

UDK 539.3

YUPQA PLASTINKANING MAGNITOELASTIK DEFORMASIYALANISHI MODELI

Narkulov A.S.¹

¹ Muhammad al-Xorazmiy nomidagi Toshkent axborot texnologiyalari universiteti
Samarqand filiali, Samarqand, O'zbekiston
narkulov1904@gmail.com

Annotatsiya. *Maqolada magnit maydonida o'tkazuvchanlik xossalari ortotropiyasini hisobga olgan holda elektrodinamik kuchlar ta'sirida bo'lgan tok o'tkazuvchi plastinka shaklidagi konstruktiv mikroelementning magnitoelastik deformatsiyalanishi masalasi qaralgan. Magnitoelastik tenglamalari Lagranj shaklida tahlil qilingan, hamda tok o'tkazuvchi halqaviy plastinkaning kuchlanganlik-deformatsiyalanganlik holatini ifodalovchi hal qiluvchi tenglamalar sistemasi keltirilgan va mos chiziqlimas chegaraviy masala shakllantirilgan. Toktashuvchi halqaviy plastinkaning kuchlanganlik-deformatsiyalanganlik holatini tadqiq qilishda ponderomotor Lorens kuchining tasirini hisobga olish tahlil qilingan.*

Kalit so'zlar: *plastinka, deformatsiya, magnit maydoni, ortotropiya, magnitoelastik.*

I. KIRISH

Zamonaviy texnikalar kuchli magnit maydoni ta'sirida bo'lgan yupqa tok o'tkazuvchi plastinka shaklidagi konstruktiv mikro-elementlarning keng ko'lamda qo'llanilishi muhim dolzarblikni kasb etadi. Bu sohaga bo'lgan qiziqish mexanik, elektromagnit maydonlarining o'zaro ta'sirlarini baholash va o'rganishning muhimligi bilan bir qatorda, shuningdek, ularning zamonaviy mikrotexnikaning har xil sohalarida yangi texnologiyalarni ishlab chiqishda, elektronika, mikroelektronika, o'lichagich tizimlarida va boshqalarda qo'llanilishi bilan ham izohlanadi.

Magnit maydonida tok o'tkazuvchi jism deformatsiyalanish jaryonini matematik modellashtirish va jismda paydo bo'ladigan elektromagnit effektlarni tadqiq qilish amaliy jihatdan muhim ahamiyatga ega. Bunda magnit maydonining plastinka bilan o'zaro ta'siri

tufayli paydo bo'ladigan elektromagnit effektlar salmoqli o'rin egallaydi.

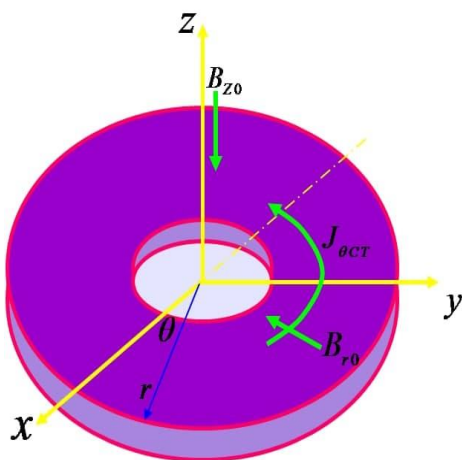
Elektromagnit va mexanik maydonlarning magnitoelastik o'zaro ta'siri ancha murakkab bo'lib, uni elastik jism harakati tenglamasi va elektromagnit maydoni tenglamalari sistemasini birgalikda tahlil qilish kerakligini taqozo etadi.

Plastinka va qobiqlarning kuchlanganlik-deformatsiyalanganlik holatlari, tebranishlari, turg'unliklarini tadqiq qilish muammolari magnitoelastiklikning katta sinf masalalarini tashkil etadi [1,2,3,4].

II. MAGNITOELASTIK MODELI

O'zgaruvchan elektrodinamik va mexanik kuchlar ta'sirida bo'lgan radiusi bo'yicha qalinligi o'zgaruvchan xalqaviy plastinkaning magnitoelastik deformatsiyalanishi masalasini qaraymiz. Elastik plastinka materiali chekli elektr o'tkazuvchan bo'lib, o'zgaruvchan

elektromagnit maydoni ta'sirida bo'lsin. Plastinka tekis taqsimlangan tashqi begona elektr tokini o'tkazuvchi tok o'tkazgich hisoblanadi. Boshlang'ich holatda magnitostatika masalasi yechilgan, ya'ni tashqi va ichki sohalar uchun magnit induksiyasi vektori aniqlangan deb hisoblaymiz. Koordinata tekisligi sifatida, qutb koordinatalari kiritilgan o'rta tekislikni tanlaymiz. γ - koordinata o'rta tekislikning normalini bo'yicha yo'nalgan. Plastinkaning qalinligi $h = h(r, \theta)$ - ikkita yo'nalish bo'yicha o'zgaradi.



1-rasm. Elektrodinamik kuchlar ta'sirida bo'lgan tok o'tkazuvchi halqaviy plastinka

Plastinka elastik ortotrop, elektr o'tkazuvchan materialdan tayyorlangan. Shuningdek, plastinka tekis taqsimlangan \vec{J}_{cm} - zichlikli tashqi begona elektr tokini ham o'tkazadigan bo'lsin. Bu holda plastinka Lorens kuchi, tashqi magnit maydoni mexanik kuchlardan tashkil topgan kombinirlangan yuklanish ta'sirida bo'ladi (1-rasm).

$$\rho \vec{F}^{\wedge} = \sigma_{ij} [(\vec{E} + \vec{V} \times \vec{B}) \times \vec{B}]$$

O'tkazuvchanlik xossalari orotropiyasini hisobga olgan holda, tok o'tkazuvchi jism chiziqlimas magnitoelastiklik masalasining uch o'lchamli qo'yilishi uchun boshlang'ich fizik va matematik

holatlar, munosabatlarni ishlarga asoslangan holda shakllantiramiz.

Qutblanish hamda magnitlanish xossalari ega bo'lmagan anizotrop tok o'tkazuvchi jism uchun magnitoelastiklik tenglamalari quyidagicha yozish mumkin [10]:

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \text{rot } \vec{H} = \vec{J} + \vec{J}_{cm},$$

$$\text{div } \vec{B} = 0, \text{div } \vec{D} = 0,$$

$$\rho \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \rho (\vec{f} + \vec{f}^{\wedge}) + \text{div } \hat{\sigma}.$$

Bunda \vec{E} - elektr maydoni kuchlanganligi vektori; \vec{H} - magnit maydoni kuchlanganligi vektori; \vec{D} - elektr induksiyasi vektori; \vec{B} - magnit induksiyasi vektori; \vec{J}_{cm} - begona elektr toki zichligi; \vec{f} - hajmiy kuch; \vec{f}^{\wedge} - hajmiy Lorens kuchi; \vec{J} - elektr toki zichligi; $\hat{\sigma}$ - ichki kuchlanish tenzori.

Kinematik munosabatlar va qutblanish va magnitlanish xossalari ega bo'lmagan muhit uchun elektr o'tkazgich tokini aniqlaydigan Om qonuni bilan magnitoelastiklik tenglamalar sistemasini to'ldirish zarur.

O'tkazuvchanlik xossalari orotropiyasini hisobga olgan holda, elektromagnit xarakteristikalarining aniqlovchi tenglamalari va tok o'tkazuvchanlik uchun kinematik munosabatlar, shuningdek ponderomotor kuchi quyidagi ko'rinishda yozish mumkin. [4,10,11]:

$$\vec{B} = \mu_{ij} \vec{H}, \vec{D} = \varepsilon_{ij} \vec{E},$$

$$\vec{J} = \sigma_{ij} (\vec{E} + \vec{V} \times \vec{B}),$$

$$\rho \vec{f}^{\wedge} = \sigma_{ij} (\vec{E} + \vec{V} \times \vec{B}) \times \vec{B}.$$

Bu yerda σ_{ij} , ε_{ij} , μ_{ij} – mos holda chiziqli anizotrop toktashuvchi jismning elektr o'tkazuvchanlik, dielektrik va magnit singdiruvchanlik tenzorlari ($i, j=1,2,3$).

O'tkazuvchanlik xossalari ortotropiyasini hisobga olgan holda tashqi magnit maydonda joylashgan qutblanish va magnitlanish xossalari ega bo'lmagan toko'tkazuvchi egiluvchan xalqaviy plastinka yechiladigan differensial tenglamalar sistemasini quyidagi ko'rinishda olamiz [4,10,11]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial r} &= \frac{1-\nu_r\nu_\theta}{e_r h} N_r - \frac{\mathcal{G}_\theta}{r} u - 0,5 \mathcal{G}_r^2, \\ \frac{\partial w}{\partial r} &= -\mathcal{G}_r, \quad \frac{\partial \mathcal{G}_r}{\partial r} = \frac{12(1-\nu_r\nu_\theta)}{e_r h^3} M_r - \frac{\nu_\theta}{r} \mathcal{G}_r, \\ \frac{\partial N_r}{\partial r} &= \frac{1}{r} (\nu_\theta - 1) N_r + \frac{e_\theta h}{r^2} u - P_r - h J_{\theta cm} - \\ & - \sigma_1 h \left[E_\theta B_z - \frac{\partial u}{\partial t} B_z^2 + 0,5 \frac{\partial w}{\partial t} (B_r^+ + B_r^-) B_z \right] + \\ & \quad + \rho h \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \\ \frac{\partial Q_r}{\partial r} &= -\frac{1}{r} Q_r - P_z - 0,5 h J_{\theta cm} (B_r^+ + B_r^-) + \\ & + \sigma_2 h \left[0,5 E_\theta (B_r^+ + B_r^-) + 0,25 \frac{\partial w}{\partial t} (B_r^+ + B_r^-)^2 + \right. \\ & \quad \left. + \frac{1}{12} \frac{\partial w}{\partial t} (B_r^+ - B_r^-)^2 - 0,5 \frac{\partial u}{\partial t} (B_r^+ + B_r^-) B_z \right] + \\ & \quad + \rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}, \\ \frac{\partial M_r}{\partial r} &= \frac{1}{r} (\nu_\theta - 1) M_r + \frac{e_\theta h^3}{12r^2} \mathcal{G}_r + Q_r + N_r \mathcal{G}_r, \\ \frac{\partial B_z}{\partial r} &= -\sigma_2 \mu \left[E_\theta + 0,5 (B_r^+ + B_r^-) \frac{\partial w}{\partial t} - B_z \frac{\partial u}{\partial t} \right] + \\ & \quad + \frac{B_r^+ - B_r^-}{h}, \\ \frac{\partial E_\theta}{\partial r} &= -\frac{\partial B_z}{\partial t} - \frac{1}{r} E_\theta. \end{aligned}$$

munosabatlarda plastika va qobiqlarda qabul qilingan belgilashlar ishlatilgan. B_r^\pm - deb plastinkaning sirtlaridagi magnit maydoni induktsiyasining tangensial tashkil etuvchilarini belgilaymiz. Magnitoelastiklik masalalarini yechish ma'lum darajada qiyinchiliklarga ega, sababi halqaviy plastinkaning hal qiluvchi tenglamalar sistemasi giperbala-parabolik tipli sakkizinchi tartibli o'zgaruvchan koeffitsientli differensial tenglamalar sistemasidir.

III. MASALANI SONLI YECHISH

Nostatsionar magnit va mexanik yuklanishlar ta'sirida bo'lgan halqaviy plastinkaning kuchlanganlik – deformatsiyalanganlik holatini aniqlash masalasini fiksirlangan vaqt momentlari uchun yechamiz. Buning uchun tok tashuvchi halqaviy plastinkaning butun harakati jarayonini vaqt bo'yicha kichik bosqichlarga bo'lamiz va har bir vaqt bosqichida masalani ketma-ket yechgan holda deformatsiyalanish jarayonini kuzatamiz. Vaqt bo'yicha o'zgaruvchilarni ajratish uchun turg'un bo'lgan chekli ayirmali Nyumark sxemasini qo'llaymiz. Nyumark sxemasini qo'llaganimizda, ya'ni vaqtning birinchi qadamida ($t=0$ bo'lganda), vaqt bo'yicha birinchi tartibli hosilalardan tashqari, vaqt bo'yicha ikkinchi tartibli hosilalarni ham bilish zarurdir. Boshlang'ich vaqt momentida jismni absolyut tinch turibdi deb, t -bo'yicha ikkinchi tartibli hosilalar bu vaqt momentida nolga teng deb qabul qilamiz. Vaqt bo'yicha navbatdagi qadamlarda bu hosilalar aniqlangan bo'ladi, ya'ni oldingi qadamda hosil qilingan yechimlar olinadi.

Plastinka va qobiqlarning chiziqlimas chegaraviy masalalarini yechishda har bir qadamda chiziqli chegaraviy masala

yechiladigan iteratsion jarayonlarni qo'llash effektiv hisoblanadi [5-9]. Chiziqlimas chegaraviy masalalarni yechishning bunday usullaridan biri chiziqlilashtirish usulidir [1,2,3, 12].

Chiziqlilashtirish usuli oldingi ma'lumotlardan foydalangan holda, navbatdagi yaqinlashish uchun, har bir qadamda chiziqli chegaraviy masalani yechish uchun iteratsion jarayon ko'rinishiga asoslangan.

Sonli masala. O'zgaruvchan $h = 5 \cdot 10^{-5} (1 - \gamma r^2 / r_0) \text{ m}$ qalinlikli boroallyuminiydan yasalgan plastinka magnit induksiyasi B_{z_0} normal tashkil etuvchisi ta'siridagi masala sonli hisoblangan. Magnit induksiyasi normal tashkil etuvchisi quyidagicha o'zgaradi deb olingan: $B_{z_0} = (0.1, 0.2, 0.5)$. Ortotrop plastinkaning magnit induksiyasi B_{z_0} normal tashkil etuvchisining o'zgarishidan bog'liq bo'lgan kuchlanganlik holatini tadqiq qilamiz.

Chegaraviy shartlarni quyidagi ko'rinishda olamiz:

$$\begin{aligned} u = 0, \quad w = 0, \quad \mathcal{G}_r = 0, \\ B_z = 0.5 \sin \omega t, \quad r_0 = 0.005 \text{ m}, \\ N_r = 0, \quad Q_r = -100, \quad M_r = 0, \\ E_\theta = 0, \quad r_N = 0.009 \text{ m}. \end{aligned}$$

Boshlang'ich shartlarni quyidagicha olamiz:

$$\begin{aligned} \vec{N}(r, t)|_{t=0} = 0, \quad \dot{u}(r, t)|_{t=0} = 0, \\ \dot{w}(r, t)|_{t=0} = 0, \quad \dot{\mathcal{G}}(r, t)|_{t=0} = 0. \end{aligned}$$

Plastinkaning fizika - mexanikaviy parametrlarini quyidagicha olamiz:

$$r_0 = 0.005 \text{ m}; r_1 = 0.009 \text{ m};$$

$$h = 5 \cdot 10^{-4} (1 - \gamma r^2 / r_0) \text{ m};$$

$$\gamma = 10, \quad \gamma = 0.06, \quad \gamma = 0.7,$$

$$\sigma_1 = 0.454 \cdot 10^8 (\text{om} \times \text{m})^{-1},$$

$$\sigma_2 = 0.200 \cdot 10^8 (\text{om} \times \text{m})^{-1},$$

$$\nu_r = 0.262; \nu_\theta = 0.320;$$

$$e_r = 22.9 \cdot 10^{10} \text{ H} / \text{m}^2;$$

$$e_\theta = 10.7 \cdot 10^{10} \text{ H} / \text{m}^2;$$

$$\omega = 314.16 \text{ c}^{-1}; \rho = 2600 \text{ kg} / \text{m}^3;$$

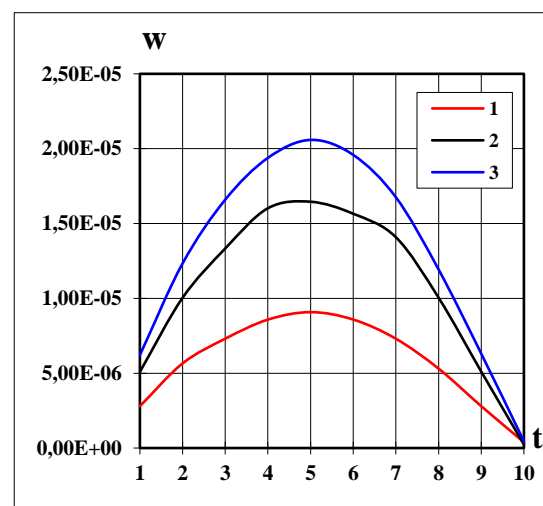
$$P_z = 5 \cdot 10^3 \sin \omega t \text{ H} / \text{m}^2;$$

$$P_r = 0; \tau = 1 \cdot 10^{-2} \text{ c}; \mu = 1.256 \cdot 10^{-6} \text{ G} / \text{H} / \text{m};$$

$$J_{\theta CT} = 3 \cdot 10^7 \sin \omega t \text{ A} / \text{m}^2;$$

$$B_r^\pm = 0.5 T \text{ n}; B_{z_0} = 0.5 \sin \omega t.$$

Qo'yilgan xalqaviy plastinka masalasining yechimi $\tau = 0 \div 10^{-2} \text{ c}$ vaqt intervalida aniqlangan, vaqt bo'yicha integrallash qadami $\Delta t = 1 \cdot 10^{-3} \text{ c}$ ga teng deb olingan. Maksimal qiymatlar vaqt bo'yicha $t = 5 \cdot 10^{-3} \text{ c}$ qadamda hosil qilingan. Quyida keltirilgan 2-rasmdagi (1,2,3) grafiklar tashqi magnit induksiyasi normal tashkil etuvchisining quyidagi variantlariga mos keladi: 1. $B_{z_0} = 0.1$; 2. $B_{z_0} = 0.2$; 3. $B_{z_0} = 0.5$.



2-rasm. Tashqi magnit induksiyasi normal tashkil etuvchisining qiymatlari uchun $w(t)$ egilishining vaqt bo'yicha o'zgarishi grafigi

2 - rasmda plastinkaning radial koordinatasi bo'yicha $t = 5 \cdot 10^{-3} c$ vaqt momentidagi tashqi magnit induksiyasi normal tashkil etuvchisining uchta qiymatlari uchun $w(r)$ egilishning o'zgarishi grafiklari keltirilgan. 2-rasmda $r = 0.0058m$ teng bo'lganda tashqi magnit induksiyasi normal tashkil etuvchisining uchta qiymatlari uchun plastinka $w(t)$ egilishining vaqt bo'yicha o'zgarishi grafiklari keltirilgan. 2-rasmda keltirilgan grafiklarni tahlil qilib tashqi magnit induksiyasi normal tashkil etuvchisining qiymatlari oshishi bilan plastinka egilishining oshishini ko'rishimiz mumkin.

IV. XULOSA

Tok o'tkazuvchi yupqa plastinkaning kuchlanganlik holatini tadqiq qilish imkonini beradigan magnitoelektiklikning bog'liqlik masalalarini sonli usullarni qo'llagan holda yechilgan. Hosil qilingan tenglamalarga va olingan sonli natijalarga asoslangan holda tashqi begona tokning yo'nalishi va zichligi miqdorini tanlab, shuningdek, magnit induksiyasini o'zgartirib elektromagnit maydoni ta'siridagi yupqa plastinkaning egilishini minimalashtirishga erishish mumkinligi baholangan.

ADABIYOTLAR

- [1] A. Ambartsumyan, G.E. Bagdasaryan, and M.V. Belubekyan, Magnetoelasticity of Thin Shells and Plates [in Russian], Nauka, Moscow (1977).
- [2] Y. M. Grigorenko and L. V. Mol'chenko, Fundamentals of the Theory of Plates and Shells with Elements of Magnetoelasticity (Textbook) (IPTs, 2010).
- [3] L. V. Mol'chenko, I. I. Loos, and R. S. Indiaminov, "Determining the stress state of flexible orthotropic shells of revolution in magnetic field," Int. Appl. Mech 44, 882–891(2008).
- [4] Indiaminov, R., Narkulov, A., Butaev, R. Magnetoelastic strain of flexible shells in nonlinear statement // Journal AIP Conference Proceedings, 2021, 2365, 02 0002.
- [5] Indiaminov R., Kholjigitov S., Narkulov A. S. Nonlinear vibrations of a currentcarrying anisotropic cylindrical shell in a magnetic field // ISJ Theoretical & Applied Science, 01 (81), - P. 205-211. Philadelphia, USA, 2020.
- [6] Индиаминов Р.Ш., Наркулов А.С., Исследование деформирования токонесящих ортотропных оболочек в нелинейной постановке // Узбекский журнал «Проблемы механики». 2018. – № 4. - С. 10-14.
- [7] Индиаминов Р.Ш., Наркулов А.С., Саидкулов Э. Магнитоупругое деформирование тонких оболочек в магнитном поле // Международный научный журнал «Инновационная наука». - Уфа, 2017. - С. 15-20.
- [8] Индиаминов Р.Ш., Наркулов А.С., Муртазаева У. Магнитоупругое деформирование гибких оболочек с учетом ортотропной электропроводности // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. - Курск, 2015.- №.6. - С. 145-149.
- [9] Indiaminov R., Narkulov A.S., Saidov U.M., Sh., Nuriyev S.A. Toktashuvchi yupqa halqaviy plastinkaning kuchlanganlik holatiga ponderomotor kuchlarning ta'sirini tekshirish.// Jizzax davlat pedagogika instituti axborotnomasi. 2013. - №1. - B. 16-20.
- [10] Indiaminov, R., Butaev, R., Narkulov, A. Nonlinear deformation of a current shell in a magnetic field // Journal AIP

- Conference Proceedings, 2021, 2365, 02 0001.
- [11] *Indiaminov R. Sh., Narkulov A. S., Zarpullaev U. K.* Mathematical modeling of magnetoelastic vibrations of a rod in a magnetic field // ISJ Theoretical & Applied Science, 03 (83), - P. 327-332. Philadelphia, USA, 2020.
- [12] *Индиаминов, Р., Шодмонов, Ж., Абдуллаев, А.* (2022).

Математическое моделирование магнитоупругих колебаний токнесущего микроэлемента магнитом поле. Международный Журнал Теоретических и Прикладных Вопросов Цифровых Технологий, 1(1), 71–79.

Поступила в редакцию 12.10.2022

Citation: *Narkulov A.S.* (2022). Yupqa plastinkaning magnitoelastik deformatsiyalanishi modeli. Raqamli texnologiyalarning nazariy va amaliy masalalari xalqaro jurnali. 2(2). – B. 71-76.

MODEL OF MAGNETOELASTIC DEFORMATION OF A THIN PLATE

*Narkulov A.S.*¹

¹ Samarkand branch of Tashkent University of information technologies named after Muhammad al-Khwarizmi, Samarkand, Uzbekistan
narkulov1904@gmail.com

Abstract. *The article deals with the issue of magnetoelastic deformation of a constructive microelement in the form of a current-carrying plate under the influence of electrodynamic forces, taking into account the orthotropy of the conductivity properties in the magnetic field. The magnetoelastic equations are analyzed in Lagrangian form, and the system of solving equations representing the stress-deformation state of the shock ring plate is presented, and the appropriate nonlinear boundary value problem is formulated. Taking into account the influence of the ponderomotive Lorentz force in the study of the stress-deformation state of the stationary ring plate is analyzed.*

Keywords: *plate, deformation, magnetic field, orthotropic, magnetoelastic.*

МОДЕЛЬ МАГНИТОУПРУГОЙ ДЕФОРМАЦИИ ТОНКОЙ ПЛАСТИНЫ

*Наркулов А.С.*¹

¹ Самаркандский филиал Ташкентского университета информационных технологий имени Мухаммада ал-Хорезми, Самарканд, Узбекистан
narkulov1904@gmail.com

Аннотация. *В статье рассматривается вопрос о магнитоупругой деформации конструктивного микроэлемента в виде токоведущей пластины под действием электродинамических сил с учетом ортотропии свойств проводимости в магнитном поле. Проведен анализ магнитоупругих уравнений в Лагранжевой форме, представлена система решающих уравнений, описывающая напряженно-деформированное состояние пластины ударного кольца, и сформулирована соответствующая нелинейная краевая задача. Анализируется учет влияния пондеромоторной силы Лоренца при исследовании напряженно-деформационного состояния неподвижной кольцевой пластины.*

Ключевые слова: *пластина, деформация, магнитное поле, ортотропия, магнитоупругость.*