė grafikų forma. Tyrimo pradžioje mokslininkai nustatė, kaip skiriasi svirtelės virpesių amplitudė ir dažnis, kai virpesiai vyksta ore ir skystyje. Gautus rezultatus mokslininkai palygino su anksčiau atliktų panašių tyrimų rezultatais. Rezultatų palyginimas pateiktas 4 pav.

Iš 4 pav. pateiktų amplitudinių dažninių charakteristikų matome, kad svirtelėi virpant skystyje svyravimų

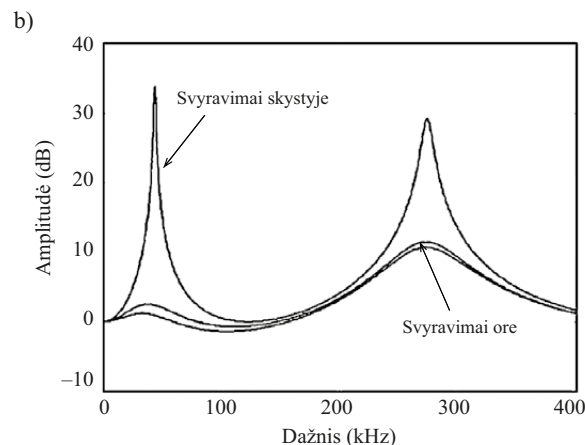
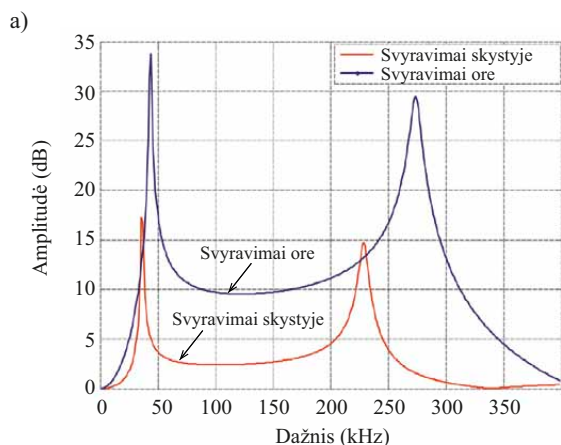
1 lentelė. Pagrindiniai tiriamos plokštelės parametrai (Korayem, Damircheli 2014)

Table 1. The main parameters of the tested plate (Korayem, Damircheli 2014)

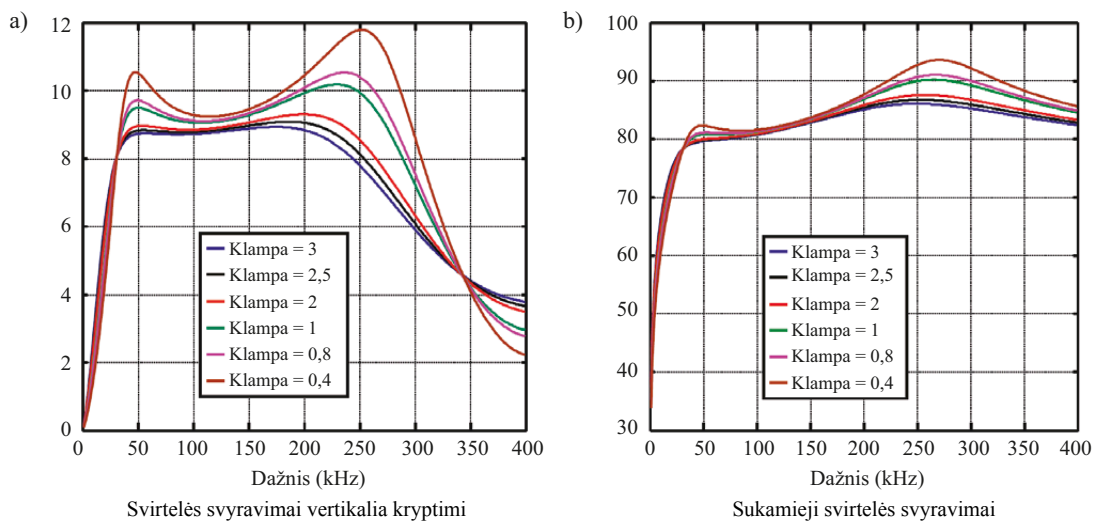
Ilgis (L)	252 μm
Plotis (b)	35 μm
Storis (h)	2,3 μm
Viršūnės ilgis (l_{ip})	10 μm
Viršūnės spindulys (R_{ip})	10 nm
Svirtelės medžiagos tankis (ρ)	2330 (kg/m^3)
Tamprumo modulis (E_p)	10,2 GPa
Šlyties modulis (G_{eff})	4,2 GPa

amplitudė mažėja, bet kartu žemėja ir rezonansinis sistemos dažnis. Atlikę šiuos bandymus mokslininkai nutarė atidžiau panagrinėti atvejį, kai svirtelė virpa skystyje. Jie nustatė, kaip keičiasi svirtelės virpesių charakteristikos keičiant skysčio klampą. Gauti rezultatai pateikti 5 pav.

Iš 5 pav. pateiktų charakteristikų galime teigti, jog skysčio klampa sukamiesiems svyravimams turi mažiau įtakos negu svyravimams vertikalia kryptimi. Taip pat iš charakteristikų matome, kad didėjant skysčio klampai mažėja virpesių amplitudė, rezonansiniai dažniai šiek tiek pasislenka į žemesniąją pusę. Atlikdami tyrimą mokslininkai naudojo skirtingos klampos skysčius, vandens klampą jie prilygino vienetai, kitus skysčius parinko taip, kad jų klampa atitiktų santykius, nurodytus 5 pav. Norėdami papildomai patikrinti savo eksperimentą, tyrėjai pakartojo bandymą naudodami įvairius skysčius. Gauti rezultatai buvo analogiški pateiktiems 5 pav. Mažiausia virpesių amplitudė ir žemiausias rezonansinis dažnis buvo nustatytas naudojant tetrachlormetaną (CCl_4). Didžiausia virpesių



4 pav. Virpesių amplitudė ir dažnis svirtelėi virpant ore ir skystyje: a – (Korayem, Damircheli 2014); b – (Song, Bhushan 2007)
Fig. 4. The amplitude of vibrations and the frequency of cantilever vibrations in air and fluid: a – (Korayem, Damircheli 2014), b – (Song, Bhushan 2007)



5 pav. Svirtelės dinaminė charakteristikų priklausomybė nuo skysčio klampos (Korayem, Damircheli 2014)

Fig. 5. The dependence of the dynamic characteristics of the cantilever on fluid viscosity (Korayem, Damircheli 2014)

amplitudė ir ryškiausiai matomas rezonansas nustatyti naudojant acetoną (Korayem, Damircheli 2014).

Tyrėjai M. J. Martin, H. K. Fathy, B. H. Houston mėginami nustatytos sistemos perdavimo funkciją taip pat daug dėmesio skyrė svirtelės svyravimams skystyje. Jie savo straipsnyje pateikė išvadą, kad svirtelės virpesių charakteristikos labiau priklauso nuo skysčio klampos, o ne nuo skysčio tankio (Martin *et al.* 2008).

Mokslininkai M. H. Korayem, M. Damircheli nagrinėjo ne tik svirtelės virpesių charakteristikų priklausomybę nuo skysčio klampos, bet ir dinaminė savybių priklausomybę nuo geometrinių svirtelės parametrų. Buvo nagrinėjami trys skirtingi atvejai: pirmu atveju keičiamas svirtelės ilgio L ir storio h santykis (ilgis nekeičiamas, didinamas storis), antru atveju keičiamas tik svirtelės ilgis, trečiu – keičiamas ilgio L ir pločio b santykis (keičiamas tik svirtelės plotis). Bandymų metu nustatyta, jog didžiausia virpesių amplitudė ir ryškiausiai matomi rezonansiniai dažniai gaunami, kai ilgio ir storio santykis $L/h = 22$. Šį santykį padidinus iki $L/h = 219$, virpesių amplitudė sumažėja, rezonansas tampa mažiau pastebimas, bet rezonansinis dažnis žemėja. Didinant svirtelės ilgį, išlaikant pastovų svirtelės storį ir plotį, mažėja sistemos rezonansinis dažnis bei virpesių amplitudė. Mažinant svirtelės plotį, didėja virpesių amplitudė bei rezonansinis dažnis. Visos anksčiau išvardintos priklausomybės galioja ir sukamiesiems plokštelės svyravimams (Korayem, Ebrahimi 2011).

Tyrėjai Y. Song, B. Bhushan nagrinėjo svirtelę, kurios parametrai pateikti 2 lentelėje.

Išnagrinėję svirtelės virpesius skirtingomis kryptimis, nustatė svirtelės savuosius virpesių dažnius. Tyrėjai taip pat nustatė, jog pirma, antra ir penkta sistemos moda atitinka pirmąsias tris vertikalių svyravimų modas. Trečia ir ketvirta

sistemos modos atitinka pirmąsias sukamųjų ir skersinių virpesių modas. Pirmąją svirtelės pailgėjimo moda atitinka septynioliktoji sistemos moda. Mokslininkų nustatyti rezonansiniai virpesių dažniai pateikti 3 lentelėje.

2 lentelė. Pagrindiniai tiriamos plokštelės parametrai (Song, Bhushan 2007)

Table 2. The main parameters of the tested plate (Song, Bhushan 2007)

Ilgis (L)	252 μm
Plotis (b)	35 μm
Storis (h)	2,3 μm
Viršūnės ilgis (l)	12,5 μm
Viršūnės spindulys (R)	10 nm
Svirtelės medžiagos tankis (ρ)	2330 (kg/m^3)
Tamprumo modulis (E)	11,5 GPa
Šlyties modulis (G)	4,2 GPa

3 lentelė. Svirtelės savieji svyravimo dažniai (Song, Bhushan 2007)

Table 3. Resonant frequencies of the cantilever (Song, Bhushan 2007)

Modos Nr.	1	2	3	4	5	...	17
Rezonansinis dažnis (kHz)	43,7	274,0	593,0	665,5	767,2	...	7417,9

Iš atliktų tyrimų matyti, jog vertikalia kryptimi gali būti sužadintos ir aukštesnės formos, ne tik pirmoji (Stark *et al.* 2004). Sukamųjų ir skersinių virpesių simuliacija rodo, kad modeliuojant tik sukamuosius virpesius neįmanoma nustatyti tikslų sistemos dinaminė charakteristikų. Skersiniai svirtelės virpesiai gali būti ignoruojami tik tais atvejais, kai svirtelės standumas šoniniam lenkimui yra daug didesnis už skersines sąveikos jėgas tarp zondo viršūnės ir tiriamojo paviršiaus. Mokslininkai pastebėjo,

kad daug įtakos svirtelės virpesių amplitudei ir fazei turi zondo viršūnės ekscentricitetas svirtelės pločio atžvilgiu (Song, Bhushan 2006). Nagrinėdami skirtingų mechaninių savybių svirtelės mokslininkai nustatė, jog ne visos svirtelės yra vienodai jautrios sąveikos jėgoms tarp zondo ir tiriamojo paviršiaus. Todėl nuo tinkamai parinktų svirtelės ir zondo mechaninių parametrų priklauso skenuojant gaunamų rezultatų tikslumas ir patikimumas.

Išvados

Amplitudinė dažninė charakteristika – tai pagrindinė sistemos dinaminės savybės apibūdinanti charakteristika. Šiame straipsnyje apžvelgti skirtingų mokslininkų sudaryti tiriamosios sistemos modeliai. Kiekvienas iš šių modelių skirtas skirtingiems matavimo sistemos aspektams ir yra skirtingo sudėtingumo bei tikslumo. Priklausomai nuo siekiamo rezultato vieni tyrėjai išsamiau nagrinėja skenuojančio zondo ir tiriamojo paviršiaus sąveiką, kiti daugiau dėmesio skiria virpesių formai nagrinėti. Vieni tyrėjai vertina tik vertikalius ir sukamuosius svyravimus, kiti savo modelyje įvertina ir skersinius svirtelės virpesius. Tačiau dauguma tyrėjų sutaria, jog modeliuojant atominių jėgų mikroskopo jutiklio mechaninę struktūrą reikia įvertinti, jog svirtelės svyravimai vyksta skystyje. Skysčio sukeliamas slopinimo efektas yra gana žymus, nes nuo skysčio savybių priklauso du matematinio modelio nariai. Didėjant skysčio tankiui, didėja matematinio modelio masės koeficientas, todėl mažėja sistemos rezonansinis dažnis. Didėjant skysčio klampai didėja slopinimo koeficientas, todėl mažėja virpesių amplitudė. Žinant jutiklio mechaninės struktūros dinaminės charakteristikas bei joms įtaką darančius veiksnius, galima pasirinkti optimalius bandinių skenavimo režimus, leidžiančius per trumpiausią laiką gauti numatytos kokybės vaizdą. Taip pat, jei sistemos charakteristikos yra žinomos, galima įdiegti papildomus standumo ir slopinimo elementus, leidžiančius valdyti sistemos dinaminės charakteristikas.

Literatūra

- Ardeshir, M. A.; Mohammadi, K. 2010. A new model for investigating the flexural vibration of an atomic force microscope cantilever, *Ultramicroscopy* 110(11): 1374–1379. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultramic.2010.07.005>
- Arinero, R.; Lévêque, G. 2003. Vibration of the cantilever in Force Modulation Microscopy analysis by a finite element model, *Review of Scientific Instruments* 74(1): 104–111. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1525874>
- Korayem, M. H.; Ebrahimi, N. 2011. Nonlinear dynamics of tapping-mode atomic force microscopy in liquid, *Journal of Applied Physics* 109(8), 084301. <http://dx.doi.org/10.1063/1.3573390>

- Korayem, M. H.; Damircheli, M. 2014. The effect of fluid properties and geometrical parameters of cantilever on the frequency response of atomic force microscopy, *Precision Engineering* 38(2): 321–329. <http://dx.doi.org/10.1016/j.precisioneng.2013.11.002>
- Lindley, V. 2012. Landmarks – atomic force microscope makes angstrom-scale images, *Physics* 5: 106. <http://dx.doi.org/10.1103/Physics.5.106>
- Martin, M. J.; Hosam, K.; Houston, B. H. 2008. Dynamic simulation of atomic force microscope cantilevers oscillating in liquid, *Journal of Applied Physics* 104(4), 044316. <http://dx.doi.org/10.1063/1.2970154>
- Moosapour, M.; Mohammad, A.; Ehteshami, H. H. 2012. Frequency and sensitivity analysis of atomic force microscope (afm) cantilever considering coupled flexural-torsional vibrations, *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures* 7(3): 1103–1115.
- Stark, R. W.; Schitter, G.; Startk, M.; Guckenberger, R.; Stemmer, A. 2004. State-space model of freely vibrating and surface-coupled cantilever dynamics in atomic force microscopy, *Physical Review B* 69(8), 085412. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.69.085412>
- Sadeghi, A.; Zohoor, H. 2010. Nonlinear vibration of rectangular atomic force microscope cantilevers by considering the Hertzian contact theory, *Canadian Journal of Physics* 88(5): 333–348. <http://dx.doi.org/10.1139/P10-019>
- Song, Y.; Bhushan, B. 2007. Finite-element vibration analysis of tapping-mode atomic force microscopy in liquid, *Ultramicroscopy* 107(10–11): 1095–1104. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultramic.2007.01.022>
- Song, Y.; Bhushan, B. 2006. Simulation of dynamic modes of atomic force microscopy using a 3D finite element model, *Ultramicroscopy* 106 (8–9): 847–873. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultramic.2005.12.019>

ANALYSIS OF A MECHANICAL STRUCTURE OF A MICROSCOPE SENSOR OF ATOMIC FORCE

A. Dzedzickis, V. Bučinskas

Abstract

Atomic Force Microscopy (AFM) is a method that allows obtaining an image of the surface of the sample in high resolution. This article investigates the problems associated with modeling a mechanical structure of a microscope sensor of atomic force. The paper refers to the previous scientists' works and describes most frequently used methods of modeling, basic equations and a variety of factors that have an influence on the dynamics of the system. Also, the obtained results of earlier works are discussed.

Keywords: atomic force microscopy, modeling, dynamic characteristics of the system.