

**O‘ZBEKISTON RESPUBLIKASI OLIY VA  
O‘RTA MAXSUS TA‘LIM VAZIRLIGI**

**QARSHI DAVLAT UNIVERSITETI**

**Qilicheva Feruza Gulmurodovna**

**“КЛАССИК ШАКЛЛИ ЭГИЛУВЧАН АНИЗОТРОП  
ПЛАСТИНКАНИНГ КУЧЛАНИШ-ДЕФОРМАЦИОН ҲОЛАТИНИ  
УРГАНИШ”**

**5A480103 - Amaliy matematika va axborot texnologiyalari  
mutaxassisligi bo'yicha**

**Magistr**

**Akademik darajasini olish uchun yozilgan dissertatsiya ishi**

**Ilmiy rahbar:**

**t.f.n. N. Eshqorayeva**

**Qarshi-2012**

КЛАССИК ШАКЛЛИ ЭГИЛУВЧАН АНИЗОТРОП ПЛАСТИНКАНИНГ КУЧЛАНИШ-  
ДЕФОРМАЦИОН ҲОЛАТИНИ УРГАНИШ

Mundarija:

<b>Kirish .....</b>	<b>3</b>
<b>I BOB. КЛАССИК ШАКЛГА ЭГА БЎЛГАН ЧИЗИҚЛИ ЭГИЛУВЧАН АНИЗОТРОП ПЛАСТИНКАНИНГ ДЕФОРМАЦИЯЛАНИШ ЖАРАЁНИ ТАДҚИҚ ЭТИШ .....</b>	<b>5</b>
<b>I.1. Tutash muhitdagi kuchlanish va deformatsion holat va umumlashgan Guk qonuni ....</b>	<b>5</b>
<b>I.2. Ayrim elastic anizotrop materiallar .....</b>	<b>19</b>
<b>I.3. Elastiklik nazariyasining umumiy tenglamasi va masalasining qo'yilishi. Variatsion     prinsiplar .....</b>	<b>23</b>
<b>I.4. To'g'ri to'rtburchakli plastinka egilish momentining tomonlar bo'yicha teng     taqsimlanishi. ....</b>	<b>27</b>
<b>II BOB. ANIZOTROP JISMLARDAGI DEFORMATSIYA, KUCHLANISH VA MOMENTLAR.....</b>	<b>30</b>
<b>II.1. Chiziqli bir jinsli anizotrop jism uchun umumlashgan deformatsiya.....</b>	<b>30</b>
<b>II.2. Yassi deformatsiya va umumlashgan yassi kuchlanish holati. ....</b>	<b>33</b>
<b>II.3. To'g'ri to'rtburchakli plastinkaning cho'zilish va egilish momenti.....</b>	<b>39</b>
<b>III BOB. КЛАССИК ШАКЛГА ЭГА БЎЛГАН ЭГИЛУВЧАН АНИЗОТРОП ПЛАСТИНКАЛАР ҲИСОБИ.....</b>	<b>43</b>
<b>III. 1. Egiluvchan izotrop plastinka masalasi .....</b>	<b>43</b>
<b>III.2. Yupqa anizotrop plastinkaning deformatsion holati .....</b>	<b>45</b>
<b>Xulosa . ....</b>	<b>61</b>
<b>Фойдаланилган адабиётлар руйхати .....</b>	<b>62</b>

## **Kirish**

**Мавзунинг долзарблиги:** Ҳозирги вақтда эгилувчан анизотроп пластинкалар техниканинг ҳар хил соҳаларида, қурилишда ва шунга ўхшаш қўшма соҳаларда кенг қўлланилмоқда. Улар самолёт ва ракета, қурилиш иншоотларида, кемасозлик, машинасозлик ва бошқа соҳаларнинг муҳим конструктив элементи ҳисобланади. Пластинкасимон конструкцияларнинг қўлланилиши бевосита техник талабларга ёки иқтисодий, технологик ва бошқа шунга ўхшаш татбиқлар билан боғланган. Қундалик амалиёт бундай конструкцияларни ҳисоблашда узлуксиз равишда янги масалаларни келтириб чиқаради. Бу эса пластинкалар назариясида чизиқлилиқ ва ночизиқлилиқни эътиборга олган ҳолда ҳисоблашларнинг ишончилигини таъминлашга юқори талаблар қўяди.

Таъкидлаш жоизки, кейинги йилларда пластинкалар ва қобиклар каби конструкция элементлари материалларининг анизотроп хоссаларини ҳисобга олиб, уларнинг кучланиш-деформацион ҳолатини тадқиқ этишда, математик моделларни ривожлантиришга катта эътибор берилмоқда. Чунки материалнинг турли физик-механик хоссалари анизотроп материалларда сезиларли аҳамият касб этади. Шунинг учун ҳам, ушбу диссертация иши мураккаб шаклли анизотроп эгилувчан пластинкаларнинг деформацияланиш жараёнини моделлаштиришга бағишланган бўлиб, бу ишнинг моҳияти қаралаётган объектнинг асосий тенгламалари, уларга мос ҳисоблаш алгоритмлари ва дастурий воситаларини яратиш ҳамда бу восита асосида янги масалаларни ечишдан иборат.

Математик моделлаштириш учлигини (модел, алгоритм, дастур) узвий равишда мукамаллаштириш ва уни замонавий ахборот-моделлаштирувчи тизимларга татбиқ этиш-бу услубий ёндашувдир. Мазкур услубиётни амалга ошириш, яъни қаралаётган ҳол учун алгоритмик-дастурий инструментариани яратиш, ўз навбатида, бизга эгилувчан анизотроп пластинкаларнинг деформацияланиш ҳолатини ўрганишни автоматлаштирувчи юқори технологияли ва импорт ўрнини босадиган дастурий маҳсулотни беради. Бу эса, мураккаб шаклли анизотроп эгилувчан пластинкаларнинг деформацияланиш жараёнини моделлаштириш ниҳоятда долзарб эканлигини кўрсатади.

**Муаммонинг ўрганилганлик даражаси.** XX аср бошларида муҳандислик амалиётининг талабига кўра, пластинкаларнинг ночизиқли назарияси интенсив равишда ривожлана бошлаган. Бу назарияга математиклар, механиклар ва информатиклардан И. Г.

Бубнов, П. Ф. Попкович, С.Г. Лехницкий, С.А. Амбарцумян, А.В. Александров, Х.М. Муштари, К.З. Галимов, А.С. Вольмир, В.Л. Рвачев, шунингдек Ўзбекистон олимлари В.Қ.Қобулов, Т.Б. Бўриев, Ф.Б. Бадалов, Т.Ш. Ширинқулов, Б. Курманбаев, Х.Э. Эшматов ва бошқалар ўз ҳиссаларини қўшдилар.

Ҳозирги кунда классик шакл (айлана, квадрат, тўғритўртбурчак)ларга эга бўлган эгилувчан пластинкаларнинг деформацияланиш жараёни чуқур ўрганилган. Шу билан бирга, муҳандислик амалиёти талаблари турли анизотропияли ва мураккаб шаклли пластинкаларнинг турли масалаларини кўриб чиқишни талаб қилади.

Илмий адабиётларнинг таҳлили шуни кўрсатадики, мазкур соҳада кўпгина кўриб чиқилган ишларнинг геометрик шакли классик кўринишдадир. Анизотроп ҳолда геометрик нозичли мураккаб шаклли анизотроп пластинканинг эгилиш масаласи деярли кўриб чиқилмаган.

Таъкидлаш лозимки, пластинкалар назариясининг нозичли масалаларини ечиш принципиал ва ҳисоблаш таснифига кўра катта қийинчиликлар билан боғланган бўлиб, булар, асосан, кўп каррали ҳисоб-китобларда ва, айниқса, пластинканинг шакли мураккаб бўлганда содир бўлади. Ушбу сабабнинг ўзи мазкур турдаги масалани ечиш даркорлигини кўрсатади.

**Тадқиқот мақсади.** Классик шаклга эга бўлган чизикли эгилувчан анизотроп пластинкаларнинг эгилиш масаласини ечиш учун унинг математик модели ва ҳисоблаш алгоритминини ишлаб чиқиш ва шу асосда дастурлар мажмуасини яратиш, ҳамда янги синф масалаларни ечиш.

**Тадқиқот вазифалари.** Кўзланган мақсадни амалга ошириш учун магистрлик диссертация ишини бажаришда қўйидаги вазифалар қўйилди;

- эгилувчан анизотроп пластинкаларнинг деформацияланиш жараёнини моделлаштириш бўйича тадқиқотларни таҳлил этиш;
- эгилувчан анизотроп пластинкаларнинг эгилувчанлиги учун математик моделни урганиш;
- В.Л.Рвачевнинг R-функцияси ва Бубнов-Галеркин вариацион усули ва итерация усулларини биргаликда ишлатган ҳолда мураккаб шаклли эгилувчан анизотроп пластинканинг ҳисоблаш алгоритминини ишлаб чиқиш;
- мураккаб шаклли эгилувчан анизотроп пластинкаларнинг деформацион-кучланиш ҳолати учун ҳисоб-китобни автоматлаштирувчи дастурий мажмуани яратиш;
- олинган тақрибий ечим натижаларининг ишончлилигини асослаш;

- мураккаб шаклли турли эгиловчан анизотроп пластинка ҳисоб-китобини алгоритмлари бўйича олинган натижаларнинг яқинлашувчилигини тадқиқ қилиш;

- мураккаб конфигурацияли эгиловчан анизотроп пластинканинг деформацияланиш жараёнини моделлаштириш бўйича ҳисоблаш тажрибаларини ўтказиш.

**Тадқиқот объекти ва предмети.** Тадқиқот объекти классик шаклга эга бўлган эгиловчан анизотроп пластинкадан иборат. Тадқиқот предмети математик модел, ҳисоблаш алгоритми, дастурлар мажмуасидан иборат.

Тадқиқот методлари. Магистрлик диссертация ишида математик моделлаштириш усуллари, ахборот ва дастурлаш технологиялари, сонли усуллар, деформацияланувчи қаттиқ жисмлар механикасининг вариацион тамойили.

**Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.**

Амалий жиҳатдан классик конфигурацияли анизотроп эгиловчан пластинкаларнинг тезкор ҳисобини амалга оширувчи, ҳисоблаш алгоритми асосида яратилган дастурлар мажмуаси тавсия этилган. Тадқиқот натижаларидан пластинкасимон конструкцияларнинг ҳисоб-китоби зарур бўлган ташкилотларда фойдаланиш мумкин.

**Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми.** Диссертация иши кириш қисми, 3 та бўлим, хулоса фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловадан иборат.

## **I VOV КЛАССИК ШАКЛГА ЭГА БЎЛГАН ЧИЗИҚЛИ ЭГИЛУВЧАН АНИЗОТРОП ПЛАСТИНКАНИНГ ДЕФОРМАЦИЯЛАНИШ ЖАРАЁНИ ТАДҚИҚ ЭТИШ**

### **I.1. Tutash muhitdagi kuchlanish va deformatsion holat va umumlashgan Guk qonuni**

Anizotrop jismning deformatsion va kuchlanish holatini o`rganib, jismga qo`yilgan tashqi yuklanish uchun qandaydir chegaralar qabul qilishga qaror qilamiz. Ularning zaruriylari quyida keltirilgan:

1. Qaraloyotgan jism yaxlit (bir butun) holdagi shuningdek jismning ichidagi yoki sirtidagi kuchlanish birlik yuzaga nisbatan qo`yilgan kuch holatidagi, boshqacha aytganda zamonaviy ishlarda kiritilgan kuchlanish momentini xuddi klassik elastiklik nazariyasidagi kabi olamiz.

2. Deformatsiya va siljish proeksiyasi hamda uning birinchi tartibli hosilalari orasidagi bogʻlanish koordinatalar boʻyicha chiziqli holdagi biz faqat kichik deformatsiyalarni qaraymiz.

3. Deformatsiya va kuchlanish komponentalari orasida chiziqli bogʻliqlik mavjud. Qaralayotgan jismning matreiali Guk qonuniyatiga boʻysinadi, shunga koʻra bu bogʻliqlikdagi koeffitsient oʻzgarmas deb qaraladi va koordinatalar boʻyicha oʻzgaruvchan boʻlib, uzlukli va uzluksiz boʻlishi mumkin.

4. Boshlangʻich va hakozi tashqi kuchlanishlarsiz, kuchlanishlar shu jumladan haroratni hisobga olmaymiz, yaʼni dinamikaning masalalariga toʻxtalmaymiz.

Bunday holda elastiklik nazariyasida anizotrop jismga shu nazariyaning bir jinsli va bir jinsli boʻlmagan chiziqli klassik nazariyasi nuqtai nazaridan yondashamiz. Bunda albatta bizning nazarimizdan dinamik turgʻunlik tebranishi masalalari olib tashlanadi. Katta deformatsiya va boshqa noelastik anizotrop jismlar ham qaralmaydi.

Aniq masalalarni qarashda dekart yoki silindrik ortogonal koordinatalardan foydalanamiz, ayrim hollarda esa sferik koordinatalardan foydalanamiz. Dastlab biz foydalanishimiz mumkin boʻlgan belgilashlarni koʻrsatib oʻtamiz. 3 oʻlchovli fazodagi nuqta koordinatasini dekart koordinatalar sistemasida  $X, Y, Z$  bilan silindrik koordinatalar sistemasida  $r, \varphi, z$  bilan, sferik koordinatada  $\rho, \theta, \varphi$  kabi belgilashlar bilan aniqlaymiz. Yuqorida keltirilgan harflar koordinatalar yoʻnalishlarini bildiradi.

Maydonga normal koordinatalar yoʻnalishida kuchlanish taʼsir etadi, ularning har birini biz 3 ta tashkil etuvchi orqali, yaʼni bitta narmol hamda ikkita urinmalar bilan tavsiflaymiz. Maydonni koʻrsatuvchi narmol kuchlanishni yagona indeks  $\sigma$  bilan belgilaymiz. Urinma kuchlanishni ikkinchi indeks ( $\tau$  orqali) bilan belgilaymiz.

Maydonga dekart koordinatalar oʻqi boʻyicha oʻtkazilgan narmol uchun tashkil etuvchi kuchlanishga ega boʻlamiz:

$$\sigma_x, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yx}, \sigma_y, \tau_{yz}, \tau_{zx}, \tau_{zy}, \sigma_z$$

Tashkil etuvchi kuchlanishlar tenzorini aks ettiradi, u gohida matritsa koʻrinishida yozilib, kichik deformatsiyali holatlarda bu elementlar simmetrik boʻladi.

$$\begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{vmatrix}$$

tenzor rangi 2 ga teng.

Silindrik va sferik koordinatalar sistemasida kuchlanish tenzori quydagi ko'rinishda yoziladi:

$$\begin{vmatrix} \sigma_r & \tau_{r\theta} & \tau_{rz} \\ \tau_{r\theta} & \sigma_\theta & \tau_{\theta z} \\ \tau_{rz} & \tau_{\theta z} & \sigma_z \end{vmatrix}, \begin{vmatrix} \sigma_\rho & \tau_{\rho\theta} & \tau_{\rho\varphi} \\ \tau_{\rho\theta} & \sigma_\theta & \tau_{\theta\varphi} \\ \tau_{\rho\varphi} & \tau_{\nu\varphi} & \sigma_\varphi \end{vmatrix}$$

- 1- rasmda koordinata yo'nalishi bo'yicha narmol x,y,z va r,v,z mos ravishda silindrik koordinata sistemasida tasvirlangan va u yerdagi tashkil etuvchi kuchlanishni biz doimo musbat deb qabul qilamiz.

## 1 RASM

O'zaro perpendikullar bo'lgan jism nuqtasidan o'tuvchi uchta maydonlardagi kuchlanishni bilgan holda jismning shu nuqtasidan o'tuvchi ixtiyoriy 4- maydonlari kuchlanishni aniqlashimiz mumkun. 4 – maydondagi normalni n bilan belgilab, bu maydonga ta'sir etuvchi kuchlanish proeksiyasini esa  $x_n, y_n, z_n$  bilan belgilab x,y,z o'qida 3 ta formulaga ega bo'lamiz.

$$\left. \begin{aligned} X_n &= \sigma_x \cos(n, x) + \tau_{xy} \cos(n, y) + \tau_{xz} \cos(n, z) \\ Y_n &= \tau_{xy} \cos(n, x) + \sigma_y \cos(n, y) + \tau_{yz} \cos(n, z) \\ Z_n &= \tau_{xz} \cos(n, x) + \tau_{yz} \cos(n, y) + \sigma_z \cos(n, z) \end{aligned} \right\} (1.1)$$

Bu formula orqali qidirilayotgan proeksiyani aniqlashimiz mumkin bo`ladi.

Yuqoridagiga o`xshash formulani silindrik, sferik yoki boshqa egri chiziqli koordinatalar sistemalarida ham hosil qilish mumkin. Bizning ishimizda dekart koordinatalar sistemasidan boshqa silindrik yoki sferik kordinatalar ham uchrashi mumkin. Dekart, silindrik, sferik koordinatalar sistemalarida nuqta proeksiyasi uchun quydagi belgilashlarni kiritamiz:

$u, v, \omega$  - dekart koordinatalar sistemasi uchun

$u_r, v_\theta, \omega$  - silindrik koordinatalar sistemasi uchun

$u_\rho, v_\theta, u_\varphi$  - sferik koordinatalar sistemasi uchun

Jismning berilgan nuqtasi atrofidagi deformatsiya tashkil etuvchi deformatsiya bilan karakterlanadi va u 3 ta ch`yuzuvchi hamda 3 ta siquvchi tashkil etuvchilardan iborat bo`ladi. Dastlabki 3 tasini uzayuvchi yoki qisqaruvchi kesmaning boshlanich yo`nalishini ko`rsatuvchi indekslar bilan olingan “ $\varepsilon$ ” bilan belgilaymiz. Navbatdagi 3 tasini esa boshlanich perpendikulyar yo`nalishini ko`rsatuvchi 2 ta indeks bilan berilgan  $\gamma$  harf bilan belgilaymiz.  $\varepsilon_i$  va  $\frac{1}{2}\gamma_{ij}$  tashkil etuvchi deformatsiyalar 2 rang simmitrik tenzorini aks ettiradi. Uning dekart koordinatalar sistemasi uchun matritsalar ko`rinishidagi yozuvi quyidagi ko`rinishida bo`ladi:

$$\left\| \left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_x \quad \frac{1}{2}\gamma_{xy} \quad \frac{1}{2}\gamma_{xz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{xy} \quad \varepsilon_y \quad \frac{1}{2}\gamma_{yz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{xz} \quad \frac{1}{2}\gamma_{yz} \quad \varepsilon_z \end{array} \right\} \right\|$$

Boshqa ortogonal koordinatalar sistemasi uchun ham yuqoridagiga o`xshash matritsani yozish mumkin. Biz keyinchalik tashkil etuvchi deformatsiyalarni (ularni alohida holat uchun  $\varepsilon_{ii}, \varepsilon_{ij}$  deb belgilaymiz) va uchala koordinatalar sistemasidagi siljishlar proeksiyasini:

1.) Dekart sistemada:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x}, \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \\ \gamma_{yz} &= \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}, \gamma_{xz} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}, \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{aligned} \right\} (1.2)$$

2.)Silindirik sistemada

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{\partial u_r}{\partial r}, \varepsilon_\theta = \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{u_r}{r}, \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}, \\ \gamma_{\theta z} &= \frac{\partial u_\theta}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta}, \gamma_{rz} = \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial u_r}{\partial z} \\ \gamma_{r\theta} &= \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u\theta}{r} \end{aligned} \right\} (1.3)$$

3.)Sferik sistemada:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_\rho &= \frac{\partial u_\rho}{\partial \rho}, \varepsilon_\theta = \frac{1}{\rho} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{u_\rho}{\rho}, \\ \varepsilon_\varphi &= \frac{1}{\rho \sin \theta} \frac{\partial u_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{u_\theta}{\rho} \operatorname{ctg} \theta + \frac{u}{\rho}, \\ \gamma_{\theta\varphi} &= \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial u_\varphi}{\partial \theta} - u_\varphi \operatorname{ctg} \theta \right) + \frac{1}{\rho \sin \theta} \frac{\partial u_\theta}{\partial \varphi}, \\ \gamma_{\rho\varphi} &= \frac{1}{\rho \sin \theta} \frac{\partial u_\rho}{\partial \varphi} + \frac{\partial u_\varphi}{\partial \rho} - \frac{u_\varphi}{\rho}, \\ \gamma_{\rho\theta} &= \frac{1}{\rho} \frac{\partial u_\rho}{\partial \theta} + \frac{\partial u_\theta}{\partial \rho} - \frac{u_\theta}{\rho}, \end{aligned} \right\} (1.4)$$

kabi ifodalaymiz. Agar deformatsiya kichik hisoblanmasa, u holda uzayishga va  $\varepsilon_i, \gamma_{ij}$  siljishlarga nisbatan ko'chishlar nochiziqli holdagi dekart koordinatalar sistemasiga bo'liq bo'lgan misol keltiramiz:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \sqrt{1 + 2 \frac{\partial u}{\partial x} + \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2} - 1, \\ \varepsilon_y &= \sqrt{1 + 2 \frac{\partial v}{\partial y} + \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2} - 1, \\ \sin \gamma_{xy} &= \frac{\frac{\partial u}{\partial u} + \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y}}{(1 + \varepsilon_x)(1 + \varepsilon_y)}. \end{aligned} \right\} (1.5)$$

qolgan 3 ta  $\varepsilon_z, \gamma_{yz}, \gamma_{xz}$  komponentalarini indekslerini aylanma siljitishi yo`li bilan (1.5) dan hosil qilamiz.

Va nihoyat, keyinchalik bizga muvozanat differensial tenglamasi va tutash muhit tenglamasi zarur bo`ladi. muvozanat tenglamasini quyidagi ko`rinishda yozamiz, bu yerda  $x, y, z; R, \theta, z$  hamda  $P, v, \varphi$  lar orqali kordinata yo`nalishidagi hajmiy kuch proyeksiyalarini belgilaymiz :

1.) Dekart koordinatalar sistemasida:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + X &= 0, \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + Y &= 0, \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + Z &= 0. \end{aligned} \right\} (1.6)$$

2.) Silindrik koordinatalar sistemasida

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} + R &= 0, \\ \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial z} + \frac{2\tau_{r\theta}}{r} + \theta &= 0, \\ \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial \theta} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} + Z &= 0. \end{aligned} \right\} (1.7)$$

3.) Sferik koordinatalar sistemasida:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_\rho}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{\rho\theta}}{\partial \theta} + \frac{1}{\rho \sin \theta} \frac{\partial \tau_{\rho\varphi}}{\partial \varphi} + \frac{1}{\rho} (2\sigma_\rho - \sigma_\theta - \sigma_\varphi + \tau_{\rho\theta} \operatorname{ctg} \theta) + P &= 0, \\ \frac{\partial \tau_{\rho\theta}}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{1}{\rho \sin \theta} \frac{\partial \tau_{\theta\varphi}}{\partial \varphi} + \frac{1}{\rho} [(\sigma_\theta - \sigma_\varphi) \operatorname{ctg} \theta + 3\tau_{\rho\theta}] + \theta &= 0, \\ \frac{\partial \tau_{\rho\varphi}}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{\theta\varphi}}{\partial \theta} + \frac{1}{\rho \sin \theta} \frac{\partial \sigma_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{1}{\rho} (2\tau_{\theta\varphi} \operatorname{ctg} \theta + 3\tau_{\rho\varphi}) + \Phi &= 0. \end{aligned} \right\} (1.8)$$

Hajmiy kuchga inersiya hadlarini qo`shib muvozanat tenglamasidan foydalanib osonlik bilan harakat tenglamasini olish mumkin. Inersiyon hadlar  $\bar{\rho}$

Zichlikka teng bo`lib, proyeksiyaga tezlanish teskari ishora bilan ko`paytiriladi, qaysiki siljishning proyeksiyasi orqali oddiy ifodalanadi. Masalan, dekart kordinatalar sistemasi uchun kichik differensiallarda  $x, y, z$  funksiyalarga

$$-\bar{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, -\bar{\rho} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}, -\rho \frac{\partial^2 \omega}{\partial t^2}$$

hadlarni qo`shish kerak.

Ixtiyoriy jism uchun keltirilgan formulalar va tenglamalar qaralayotgan jismning fizik xossasiga boliq bo`ladi. Elastik jismga o`tishda biz elastiklik xossasini aks ettiruvchi modelni tanlashimiz kerak va yuqorida keltirilgan tenglamalarga tashkil etuvchi deformatsiya hamda siljishlarga boliq qo`shimchalarni kiritishimiz zarur. Biz faqat kichik deformatsiyalarni qaraymiz va bu holda qabul qilingan model tushinarli bo`lib tutash jismni ifodalaydi hamda quyidagi umumlashgan Guk qonuniyatiga bo`ysunadi. Boshqacha aytganda biz deformatsiya va kuchlanishlari chiziqli funksiya hisoblangan muhit va jismlarni qaraymiz. Bu funksiya bir jinsli bo`lishi kerak, bir jinsli deganda faraz qilinadiki, kuchlanishni hosil qiluvchi deformatsiya 0 ga teng bo`ladi va aksincha, agar  $\varepsilon = \gamma = 0$  b`lsa  $\sigma = \tau = 0$  bo`ladi.

Guk qonuniga bo`ysunuvchi jismlar turlicha bo`lishi mumkin, shuning uchun ham ularning hech bo`lmaganda taqribiy xossalarni aks ettiruvchi klassifikatsiyasi berilishi kerak. Jismlar uchun elastiklik xossasini bir tomondan bir jinsli va bir jinsli b`lmagan qismlarga, 2-tomondan esa izotrop va anizotrop guruhlarga ajratish mumkin.

Jismning barcha nuqtalarida elastiklik xossasi bir xil bo`lsa, u bir jinsli deyiladi, bir jinsli bo`lmagan jismlar esa turli nuqtalarda turlicha xossalarga ega. Agar elastiklik moduli nuqtadan nuqtaga o`tishda o`zgarmasa, ya`ni uzluksiz bo`lsa u holda bir jinslilikni uzluksiz deb ataymiz. Agar elastiklik moduli nuqtadan nuqtaga o`tishdagi uzluksizlikda ajralish bo`lsa, misol uchun o`zgarish sakrashsimon bo`lsa, u holda bir jinslimaslikni uzlukli yoki diskret deb ataymiz. Sakrashsimon o`zgarish jismning turli nuqtalarida turlicha elastiklik xossalari ega ekanligini bildiradi.

Jismning izotroplik xossasi uning barcha nuqtalarida elastiklik xossalarining yo`nalishlari bo`yicha bir xilligini bildiradi. Jismdagi anizotroplik xossasi jism nuqtasidagi elastiklik xossasidan turli yo`nalishlar bo`yicha har xilligini anglatadi. Yo`nalish bo`yicha elastiklik xossalari bir xil bo`lgan jismlar bir xil elastiklikka ega jismlar deyiladi. Izotrop jism barcha nuqtalari bo`yicha elastik ekvivalent holdagi anizotrop jismda esa ayrim yo`nalishlar bo`yicha elastik ekvivalentliklar ko`rinadi.

Jismlar strukturasi bo`yicha izotrop, anizotrop va bir vaqtning o`zida bir jinsli yoki bir jinslimas bo`lishi mumkun. Shuni takidlaymizki turli muhitlarda anizotropiyaning 2 – xil turi farqlanadi.

- 1) To`g`ri chiziqli
- 2) Egri chiziqli

Umumiy holda anizotropiyada har bir tashkil etuvchini deformatsiya barcha 6 ta tashkil etuvchi kuchlanishlarning chiziqli funksiyasi  $h$ \_\_\_\_\_di.

Anizotropiyaning eng umumiy turiga mos keluvchi bir jinsli jismni qaraymiz. Uni dekart koordinatalar sistemasiga qo`yib, hozirgi joylashuv o`rnini belgilamasdan, bu sistema uchun umumlashgan Guk qonunini yozamiz.:



Agar jism uchun umumlashgan Guk qonuni dekart koordinatalar sistemasida berilgan bo`lsa, shartli ravishda uni chiziqli anizotrop va bir jinsli bo`lmagan jism deb ataymiz. Bir jinsli jismga qaytaylik. Bir jinsli jismda (3,1) va (3,2) ifodalarda keltirilgan  $a_{i,j}$  va  $A_{i,j}$  koeffitsientlarni elastiklik koeffitsientlar deb ataymiz.

Bir jinsli bo`lmagan jismda esa bu koeffitsientlar koordinata funksiyalari bo`lib, elastiklik xarakteristikalarini deb ataladi.  $a_{i,j}$  va  $A_{i,j}$  larni alohida-alohida qarab,  $a_{i,j}$  ni deformatsiya va  $A_{i,j}$  ni elastiklik moduli deb ataymiz. Bazi kitoblarda  $a_{i,j}$  va  $A_{i,j}$  lar o`rniga  $S_{i,j}$  va  $C_{i,j}$  lar yoziladi.

(3,1) va (3,2) tenglamalardan ko`rinadiki har bir jism uchun elastik o`zgarmaslar soni 36 taga teng bo`ladi. Bu hol eng umumiy holatlarda ham shu tarzda bo`lmaydi ya`ni agar deformatsiya elastik potensial energiyasi mavjud bo`lsa, deformatsional potensial energiya hajm birligiga nisbatan qaraladi. Bunday holat jismda izotermik yoki adiyabatik jarayonlar natijasida yuzaga keladi. Biz faqat muvozanat haqidagi savolni qarash deformatsion o`zgarish izotermik jarayon hisobidan kelib chiqadi deb faraz qilamiz. Harakat esa har bir elementda o`zgarish holda saqlanadi. (3,1) va (3,2) tenglamalardagi  $a_{i,j}$  va  $A_{i,j}$  koeffitsientlar o`zida izotermik elastik o`zgarishlarni saqlaydi deb qarash va hech qanday adiyabatik jarayonga bo`liq emas deb hisoblash mumkin. Bu holda

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{\partial \bar{V}}{\partial \varepsilon_x}, \sigma_y = \frac{\partial \bar{V}}{\partial \varepsilon_y}, \dots, \tau_{xy} = \frac{\partial \bar{V}}{\partial \gamma_{xy}}. \end{aligned} \right\} (3.4)$$

ega bo`lamiz. Tashkil etuvchi kuchlanishni deformatsiya bo`yicha diferensiallab:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial \varepsilon_y} &= \frac{\partial \sigma_y}{\partial \varepsilon_x}, \frac{\partial \sigma_x}{\partial \gamma_{xy}} = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial \varepsilon_x} \end{aligned} \right\} (3.5)$$

ni olamiz. (3.5) va (3.2) tengliklardan mos holda

$$A_{ij} = A_{ji} \quad (i, j = 1, 2, \dots, 6) \quad (3.6)$$

ga ega bo`lamiz. (3.2) tenglamani  $\varepsilon$  va  $\gamma$  larga nisbatan yechib,  $\varepsilon$  va  $\gamma$  lar uchun 6 ta ifodani olamiz. ularning o`ng qismidagi koeffitsientlari simmetrik hisoblanadi:

$$a_{ij} = a_{ji}, \quad (i, j = 1, 2, \dots, 6) \quad (3.7)$$

Endi umumiy holda umumlashgan Guk qonunining ifodasini quyidagicha yozish mumkin.

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= a_{11}\sigma_x + a_{12}\sigma_y + \dots + a_{16}\tau_{xy}, \\ \varepsilon_y &= a_{12}\sigma_x + a_{22}\sigma_y + \dots + a_{26}\tau_{xy}, \\ &\dots\dots\dots \\ \gamma_{xy} &= a_{16}\sigma_x + a_{26}\sigma_y + \dots + a_{66}\tau_{xy} \end{aligned} \right\} (3.8)$$

yoki boshqacha

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= A_{11}\varepsilon_x + A_{12}\varepsilon_y + \dots + A_{16}\gamma_{xy}, \\ \varepsilon_y &= A_{12}\varepsilon_x + A_{22}\varepsilon_y + \dots + A_{26}\gamma_{xy}, \\ &\dots\dots\dots \\ \tau_{xy} &= A_{16}\varepsilon_x + A_{26}\varepsilon_y + \dots + A_{66}\gamma_{xy}. \end{aligned} \right\} (3.9)$$

(3.4) dagi 6 ta tenglamani integrallab , elastik potensial ifodasini deformatsiyaning bir jinsli kvadratik funksiyasi ko`rinishda olishimiz mumkin:

$$\begin{aligned} \bar{V} &= \frac{1}{2} A_{11} \varepsilon_x^2 + A_{12} \varepsilon_x \varepsilon_y + \dots + A_{15} \varepsilon_x \gamma_{xz} + A_{16} \varepsilon_x \gamma_{xy} + \\ &+ \frac{1}{2} A_{22} \varepsilon_y^2 + \dots + A_{25} \varepsilon_y \gamma_{xz} + A_{26} \varepsilon_y \gamma_{xy} + \\ &\dots\dots\dots \\ &+ \frac{1}{2} A_{55} \gamma_{xz}^2 + A_{56} \gamma_{xz} \gamma_{xy} + \frac{1}{2} A_{66} \gamma_{xy}^2. \end{aligned} \quad (3.10)$$

(3.10) ni 6ta qo`shiluvchi bo`yicha 6 ta guruhga ajratamiz.

$$\bar{V} = \frac{1}{2} (A_{11}\varepsilon_x + \dots + A_{16}\gamma_{xy})\varepsilon_x + \dots + \frac{1}{2} (A_{16}\varepsilon_x + \dots + A_{66}\gamma_{xy})\gamma_{xy} \quad (3.11)$$

va ifodaga  $\sigma_x, \sigma_y, \dots, \tau_{xy}$  larni qo`yib ,elastik potensial uchun sodda hamda eslab qolishga qulay bo`lgan formulani olamiz:

$$\bar{V} = \frac{1}{2} (\sigma_x \varepsilon_x + \sigma_y \varepsilon_y + \dots + \tau_{xy} \gamma_{xy}) \quad (3.12)$$

Agar bu formulaga deformatsiyani tashkil etuvchi (3.8) ifodani qo`ysak , u holda  $\bar{V}$  kvadratik funksiya kabi bir jinsli kuchlanishni olamiz .  $\bar{V}$  ning ifodasi (3.10) kabi quriladi ,bu yerda faqat  $\varepsilon$  va  $\gamma$  o`rniga mos ravishda  $\sigma$  va  $\tau$  ni hamda  $A_{i,j}$  o`rniga esa deformatsiya koeffitsientlari  $a_{i,j}$  ni qo`yamiz:

$$\begin{aligned}
\bar{V} = & \frac{1}{2} a_{11} \sigma_x^2 + a_{12} \sigma_x \sigma_y + \dots + a_{16} \sigma_x \tau_{xy} + \\
& + \frac{1}{2} a_{22} \sigma_y^2 + \dots + a_{26} \sigma_y \tau_{xy} + \\
& \dots \\
& + \frac{1}{2} a_{66} \tau_{xy}^2.
\end{aligned} \tag{3.13}$$

Umumiy holda anizotropiya elastik o'zgarmlar soni 21 ta bo'ladi, ammo ular orasida o'zaro bog'liq bo'lmagan o'zgarmlar kam. O'zaro bog'liq bo'lmagan elastik o'zgarmlar koeffitsientlar soni 21 ta emas, balki 18 ta dan ham oz bo'lishi mumkin.

Elastik simmetriyani rivojlantirish maqsadida  $a_{ij}$  va  $A_{ij}$  lar uchun o'qlarda invariantlikni ko'rsatish mumkin. (3.8) va (3.9) umumlashgan Guk qonuni ifodalardagi elastik o'zgarmlar bir xildagi joylashuvga ega emas. Ularni sinflashtirib qarash kerak.

$a_{ij}$  va  $A_{ij}$  o'zgarmlar o'rniga ko'pincha texnik adabiyotlarda Yung moduli, Puasson koeffitsientlari va hakoza larni qo'yish bilan ifodalar hosil qilingan. Soha mutahasislaridan biri hisoblangan olim Rabinovich bu masalaga texnik jihatdan yondashib (3.8) formulani quyidagi ko'rinishda ifodalagan.

$$\left. \begin{aligned}
\varepsilon_x &= \frac{1}{E_{xx}} (\sigma_x - \nu_{yx} \sigma_y + \nu_{zx} \sigma_z + \eta_{yz,x} \tau_{yz} + \eta_{zx,y} \tau_{xz} + \eta_{xy,x} \tau_{xy}) \\
\varepsilon_y &= \frac{1}{E_{yy}} (-\nu_{xy} \sigma_x + \sigma_y - \nu_{zy} \sigma_z + \eta_{yz,y} \tau_{yz} + \eta_{zx,y} \tau_{xz} + \eta_{xy,y} \tau_{xy}) \\
\varepsilon_z &= \frac{1}{E_{zz}} (-\nu_{xz} \sigma_x - \nu_{yz} \sigma_y + \sigma_z + \eta_{yz,z} \tau_{yz} + \eta_{zx,z} \tau_{xz} + \eta_{xy,z} \tau_{xy}) \\
\gamma_{yz} &= \frac{1}{G_{yz}} (\eta_{x,yz} \sigma_x + \eta_{y,yz} \sigma_y + \eta_{z,yz} \sigma_z + \tau_{yz} + \mu_{zx,yz} \tau_{xz} + \mu_{xy,yz} \tau_{xy}) \\
\gamma_{xz} &= \frac{1}{G_{xz}} (\eta_{x,zx} \sigma_x + \eta_{y,zx} \sigma_y + \eta_{z,zx} \sigma_z + \mu_{yz,zx} \tau_{yz} + \tau_{xz} + \mu_{xy,yz} \tau_{xy}) \\
\gamma_{xy} &= \frac{1}{G_{xy}} (\eta_{x,xy} \sigma_x + \eta_{y,xy} \sigma_y + \eta_{z,xy} \sigma_z + \mu_{yz,xy} \tau_{yz} + \mu_{zx,xy} \tau_{xz} + \tau_{xy})
\end{aligned} \right\} \tag{3.14}$$

Bu yerda  $E_{xx}$ ,  $E_{yy}$ ,  $E_{zz}$  lar x,y,z o`qlari bo`yicha cho`zilish yoki siqilishdagi Yung modullari  
 $G_{yz}$ ,  $G_{xz}$ ,  $G_{xy}$  ----- kordinatalarga parallel tekisliklarga nisbatan siljish modullari ,  
 $\nu_{yz}$ ,  $\nu_{zx}$ , .....  $\nu_{yz}$  -- cho`zilishdagi boshqa yo`nalish bo`yicha qisqartirilgan 1 o`qli yo`nalishdagi  
 Puasson koeffitsientlari. Bu o`zgarmaslar izotrop jismdagi Yung moduli, siljish moduli va  
 Puasson koeffitsientlari bilan mos keladi. Qolgan o`zgarmaslar izotrop jism uchun nolga teng  
 bo`lib, faqat elastik anizotrop jismlar uchun o`rinli bo`ladi.

$\mu_{xz, yz}, \dots, \mu_{zx, xy}$  Chensov koeffitsientlari deb ataladi. Uning tekislikdagi siljishini xarakterlab, parallel koordinatalardagi urinma kuchlanish chaqirgan boshqa parallel koordinatalarga ta'siri bo'yicha olinadi.

$\eta_{yz, x}; \eta_{zx, x}, \dots, \eta_{xy, z}$  -o'zgaraslar Rabinovich ta'rifi bo'yicha 1-tur o'zaro ta'sir koeffitsientlari va nihoyat  $\eta_{x, yz}, \eta_{y, yz}, \dots, \eta_{z, xy}$  -normal kuchlanishning koordinata o'qi yo'nalishi bo'yicha ta'sir etuvchi siljishlarni ifodalaydi.

(3.14) dagi barcha tenglamalar berilgan koordinatalar sistemasida yozilgan boshqa sistemalar uchun koeffitsientlar qiymati o'zgaradi, lekin elastic o'zgaraslarining umumiy soni avvalgidek 18 taga teng bo'ladi. Aniq masalarni yechishda  $a_{ij}$  va  $A_{ij}$  lar uchun asosiy belgilashlardan foydalanamiz, bu belgilashlarda jismning ortotrop yoki transversalotrop xossalari texnik jihatdan hisobga olinishi shart. Elastic o'zgaraslar va tashkil etuvchi kuchlanishlarning o'zgarishini hisobga olib umulashgan Guk qonunini biroz soddaroq ko'rinishda yozishimiz mumkin.

Elastiklik o'zgarasi  $a_{ij}$  ni 2 ta emas 4 ta indeks bilan ifodalab .... Ni olamiz. U holda (3.8) dagi 6 ta tenglamani 1 ta ko'rinishda yozish mumkin:

$$\varepsilon_{ij} = a_{ijkl} \sigma_{kl} \quad (i, j, k, l = 1, 2, 3). \quad (3.15)$$

Bu ifodadagi har bir 6 ta tenglikni  $k$  va  $l$  bo'yicha belgilovchi yig'indi belgisini bunday sistemani yozishda tashlab yuborsa ham bo'ladi.  $a_{ijkl}$  o'zgaraslarining umumiy soni 81 tani tashkil etadi, ammo ularni gruppalar o'zgaraslar sonini 21 taga keltirish mumkin. Umumlashgan Guk qonuni tenglamasini tashkil etuvchi kuchlanishga nisbatan yechilsa

$$\sigma_{ij} = A_{ijkl} \varepsilon_{kl}. \quad (3.16)$$

ko'rinishini oladi.

## I.2. Ayrim elastic anizotrop materiallar

Haqiqiy anizotrop jismda dastlab monokristall tarkibli, shu jumladan sterjen va plastinkalarda monokristall tuzilmali kesimlarni qarash kerak bo'ladi. Geometrik nuqtai nazardan 32 xil ko'rinishga ega bo'lgan kristal simmetrik tuzilmalar borligi isbotlangan. Bu kristall birikmalarning quyidagi 7 xil turning nomlarimni keltiramiz :

- 1.) uch bog'lamli
- 2.) bir bog'lamli
- 3.) rombsimon
- 4.) uch yoqli
- 5.) uchlik
- 6.) geksogonal
- 7.) kubsimon

tabiiy ko'rinishdagi kristallar 32 xil simmetriyaning biror ko'rinishiga taaluqli bo'ladi va uning Kristallar oilasining birortasiga taaluqli bo'ladi. elastik simmetriya umumlashgan Guk qonuni tenglamalari kabi miqdorlarning quyidagicha kamayishiga xizmat qiladi va bu qonuniyat bir qancha geometric simmetriya o'rinlariga ega bo'ladi. Elastiklik xossalari bo'yicha kristallar 9 ta sinf yoki guruhga ajratilishi mumkin. Bu 9 ta sinf uchun elastik potensial ifodalarini ham yozish mumkin.

Shuni ta'kidlaymizki monokristallarning kristallik xususiyatlariga oid elastic o'zgarmaslar ustida ma'lum tadqiqotlarni o'tkazish hisobiga olinadi. Misol uchun foygta tomonlari kvars kristalini keltirish mumkin :

(9.1)

Auerbax ishidagi monokristal va minerallar uchun elastic o'zgarmaslarning sonli jadvallari keltirilgan.

Tog' jinslaridagi qatlamlarni bir jinsli va transversal izotrop deb qarash imkoniyati bor.

Kvars uchun alevrolit nomli tog' jinsi uchun eksperimentdan foydalanib olingan quyidagi miqdorlarni olamiz:

$$\left. \begin{aligned} E &= 6,21 \cdot 10^5, & E' &= 5,68 \cdot 10^5, & G' &= 2,29 \cdot 10^5 \text{ (v } kgc/cm^2) \\ G &= 2,55, & \nu &= 0,22 & \nu' &= 0,24 \end{aligned} \right\} \quad (9.2)$$

Elastik o'zgarmaslar hisoblangan  $E$  va  $E'$ ,  $G$  va  $G'$ ,  $\nu$  va  $\nu'$  lar mos ravishda yo'nalishlar bo'yicha juda kam miqdorda farqlanganligi uchun alevrolit tog' jinsi juda kuchsiz anizotroplik xossasiga ega deb ataladi. Undagi anizotroplikni tasvirlovchi parametrlar izotrop jismlariga juda ham yaqin. Shuning uchun ham alevrolitga ishlov berishda uni izotrop jism kabi qarash mumkin bo'ladi.

Ko'pincha anizotrop jismning ya'ni minerallar va tog' jinslari uchun elastiklik o'zgarmaslarining "spravochnik"lari ishlab chiqilgan.

Yuqorida keltirilgan mulohazalar izotrop jism uchun o'tkazilgan tadqiqotlarda elastik o'zgarmaslarining yo'nalishlari bo'yicha qiymatini etiborga olmasdan, anizotrop jismlarda esa bu holat aniq hisobga olinishi kerakligini anglash mumkin.

Bizning belgilashlarimizdan olingan taqribiy formula

$$G' = \frac{EE'}{E(1 + 2\nu') + E'}. \quad (9.3)$$

Ko'rinishga ega bo'ladi. Bu formula izotrop jism uchun siljish moduli bo'yicha aniq ko'rinishini oladi:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

Shunday qilib ko'p uchraydigan 45 ga yaqin turdagi tog' jinslari uchun elastik o'zgarmaslar soni (kuchsiz anizotroplik xossasiga ko'ra) 5 ta emas, balki 4 ta bo'ladi.

Anizotropiya darajasi 2 o'lchovli masalalarda 2 ta qiymat xarakterlanadi. Yuqorida keltirilgan sondagi (45 ga yaqin) jinslar uchun anizotropiyaning 1 ta xarakterli qiymati mavjud. Bu qiymat uchun  $P = \frac{E}{E'}$  bosh modulni olish tavsiya etiladi. Kristall tarkibli bo'lmagan

anizotrop matritsalariga misol sifatida yog'och mahsulotlarini olish mumkin. Ularda kristallar emas qatlamlar mavjud bo'ladi. Qat'iyan olganda yog'och materiallar bir jinsli emas ammo ulardan tayyorlangan to'sinni olsak, bir jinsli deb qarashimiz ham mumkin. Yog'ochni ham ortogonal tekisliklar bo'yicha xossalari jihatidan farq qilishini ko'rish mumkin. Ortogonal tekisliklarni quyidagicha ta'riflash mumkin:

1.)  $yz$ , yog'och tolalariga normal yo'nalishda

- 2.) xy, o'rama qatlamlariga parallel
- 3.) xz, har ikkala tekislikka ortogonal

Barcha xz,xy,yz tekisliklar elastiklik simmetriya tekisliklariga parallel joylashtirilgan.

Ko'rsatilgan koordinatalar sistemasiga nisbatan

$$(4.4)$$

$$(4.6)$$

umumlashgan Guk qonuni yuqoridagi formulalar ko'rinishda bo'lib, ulardan 9 ta o'zaro bog'liq bo'lmagan elastik o'zgarmlar kelib chiqadi. Yog'och materialini ayrim hollarda transversal izotrop materiallarning modullari sifatida qaraladi. Shunday bo'lsada turli yo'nalishlar bo'yicha elastiklik o'zgarmlari turlicha bo'ladi.

Bir qator adabiyotlarda sosna, eman va hakoza yog'och materillar elastiklik o'zgarmlari jadvali ham keltirilgan :

$E_1$  va  $E_2$ ,  $\nu_{21}$  miqdorlar eksperiment yo'li bilan aniqlangan siljish moduli esa o'tkazilgan eksperimentga asoslanib, elastik o'zgarmlarni hisoblash formulasi bo'yicha olingan. 11-rasmda Yung modulining yoysimon bog'lanish holati tasvirlangan.

12-rasmda sosna uchun elastiklik o'zgarmlari keltirilgan.

(11-12-rasm)

Anizotrop materialga yana bir misol sifatida fanerni keltirish mumkin. Faner – bu yog'ochdan tayyorlangan toq qatlamli anizotrop material. Fanerning qatlamlari bir-biriga tolalar bo'yicha perpendikulyar qilib yopishtirilgan. Faner bir jinsli bo'lmagan jismni tasvirlaydi. Ammo faner o'lchamlarini (bo'yi, eni) qalinligiga nisbatan taqqoslanganda o'lcham juda katta bo'lsa uni bir jinsli ortotrop material deb qarash mumkin, va holanki qatlamlar bo'yicha bir jinsli bo'lmasa ham fanerda yog'och tolalariga normal yo'nalishda bo'lgan elastiklik simmetriya tekisligi joylashadi.

Fanerning plastinkadagi umumlashgan o'zgarmlar kuchlanish holati, shu bilan birga kuchlanishni hosil qiluvchi o'rta tekislikka qo'yilgan kuch ta'siri qaralayotgan bo'lsin. Fanerning o'rta tekisligida xy tekislik joylashgan va x,y o'qlarini tashqi qatlamdagi tolalarga parallel va perpendikulyar yo'nalgan deb hisoblaymiz. U holda o'rta tekislikdagi tashkil etuvchi kuchlanish va deformatsiyalarni o'rta tekislikka parallel  $\bar{\sigma}_x, \bar{\sigma}_y, \tau_{xy}, \bar{\epsilon}_x, \bar{\epsilon}_y, \delta_{xy}$  lar va  $\sigma_z$  lar uchun umumlashgan Guk qonunining 3 ta tenglamasini quyidagi ko'rinishda yozamiz :

$$\left. \begin{aligned} \bar{\varepsilon}_x &= \frac{1}{E_1} \bar{\sigma}_x - \frac{\nu_2}{E_2} \bar{\sigma}_y, \\ \bar{\varepsilon}_y &= -\frac{\nu_1}{E_1} \bar{\sigma}_x + \frac{1}{E_2} \bar{\sigma}_y, \\ \bar{\gamma}_{xy} &= \frac{1}{G} \bar{\tau}_{xy}. \end{aligned} \right\} \quad (9.5)$$

Bu yerda  $E_1, E_2, G_1, \nu_1, \nu_2$  -yaxlit plastinka uchun texnik markazlashgan elastiklik o'zgarmaslari.

Biz 4 xil ko'rinishda fanerlar uchun elatik o'zgarmaslarni keltiramiz:

- 1) Uch qavatli faner. Bu faner yassi masalani nazariy jihatdan tadqiq etishdagi tushunchalarni qo'llab ko'rsatish uchun yaxshi muhit hisoblanadi. Biz o'z ishimizni namoyish etishda shu materialdan foydalanamiz.

2.) BC-1 markadagi yelimlangan faner. Uning 7 ta qatlami bo'lib, umumiy qalinligi 8 mm h-di.

3.)BFC markali faner. Qatlamlari soni 7 ta bo'lib qalinligi 7 mm.

4.) FCF markali namlikka chidamliligi yuqori bo'lgan faner, qalinligi 10 mm.

6-jadvalda yuqorida keltirilgan 4 xil fanerlar uchun elastic o'zgarmaslarning qiymatlari keltirilgan. Bu yerda  $E_1$  va  $E_2$  modullar bosh yo'nalish bo'lagi bo'yicha cho'zilish uchun olingan, E modul esa tolalarga nisbatan  $45^\circ$  burchak ostida olingan G siljish moduli,  $\nu_1, \nu_2$  - Puasson koeffitsientlari

6-jadval.

### I.3. Elastiklik nazariyasining umumiy tenglamasi va masalasining qo'yilishi. Variatsion prinsiplar

Elastik jismdagi kuchlanish holatini, agar uning ixtiyoriy nuqtasida tashkil etuvchi kuchlanish ma'lum bo'lsa (vaqtning ixtiyoriy momentida, agar jism harakati qaralayotgan bo'lsa ham), aniqlash mumkin. Siljishlarning 3 ta koordinata yo'nalishi bo'yicha olingan proyeksiyalaridan foydalanib (ular ma'lum bo'lganda), tashkil etuvchi deformatsiyalar orqali elastik jismning deformatsion holati aniqlanadi.

Shunday qilib, tashqi kuch ta'siri ostida jismning kuchlanish – deformatsion holati hisoblanadi. Bunday to'liq mulohaza qilish uchun biz 9 ta, ya'ni, 6 ta kuchlanishni tashkil etuvchi va 3 ta siljish proyeksiyalarini ifodalovchi funksiyalarni aniqlashimiz kerak bo'ladi.

Xususiy holda dekart koordinatalar sistemasidan foydalanilsa, o'zgaruvchilar  $x, y, z$  o'qlariga hamda vaqtga bog'liq bo'ladi. 6 ta tashkil etuvchi kuchlanishni va 3 ta siljish proyeksiyasini aniqlash uchun to'liq tenglamalar sistemasini qurishda muvozanatning 3 ta tenglamasi yoki tutash muhitning harakat tenglamsini olib, ularga umumlashgan Guk qonunining 6 ta tenglamasini qo'shamiz.

Barcha noma'lum funksiyalar va o'zaro bog'liq bo'lmagan tenglamalardan iborat bunday sistema muvozanatning asosiy tenglamasi yoki elastik jism harakatining tenglamasi deb ataladi. Qachonki biz  $(x, y, z, t)$  dekart koordinatalar sistemasidan foydalansakkin bu holatga to'xtalamiz. Jism uchun muvozanatning asosiy tenglamasi elastiklik simmetriyasi elementlariga ega bo'lmagan holda quyidagicha yoziladi:

$$(11.1)$$

Bu yerdagi  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \dots, \gamma_{xy}$  lar kichik deformatsiya holatida (1.2) dagi munosabat bo'yicha siljishlar bilan bog'langan  $x, y, z$  birlik hajmga qo'yilgan hajmiy kuchlr proyeksiyasi.

Agr harakat qaralayotgan bo'lsa, u holda harakat tenglamasi faqat dastlabki 3 ta tenglama bilan farq qiladi, ya'ni (11.1) ning dastlabki 3 ta tenglamasining o'ng qismida nollar bo'lmasligi, hadlardan siljish bo'yicha olingan 2-tartibli hosila vaqt bo'yicha proporsional bo'lishi kerak:

$$\bar{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \bar{\rho} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}, \bar{\rho} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2},$$

Qolgan tenglamalar (11.1) dagi kabi o'z holicha yoziladi. (11.1) sitemani ekvivalenti bilan almashtirish mumkin. Umumlashgan Guk qonunini  $\sigma$  va  $\tau$  kuchlanishlarga nisbatan aniqlash mumkin (u o'zida modul  $A_{IJ}$  ni saqlaydi) yoki (11.1) sistemadan kuchlanish yoki siljish mustasno bo'ladi (ya'ni ulardan birortasi ishtirok etmasligi mumkin).

Anizotrop jismdagi elastik muvozanat haqidagi masala, (11.1) sistemani qanoatlantiruvchi shart va jism sirtiga qo'yilgan shartlarni hisobga oib, ko'rsatilgan 9 ta funksiyani aniqlashga keltiriladi.

Jism sirtida berilgan shartlar static-elastik jism uchun quyida keltirilgan 3 ta turdagi masala ko'rinishida bo'lishi mumkin: 2 ta tur siljishiga ko'ra, 1 tur kuchlanishga ko'ra, 3 tur aralash tur.

Birinchi asosiy masala. Jism sirtining barcha nuqtalariga tashqi kuch qo'yilgan; jism sirtida va ixtiyoriy nuqtasida kuchlanish va siljishni aniqlash talab etiladi. Sirtida tashqi kuchning 3 ta tashkil etuvchisini berish mumkin, o'qlardagi proyeksiyasi bo'yicha, masalan  $\sigma$  normal tashkil etuvchi va 2 ta ortogonal yo'nalishlardagi 2 ta urinma kuchning proyeksiyalari.

Ba'zida kuchning  $X, Y, Z$  o'qlardagi proyeksiyasi beriladi (ni sirtidagi tashqi normal yo'nalishi; tashkil etuvchi kuch birlik yuzaga nisbatan olinadi).

Chegaraviy shartlar quyidagicha ko'rinishda yoziladi:

(11.2)

Ikkinchi asosiy masala. Sirtning barcha nuqtalarida bir- biri bilan ustma- ust tushmaydigan yo'nalishlar barcha siljishlarning proyeksiyalari berilgan. Masalan, Dekart koordinatalar sistemasida  $u^*, v^*, w^*$  proyeksiyalar berilgan. Chegaraviy shartlar ko'rinishga ega bo'ladi:

$U=u^*, v=v^*, w=w^*$ ; (11.3)

Aralash masala. Sirtning bir qismida kuch, qolgan qismida esa siljish berilgan. Sirtning birinchi qismida chegaraviy shart(11.2), ikkinchi qismida esa(11.3) ko'rinishda bo'ladi. Aralash masalada quyidagi holdagi ko'rinishlar bo'lishi mumkin, ya'ni sirtida quyidagilar berilgan berilishi mumkin: bitta tashkil etuvchi kuch(masalan,normal) va 2 ta tashkil etuvchi siljish yoki bitta tashkil etuvchi siljish va 2 ta tashkil etuvchi kuch va h.k.

Jism formasiga qarab dekart koordinatalar sistemasini ham emas, boshqa egri chizikli koordinatalar sistemasidan ham foydalanish mumkin.

Tashkil etuvchi kuchlanish uchun(1.1) sistemadan mustasno holda faqat siljishlarni proyeksiyasini o'zida saqlavchi 3 ta tenglamani olamiz.

Jism ortotrop bo'lgan hol uchun tashqi kuch ta'siri ostida harakatlanuvchi yoki siniluvchi erkin tebranishdagi harakat tenglamasining siljish proyeksiyalari orqali berilishi quyidagi ko'rinishda bo'ladi.

(11.4)

(erkin tebranish haqidagi masalada  $X=Y=Z=0$ ).

Bir jinsli jism uchun muvozanat tenglamasi yechimining yagonaligi sharti uchun sinaluvchi kichik deformatsiya, qaysiki tashkil etuvchi deformatsiya va uning siljishi bo'yicha olingan hosilasi chiziqli funksiya bo'lganda Kirxgof teoremasi o'rinli bo'ladi.

Agar muvozanat tenglamasining analitik yechimi izlansa bir qator qiyinchiliklarga duch kelinadi (bunday holler amaliyotda tez-tez uchrab turadi), taqribiy yechimni olish uchun bir qator variantlash prinsiplaridan foydalaniladi.

Mumkin bo'lgan siljishlar prinsipi:

Elastik jismdagi mumkin bo'lgan yoki virtual siljishlarni biz shunday ataymiz, u tutash muhit ko'rinishini o'zgartirmay qoladi, jism sirtidagi chegaraviy shartlar esa berilgan deformatsion ko'rinishlarni yoki mahkamlangan ko'rinishini (demak, qayerda siljish berilishiga qarab) qanoatlantiradi.

Boshqacha aytganda elastik jismda sodir bo'lgan bu siljishlar mumkin bo'lgan geometric bog'liqlikka ega.

$X, Y, Z$  (birlik yuzadagi) sirtga qo'yilgan tashqi kuch proyeksiyalari  $X, Y, Z$  esa hajmiy kuchlar proyeksiyalari, tashkil etuvchi siljishlar orqali nifodalangan butun jismning potensial energiyasi va  $\sigma_u, \sigma_v, \sigma_w$  - mumkin bo'lgan geometric bog'liqlikdagi variatsiyasi bo'lsin.

Mumkin bo'lgan ko'chishlar prinsipiga ko'ra jism elastic muvozanatda bo'lgan quyida (11.5) ega bo'lamiz.

Bu tenglama Lagranj variatsiyasi tenglamasi deb ataladi. Undagi  $dw$  - hajm bo'yicha differensial,  $ds$  - sirt bo'yicha differensial,  $\sigma_v$  - differentsiya siljish variatsiyasiga mos keluvchi potensial energiyasining variatsiyasi 3 karrali  $s$  jismning butun hajmi bo'yicha, 2 karrali  $s$  esa sirtning kuch qo'yilgan qismini bildiradi. Bu nyerdagi (11.5) ni aks ettirishda, barcha mumkin bo'lgan holatlardan farq qiluvchi, muvozanatni tashkil etuvchi haqiqiy siljish, yani u ifodaning minimal qiymatidan darak beruvchi ko'rinishga o'tamiz.

Mumkin bo'lgan minimal ishlar prinsipi:

Tashqi kuch ta'sirida muvozanatda bo'lgan elastik jismini, static nuqtai nazardan tutash muhtni qanoatlantiruvchi muvozanat tenglamani va kuch qo'yilgan qismidagi shartlarda  $\sigma, \sigma, \dots, \sigma$  haqiqiy kuchlanishlar ketma-ketligini

Bu mumkin bo'lgan kuchlanishlarni quyidagicha belgilaymiz:

Kuchlanishlar ham, lar kabi tutash muhitning muvozanat tenglamasini va kuch qo'yilgan sirtidagi shartlarni qanoatlantiradi. Natijada, kuchlanish variatsiyasi tutash muhitdagi bir jinsli muvozanat tenglamasini va ( $X=Y=Z=0$ ) va sirtidagi shartlarni qanoatlantiradi:

(11.7)

Sirtning kuch berilgan qismlarida bo'ladi. Minimal ishlar prinsipidagi analitik ifoda Kastilyanoning variatsiyon formulasi hisoblanadi:

(11.8)

Bu yerda  $V$ -differensiyani potensial energiyasi bo'lib, tashkil etuvchi kuchlanish kabidir,  $\sigma_v$ - esa bu tashkil etuvchiga mos keluvchi tashkil etuvchi variatsiya.

#### **I.4. To'g'ri to'rtburchakli plastinka egilish momentining tomonlar bo'yicha teng taqsimlanishi.**

Umumiy ko'rinishdagi anizotropiya bilan bir jinsli materialdan tayyorlangan tomonlari bo'yicha taqsimlangan kuch ta'sirida deformatsiyalanuvchi o'zgarmas qalinlikka ega to'g'ri to'rtburchak shaklidagi plastinka qaralayotgan bo'lsin. Shuning uchun ham chetlari bo'yicha o'zgarmas kuch ta'sir etadi, bundan plastinka qalinligiga teng, uzun tomon bo'yicha almashmaydigan burovchi va ezuvchi momentlar kelib chiqadi.

Plastinkaning o'rta tekisligiga  $xy$  tekislikni qo'llaymiz va to'g'ri to'rtburchakning simmetriya chiziqlari bo'yicha  $x, y$  o'qlarini yo'naltiramiz.

23-rasm.

Ushbu belgilashlarni kiritamiz :  $a, b$  – tomonlar uzunliklari,  $h$  – qalinlik,  $M_1, H$  – 2 ta qarama-qarshi tomonlardagi eguvchi va burovchi momentlar,  $M_2, H$  – qolgan 2 ta tomondagi momentlar.

Chiziqli qonuniyat bo'yicha tashqi kuch plastinka qalinligi bo'yicha kuchga almashtirilsa, izotrop plastinkaga mos keluvchi taqsimlangan kuchlanishni olishimiz mumkin:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{12M_1}{h^3}z, & \sigma_y &= \frac{12M_2}{h^3}z, & \tau_{xy} &= \frac{12H}{h^3}z, \\ \sigma_z &= \tau_{yz} = \tau_{xz} = 0. \end{aligned} \right\} \quad (16.1)$$

(2.4)

tenglamadan tashkil etuvchi deformatsiyani ,undan esa siljish proeksiyasini toppish mumkin. Plastinka markazidagi elementni aniqlash uchun mahkamlangandeb faraz qilamiz.U holda siljish uchun keltirilgan shart  $x=y=z=0$  bo'lganda

$$\left. \begin{aligned} u &= v = \omega = 0; \\ \frac{\partial \omega}{\partial x} &= \frac{\partial \omega}{\partial y} = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} = 0. \end{aligned} \right\} \quad (16.2)$$

ko'rinishda bo'ladi. Siljish uchun

$$\left. \begin{aligned} u &= \frac{6}{h^3}[M_1(a_{15}z^2 + a_{16}yz + 2a_{11}xz) + M_2(a_{25}z^2 + \\ &+ a_{26}yz + 2a_{12}xz) + H(a_{36}z^2 + a_{66}yz + 2a_{16}xz)], \\ v &= \frac{6}{h^2}[M_1(a_{14}z^2 + 2a_{12}yz + a_{16}xz) + M_2(a_{24}z^2 + \\ &+ 2a_{22}yz + a_{26}xz) + H(a_{46}z^2 + 2a_{26}yz + a_{66}xz)], \\ \omega &= \frac{6}{h^3}[M_1(a_{13}z^2 - a_{11}x^2 - a_{12}y^2 - a_{16}xy) + M_2(a_{23}z^2 - \\ &- a_{12}x^2 + a_{22}y^2 - a_{26}xy) + H(a_{36}z^2 - a_{16}x^2 - a_{26}y^2 - a_{66}xy)], \end{aligned} \right\} \quad (16.3)$$

Ifodaga ega bo'lamiz.  $W = \omega(x, y, o)$  o'rta tekislikning egilishi

$$\left. \begin{aligned} W &= -\frac{6}{h^3}[M_1(a_{11}x^2 + a_{12}y^2 + a_{16}xy) + M_2(a_{12}x^2 + \\ &+ a_{22}y^2 + 2a_{26}xy) + H(a_{16}x^2 + a_{26}y^2 + a_{66}xy) \end{aligned} \right\} \quad (16.4)$$

ga teng bo'ladi. (16.3) formula to'g'ri normal harakatdagi gipotezaga ko'ra, umumiy holda mos kelmasligini ko'rsatadi. Normal o'rta tekislikdagi deformatsiyagacha to'g'ri chiziqli kesma ko'rinishda bo'lgan had egrilanib , u va v lar uchun  $z^2$  ko'rinishini oladi.

Egilish  $a_{14}, a_{24}, a_{15}, a_{25}, a_{46}$  va  $a_{56}$  deformatsiya koeffitsientlariga bog'liq bo'ladi va bu elastik o'zgarmaslar 0 ga teng bo'lganda egrilik yo'qoladi. umumiy ko'rinishdagi anizotropiya bilan berilgan plastinkaning egilish momentlari yuqoridagilarga qaramasdan to'g'ri normal haqidagi gipotezaga asoslangan yupqa plitkadagi kabi

$$\left. \begin{aligned} M_x &= -(D_{11} \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + D_{12} \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + 2D_{16} \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y}), \\ M_y &= -(D_{12} \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + D_{22} \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + 2D_{26} \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y}), \\ H_{xy} &= -(D_{16} \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + D_{26} \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + 2D_{66} \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y}). \end{aligned} \right\} * (16.5)$$

ko'rinishda bo'ladi. Bu yerda  $M_x, M_y, H_{xy}$  plastinka ichidagi  $x, y$  o'qlariga parallel o'rta tekislikdagi chiziqli elementga ta'sir etuvchi eguvchi va burovchi momentlar  $D_{ij}$  esa

$$D_{ij} = (A_{ij} - \frac{A_{i3}A_{j3}}{A_{33}}) \frac{h^3}{12} \quad (i, j = 1, 2, 6). \quad (16.6)$$

formula bilan aniqlanuvchi plastinka birligi xususiy holda, ya'ni plastinka ortotrop bo'lsa ( $a_{16} = a_{26} = 0$ ), faqat eguvchi moment bilan yuklangan va burchakli tayanchda bo'lsa, uning o'rta tekislik bo'yicha egilishi

$$W = \frac{6}{h^3} \left[ (M_1 a_{11} + M_2 a_{12}) \left( \frac{a^2}{4} - x^2 \right) + (M_1 a_{12} + M_2 a_{22}) \left( \frac{b^2}{4} - y^2 \right) \right] \quad (16.7)$$

ga teng bo'ladi. Markazdagi katta egilish

$$f = \frac{3}{2h^3} \left[ (M_1 a_{11} + M_2 a_{12}) a^2 + (M_1 a_{12} + M_2 a_{22}) b^2 \right] \quad (16.8)$$

yoki

$$f = \frac{3}{2h^3} \left[ M_1 \frac{a^2 - \nu_{12} b^2}{E_1} + M_2 \frac{b^2 - \nu_{21} a^2}{E_2} \right] \quad (16.9)$$

formula bilan aniqlanadi.

## II BOB. ANIZOTROP JISMLARDAGI DEFORMATSIYA, KUHLANISH VA MOMENTLAR

### II.1. Chiziqli bir jinsli anizotrop jism uchun umumlashgan deformatsiya.

Qandaydir silindirik sirt bilan chegaralangan umumiy ko'rinishdagi to'g'ri chiziqli anizotropiyani ifodalovchi bir jinsli jismni qaraymiz. Jism ko'ndalang kesim tekisligi bo'yicha ta'sir etuvchi hajmiy va sirt kuchlari bilan yuklangan bo'lsin, bundan tashqari uzunlik bo'yicha almashmaydigan normalni ham tasvirlasin. Dastlab, biz uzunlikni chegaralanmagan deb hisoblaymiz, ko'ndalang kesim sohasi esa chegaralangan yoki chegaralanmagan, bir bog'lamli yoki ko'p bog'lamli bo'lishi mumkin.

Dastlab koordinatalar boshini ko'ndalang kesimining ixtiyoriy nuqtasiga joylashtiramiz va z o'qini tashkil etuvchiga yo'naltiramiz, x,y o'qlarini esa kesim formasiga qarabqulay ko'rinishda joylashtiramiz.

Tasavvur qilish mumkinki berilgan yuklanish ta'rifidagi chegaralanmagan uzunlikdagi jism barcha ko'ndalang kesimlarda bir xil shart bilan topiladi, shuning uchun ham kuchlanish va siljishlar tashkil etuvchiga bog'liq bo'lmasdan faqat x va y larga bog'liq holda qaraladi. Jism izotrop yoki anizotrop bo'lishiga qaramasdan kesimdagi mavjud elastik simmetriya yassiligiga qoladi, boshqacha aytganda deformatsiya yassi h- di. agar tekislikda elastic simmetriya mavjud bo'lib, ammo o'rta tekislikda x y larga parallel chiziqlar yo'q bo'lsa umumiy holda anizotropiyada deformatsiya yassi bo'lmaydi o'rta tekisliklarning barchasi bir xilda egrilanadi. Bunday yassi deformatsiyadan farq qiluvhchi deformatsaiya turini umulashgan deformatsiya deb ataymiz.

Dastlab umumlashgan deformatsiyani bir jinsli jismda qaraymiz 7 ga bog'liq bo'lmagaqn tashkil etuvchi kuchlanish va siljish proeksiyalarining qiymatlari 7

(25.1)

ga teng bo'ladi. Siljish ushbu

$$\left. \begin{aligned} u &= U(x, z) - w_3 y + u_0, \\ v &= V(x, y) + w_3 x + v_0, \\ w &= W(x, y) + w_0, \end{aligned} \right\} (25.2)$$

formula bo'yicha aniqlanadi . u, v, w lar

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial x} &= \beta_{11}\sigma_x + \beta_{12}\sigma_y + \dots\beta_{16}\tau_{xy}, \\ \frac{\partial V}{\partial y} &= \beta_{12}\sigma_x + \beta_{22}\sigma_y + \dots\beta_{26}\tau_{xy}, \\ \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} &= \beta_{16}\sigma_x + \beta_{26} + \dots + \beta_{66}\tau_{xy}; \end{aligned} \right\} (25.3)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial W}{\partial x} &= \beta_{15}\sigma_x + \beta_{25}\sigma_y + \beta_{15}\tau_{yz} + \beta_{55}\tau_{xz} + \beta_{56}\tau_{xy}, \\ \frac{\partial W}{\partial y} &= \beta_{14}\sigma_x + \beta_{21}\sigma_y + \dots + \beta_{46}\tau_{xy}, \end{aligned} \right\} (25.4)$$

tenglamalar yordamida kuchlanish bilan bog'langan  $\sigma_z$  kuchlanish

$$\sigma_z = -\frac{1}{a_{33}}(a_{13}\sigma_x + a_{23}\sigma_y + a_{31}\tau_{yz} + a_{35}\tau_{xz} + a_{36}\tau_{xy}). (25.5)$$

formula bilan aniqlanadi. Keyinchalik umumiy holda  $F$  va  $\omega$  lar uchun

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} + \overline{U}, \\ \sigma_y &= \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} + \overline{U}, \\ \tau_{xy} &= -\frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y}; \\ \tau_{xz} &= \frac{\partial \psi}{\partial y}, \\ \tau_{yz} &= -\frac{\partial \psi}{\partial x}, \end{aligned} \right\} (25.6)$$

funksiyalarni kiritamiz va

$$\left. \begin{aligned} L_1 F + L_3 \psi &= -(\beta_{12} + \beta_{22}) \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + (\beta_{16} + \beta_{26}) \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial y} - (\beta_{11} + \beta_{12}) \frac{\partial^2 U}{\partial y^2}, \\ L_3 F + L_2 \psi &= (\beta_{11} + \beta_{21}) \frac{\partial U}{\partial x} - (\beta_{15} + \beta_{25}) \frac{\partial U}{\partial y}. \end{aligned} \right\} \quad (25.7)$$

tenglamaga ega bo'lamiz. Bu yerda  $L_1, L_2, L_3$  – operatorlar bo'lib quyidagi ko'rinishga ega:

$$(19.3)$$

chegaraviy shartlar 1- asosiy masala uchun

$$(19.7)$$

ko'rinishda 2-asosiy masala uchun esa

$$(19.8)$$

ko'rinishga ega bo'ladi.

Hajmiy kuch mavjud bo'lgan holatga to'xtalamiz. Bu holda  $F$  ning hosilasi va  $\psi$  uchun ifodalarni  $\phi_k(z_k)$  kuchlanish va siljish kompleks potentsiallarini va ular uchun chegaraviy shartlarni

$$U = F_0 = \psi_0 = 0, \quad U_0 = V_0 = 0, \quad (25.8)$$

deb faraz qilib,

(21.2)

(21.3)

(21.5)

(21.9)

ifodalardan olamiz.  $\phi_k$  funksiyaning ifodasini isbotlarsiz to'g'ridan keltiramiz.

1. Agar soha kesimi  $S'$  ifodaga ega bo'lsa va konturda unga  $P_x, P_y$  proeksiyalar bilan bosh vektordan o'tuvchi kuch tasir etsa va bosh moment hisoblansa, u holda o'zgarma  $\Delta k$  tirqishini o'rovchi  $\delta$

kontur bo'yicha tekshi; rishda olingan har bir  $\phi_k$  deformatsiya uzliksiz va bir qiymatli hada

hamda ko'p qiymatli qismlarga bo'linadi. Qaytuvchi  $\phi_k$  funksiyalar va unga teskari bo'lgan  $\bar{\phi}_k$  funksiyalar ushbu sistema orqali aniqlanadi:

$$\left. \begin{aligned} \Delta_1 + \Delta_2 + \lambda_3 \Delta_3 + \bar{\Delta}_1 + \bar{\Delta}_2 + \bar{\lambda}_3 \bar{\Delta}_3 &= P_y, \\ \mu_1 \Delta_1 + \mu_2 \Delta_2 + \mu_3 \lambda_3 \Delta_3 + \bar{\mu}_1 \bar{\Delta}_1 + \bar{\mu}_2 \bar{\Delta}_2 + \bar{\mu}_3 \bar{\lambda}_3 \bar{\Delta}_3 &= -P_x, \\ \lambda_1 \Delta_1 + \lambda_2 \Delta_2 + \Delta_3 + \bar{\lambda}_1 \bar{\Delta}_1 + \bar{\lambda}_2 \bar{\Delta}_2 + \bar{\Delta}_3 &= 0, \\ p_1 \Delta_1 + p_2 \Delta_2 + p_3 \Delta_3 + \bar{p}_1 \bar{\Delta}_1 + \bar{p}_2 \bar{\Delta}_2 + \bar{p}_3 \bar{\Delta}_3 &= 0, \\ q_1 \Delta_1 + q_2 \Delta_2 + q_3 \Delta_3 + \bar{q}_1 \bar{\Delta}_1 + \bar{q}_2 \bar{\Delta}_2 + \bar{q}_3 \bar{\Delta}_3 &= 0, \\ r_1 \Delta_1 + r_2 \Delta_2 + r_3 \Delta_3 + \bar{r}_1 \bar{\Delta}_1 + \bar{r}_2 \bar{\Delta}_2 + \bar{r}_3 \bar{\Delta}_3 &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (25.9)$$

2. Agar soha  $n$  ta tirqishga ega bo'lsa, jism  $n$  ta parallel bo'shliqlarga ega bo'ladi.

Ularning har birining konturida kuch  $P_{x_i}, P_{y_i}$  bosh vector proeksiyalari bilan va bosh moment orqali o'tsa u holda  $\phi_k$  qaytuvchi deformatsiyaning ko'p qiymatli qismini aniqlovchi tenglama bir tirqishni o'rovchi  $\gamma_i$  kontur uchun o'rinli bo'ladi. Boshqacha aytganda biz (25.9) ga o'xshash  $n$  ta tenglamalar sistemasini olamiz qaysiki  $\Delta k, \bar{\Delta k}$  lar o'rniga mos ravishda  $\Delta k_i, \bar{\Delta k}_i$  larni qo'yamiz.

Shunday qilib har birida 6 tadan nomalum bo'lgan  $n$  ta tenglamalar sistemasiga ega bo'lamiz.

## II.2. Yassi deformatsiya va umumlashgan yassi kuchlanish holati.

Faraz qilamizki oldingi paragraflarda ko'rib o'tilgan shakldagi jism chegarlanmagan va  $z$  o'qi bo'yicha tashkil etuvchi bilan ixtiyoriy nuqtasida elastic simmetriya yassi h-di. Bu holatda biz sof elastic deformatsiyaga ega bo'lamiz. Elastiklik nazariyasining barcha tenglamalari

qanoatlantiriladi. Faraz qilamizki  $\omega = \omega_0 = const$  va  $u, v$  funksiyalar faqat  $x$  va  $y$  o'zgaruvchilarga bog'liq deb h-di. U holda  $\gamma_{xz} = \gamma_{yz} = \sigma_z = 0$  bo'ladi va kuchlanish

$$\left. \begin{aligned} \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0, \\ \sigma_z = -\frac{1}{a_{33}}(a_{13}\sigma_x + a_{23}\sigma_y + a_{36}\tau_{xy}); \end{aligned} \right\} (26.1)$$

$$\sigma_x = \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + U, \quad \sigma_y = \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} + U, \quad \tau_{xy} = -\frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y}, (26.2)$$

formula bo'yicha aniqlanadi.  $F$  funksiya

$$\left. \begin{aligned} \beta_{22} \frac{\partial^4 F}{\partial x^4} - 2\beta_{26} \frac{\partial^4 F}{\partial x^3 \partial y} + (2\beta_{12} + \beta_{66}) \frac{\partial^4 F}{\partial x^2 \partial y^2} - 2\beta_{16} \frac{\partial^4 F}{\partial x \partial y^3} + \beta_{11} \frac{\partial^4 F}{\partial y^4} = \\ -(\beta_{12} + \beta_{22}) \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + (\beta_{16} + \beta_{26}) \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial y} - (\beta_{12} + \beta_{11}) \frac{\partial^2 U}{\partial y^2}, \end{aligned} \right\}$$

(26.3)

tenglikni qanoatlantiradi.  $F$  uchun umumiy ifoda  $\mu_k$  kompleks parametrlarga bog'liq bo'lib, bular  $l_n(\mu) = 0$  algebraik tenglamaning ildizi h-di. Kompleks parametrga teng bo'lmagan holatda funksiya

$$F = 2 \operatorname{Re} [F_{11}(z_1) + F_{12}(z_2)] + F_6 \quad (26.4)$$

ko'rinishga ega bo'ladi. Bu yerda  $F_{11}(z_1)$  va  $F_{12}(z_2)$  lar umumlashgan kompleks o'zgaruvchili funksiya bo'lib,

$$z_1 = x + \mu_1 y, \quad z_2 = x + \mu_2 y,$$

(26.5)

qiymatlar o'rinli,  $F_0$  esa (26.3) bir jinsli bo'lmagan tenglamaning xususiy yechimi.

Juft ildizlar teng bo'lgan holatda ( $\mu_1 = \mu_2$ ,  $\bar{\mu}_1 = \bar{\mu}_2$ ) funksiya

$$F = 2 \operatorname{Re} [z_1 F_{11}(z_1) + F_{12}(z_1)] + F_0. \quad (26.6)$$

ko'rinishda bo'ladi. Agar  $\mu_1 = \mu_2 = \alpha + \beta i$  bo'lsa  $z_1 = x_1 + iy_1$  bo'ladi, bunda

$$x_1 = x + iy_1, \quad y_1 = \beta y$$

Kuchlanish va siljishni aniqlash uchun  $F_{11}(z_1)$  va  $F_{12}(z_2)$  funksiyalarni hamda oddiy kompleks o'zgaruvchi

$z_1 = x_1 + iy$  ni topish kerak. Shu bilan birga izotrop jism uchun masalani  $S$  soha uchun emas, balki  $S_1$  soha uchun yechib, berilgan afin almashtirishi bilan amalgam oshiriladi.

Biz keyingi izlanishlarimizda  $\mu_1$  va  $\mu_2$  kompleks parametrlarni o'zaro teng bo'lmagan hollarini qaraymiz.

$$\phi_1(z_1) = F'_{11}(z_1), \quad \phi_2(z_2) = F'_{12}(z_2)$$

(26.7)

$F$  ning birinchi uchragan hosilasi uchun umumiy ifodani olamiz va tashkil etuvchi kuchlanish hamda siljishlar proeksiyasi uchun hajmiy kuch mavjud bo'lganda

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial x} &= 2 \operatorname{Re} [\phi_1(z_1) + \phi_2(z_1)], \\ \frac{\partial F}{\partial y} &= 2 \operatorname{Re} [\mu_1 \phi_1 + \mu_2 \phi_2] \end{aligned} \right\} \quad (26.8) \quad \left. \begin{aligned} \sigma_x &= 2 \operatorname{Re} [\mu_1^2 \phi_1'(z_1) + \mu_2^2 \phi_2'(z_1)], \\ \sigma_y &= 2 \operatorname{Re} [\phi_1' + \phi_2'] \\ \tau_{xy} &= -2 \operatorname{Re} [\mu_1 \phi_1' + \mu_2 \phi_2']; \end{aligned} \right\}$$

$$(26.9) \quad \left. \begin{aligned} u &= 2 \operatorname{Re} [p_1 \phi_1(z_1) + p_2 \phi_2(z_2) - \omega_3 y + u_0], \\ v &= 2 \operatorname{Re} [q_1 \phi_1(z_1) + q_2 \phi_2(z_2) + \omega_3 y + v_0] \end{aligned} \right\} \quad (26.10)$$

larga ega bo'lamiz. Bu formulalardagi parametrlar

$$\left. \begin{aligned} p_1 &= \beta_{11}\mu_1^2 + \beta_{12} - \beta_{16}\mu_1, \\ p_2 &= \beta_{11}\mu_2^2 + \beta_{12} - \beta_{26}\mu_2, \\ q_1 &= \beta_{12}\mu_1 + \frac{\beta_{22}}{\mu_1} - \beta_{26}; \\ q_2 &= \beta_{12}\mu_2 + \frac{\beta_{22}}{\mu_2} - \beta_{26}. \end{aligned} \right\} \quad (26.11)$$

teng bo'ladi.

Ko'ndalang kesim sohasi  $S$  konturdagi chegaraviy shartni aniqlash  $\phi_1$  va  $\phi_2$  kompleks potentsiallarni aniqlash masalasiga keltiriladi. Konturda  $x_n, y_n$  kuch berilganda chegaraviy shartlar

$$\left. \begin{aligned} 2 \operatorname{Re} [\phi_1 + \phi_2] &= \mp \int_0^s Y_n ds + c_1 \\ 2 \operatorname{Re} [\mu_1 \phi_1 + \mu_2 \phi_2] &= \pm \int_0^s X_n ds + c_2; \end{aligned} \right\} \quad (26.12)$$

ko'rinishga ega bo'ladi.  $u^*$  va  $v^*$  siljishlar berilganda chegaraviy shartlar quyidagi

$$\left. \begin{aligned} 2 \operatorname{Re} [p_1 \phi_1 + p_2 \phi_2] &= u^* + \omega_3 y - u_0, \\ 2 \operatorname{Re} [q_1 \phi_1 + q_2 \phi_2] &= v^* - \omega_3 x - v_0. \end{aligned} \right\} \quad (26.13)$$

ko'rinishga ega bo'ladi.  $\phi_1(z_1)$  va  $\phi_2(z_2)$  funksiyalarni  $z_k = x_k + iy_k$  ( $k=1,2$ ) oddiy kompleks o'zgaruvchisi sifatida qarajak, biz ularni  $S_1$  va  $S_2$  sohalarda aniqlashimiz hamda  $S$  ko'ndalang kesim sohasida affin almashtirish bilan topishimiz kerak. ko'ndalang kesim soha

ichida yoki o'zining  $S_1$ ,  $S_2$  sohasida yuqoridagi shartlar bu funksiyalarni qanoatlantirishi kerak. bu shartlardan yetarlicha murakkab masalani va biznin izlanishlarimizga tushinarli bo'lgan holatni olishimiz mumkin. Chegaralanmagan silindirik jism uchun keltirilgan barcha formulalrni San-Venan prinsipiga asoslangan holda qurilgan chekli jism uchun ham qabul qilishi mumkin. erkin va yuklanmagan holatdagi chegaralanmagan silindirik jismda  $P_z$  o'qli kuch va  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  eguvchi momentlarni olib tashlash mumkin. hamda kuchlanishning elementar taqsimotini amalgam oshirish kerak bo'ladi:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_z &= -\frac{P_z}{S} - \frac{M_1}{I_1} y - \frac{M_2}{I_2} x, \\ \sigma_x &= \sigma_y = \tau_{yz} = \tau_{xz} = \tau_{xy} = 0; \end{aligned} \right\} \quad (26.14)$$

Yassi deformatsiya masalasi umulashgan deformatsiya masalasiga juda yaqin masala hisoblanadi. Bir jinsli anizotrop materialdan tashkil topgan ,umumiy o'zgarma h qalinlikka ega plastinkani qaraymiz. Bunda o'rta tekislikka parallel bo'lgan barcha tekisliklarda yassi deformatsiya mavjud.

Faraz qilamizki sirt kuchi plastinka tomonlari bo'yicha hajmiy kuch esa butun plastinkaga tasir etadi va bu tasir o'rta tekislikka simmetrik bo'lib qalinlikning o'zgarishiga oz tasir etadi. O'rta tekislik sifatida x y koordinatalar tekisligini qabul qilamiz va x,y o'qlarini qulay tarzda yo'naltiramiz. Bunga sabab rost kuchlanish va siljishlarni o'rta tekislikka nisbatan o'rtacha qiymatini olishh-di:

$$\left. \begin{aligned} \bar{\sigma}_x &= \frac{1}{h} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_x dz, & \bar{\sigma}_y &= \frac{1}{h} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_y dz, \\ \bar{\tau}_{xy} &= \frac{1}{h} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \tau_{xy} dz; \\ \bar{u} &= \frac{1}{h} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} u dz, & \bar{v} &= \frac{1}{h} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} v dz, \end{aligned} \right\} \quad (26.15)$$

bu o'rtacha qiymatlar uchun

(18.2)

(18.3)

tenglamalardan  $\bar{\sigma}_x, \bar{\sigma}_y, \bar{\tau}_{xy}, \bar{u}, \bar{v}$  larni qanoatlantiruvchi tenglamalarni olamiz. Yassi deformatsiya holatida kuchlanish uchun bunday tenglamalarni (26.2) dan foydalanib olamiz. F deformatsiya (26.3) tenglamani qanoatlantiradi, qaysiki  $\beta_{ij}$  koeffitsientlar mos ravishda  $\alpha_{ij}$  koeffitsientlar bilan almashtirilgan:

$$a_{22} \frac{\partial^2 F}{\partial x^4} - 2a_{26} \frac{\partial^2 F}{\partial x^3 \partial y} + (2a_{12} + a_{66}) \frac{\partial^4 F}{\partial x^2 \partial y^2} - 2a_{16} \frac{\partial^4 F}{\partial x \partial y^3} + 2a_{11} \frac{\partial^4 F}{\partial y^4} =$$

$$-(a_{12} + a_{22}) \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + (a_{16} + a_{26}) \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial y} - (a_{11} + a_{12}) \frac{\partial^2 U}{\partial y^2}.$$

(26.16)

chegaraviy shartlar (26.12) yoki (26.13) ifodalardan farq qilmaydi, faqat ulardagi kompleks  $\mu_1, \mu_2, \bar{\mu}_1, \bar{\mu}_2$  parametrlar farq qilib, ular tenglamaning ildizlari h-di:

$$a_{11}\mu^4 - 2a_{16}\mu^3 + (2a_{12} + a_{66})\mu^2 - 2a_{26}\mu + a_{22} = 0. \quad (26.17)$$

shuning uchun ham yassi deformatsiya holati uchun olingan yechim umulashgan deformatsiya masalsining ham yechimi h-di. Ravshanki,  $\beta_{ij}$  ni  $\alpha_{ij}$  ga almashtirishda  $\phi_1, \phi_2$  funksiyalar strukturasi hamda kuchlanish va siljishlar uchun formulalar o'zgarmaydi, faqat formulalardagi koeffitsientlar o'zgaradi.

Yassi deformatsiya va umumlashgan deformatsiya masalalari birgalikda yassi elastiklik deformatsiyasi masalalari deb ataladi. Anizotrop jismlar uchun yassi elastiklik deformatsiyasi masalalari yechimlar uning mavjudligi va yagonaligi atroflicha ilmiy asoslangan. Yassi masalalarning integral tenglamalarga keltirilishi S.G.Muxlin, G.N.Savin va D.U.shermanning ishlarida yaxshi o'rganilgan.

### II.3. To'g'ri to'rtburchakli plastinkaning cho'zilish va egilish momenti.

Bir jinsli sterjenning to'g'ri chiziqli anizotropiyadagi o'qli kuch tasiridagi cho'zilish va egilish momenti mutlaq elementar yechimga ega. Ammo bu masalani jism uzluksiz va bir jinsli bo'lmagan holda murakkablashtirish mumkin. Bir jinsli bo'lmagan holdagi sterjen masalasni ko'rib chiqamiz.

Sterjen ko'ndalang kesimi ingichka to'g'ri to'rtburchak shaklidagi plastinka ko'rinishda bo'lsin. Bundan tashqari plastinkaning uzun tomoni kuchlardan holi va mahkamlangan, qisqa tomoni esa bir o'qli P kuch va M moment bilan yuklanish tasirida bo'lib, bu miqdorlar o'rta tekislik sifatida qabul qilingan x,y koordinatalar tekisligiga tasir etadi. Shu bilan birga plastinka uzluksiz va bir jinsli emas.

Sterjenni bir uchi mahkamlangan elastik xarakteriskaga ega, qalinligi bo'yicha o'zgarmas ortotrop deb hisoblaymiz. Uzunlik, qalinlik va balandlikni mos ravishda l,h,b bilan belgilaymiz. P kuch va M moment qalinlik birligiga nisbatan olinadi.

Qaralayotgan holatda umumlashgan yassilik kuchlanish holatida markazlashgan qinlik bo'yicha betlanuvchi tashkil etuvchi kuchlanish va siljishlarningchiziqli deb h-di, hamda ularni bu yerdan olib tashlanadi. Faraz qilamizki, bir jinsli bo'lmagan sterjen ham bir jinsli sterjen kabi faqat  $\sigma_x$  tashkil etuvchi nolga teng emas va  $\sigma_y = \tau_{xy} = 0$  bo'ladi.  $\sigma_x$  faqat uning funksiyasi bo'ladi.

Umumlashgan Guk qonuni o'rtacha ko'chish vsa kuchlanish uchun 3 ta tenglamani beradi:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\sigma_x}{E_1}, \quad \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\nu_1}{E_1} \sigma_x, \quad \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = 0. \quad (37.1)$$

dastlabki 2 ta tenglamadan

$$u = \sigma_x \int \frac{dx}{E_1} - \omega y + u_0, \quad v = -\int \frac{v_1 \sigma_x}{E_1} dy + \omega x + v_0. \quad (37.2)$$

kelib chiqadi. Uchinchi tenglamani x va y lar bo'yicha differensiallab, Yung moduli, Puasson koeffitsientlari va kuchlanishga bog'liq bo'lgan ifoda olinadi:

$$\frac{\partial^2}{\partial y^2} \left( \frac{\sigma_x}{E_1} \right) - \sigma_x \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left( \frac{v_1}{E_1} \right) = 0. \quad (37.3)$$

Agar (37.3) shart bajarilsa, u holda taqsimlangan kuchlanish bir jinsli bo'ladi.

( $\sigma_x \neq 0, \sigma_y = \tau_{xy} = 0$ ) Agar  $E_1, \bar{v}_1$  lar berilgan bo'lsa, u holda  $\sigma_x$  (37.3) tenglamadan aniqlanadi, oxirgi ko'rinish faqat xususiy holdagi elastic xaraktewritikalarida umumiy holda integrallanishi mumkin. Qachonki Yung moduli va Puasson koeffitsientlari ffaqat x yoki faqat y o'zgaruvchiga bog'liq bo'lgan hosilaviy funksiyalaridan iborat bo'lsa, ushbu

$$E_1 = E_x(x)E_y(y), \quad v_1 = v_{1x}(x)v_{1y}(y). \quad (37.4)$$

ko'rinishi o'rinli bo'ladi. Bu ifodani (37.3) ga qo'ysak va o'zgaruvchilarni ajratsak, quyidagi 2 ta tenglamani olamiz.

$$\left( \frac{v_{1x}}{E_x} \right)'' - \frac{n^2}{l^2} \left( \frac{1}{E_x} \right) = 0. \quad (37.5) \quad \left( \frac{\sigma_x}{E_y} \right)'' - \frac{n^2 v_{1y}}{l^2} \left( \frac{\sigma_x}{E_y} \right) = 0. \quad (37.6)$$

bu yerda n-ixtiyoriy haqiqiy o'zgarvas bo'lib, sof turg'un yoki nol bo'lishi mumkin. (37.5)

chiziqli tenglamaning chiziqli bog'liq bo'lmagan ildizlarni  $X_1(x, n)$  va  $X_2(x, n)$  bilan (37.6)

tenglamaning ildizlarini esa  $Y_1(y, n), Y_2(y, n)$  bilan belgilaymiz va oxirgi natijani yozamiz.

#### 1. Modul uchun ifoda

$$E_1 = \frac{E_y(y)}{C_1 X_1 + C_2 X_2}. \quad (37.7)$$

strukturaga ega, bu yerda  $E_y$  - uning ixtiyoriy funksiyasi,  $C_1, C_2$  -ixtiyoriy o'zgarvaslar. Bu

uchala ixtiyoriy miqdorlar fizik mohiyatga ega bo'lib,  $E_1 > 0$  bo'lganda manoga ega. Bundan

tashqari  $E_y$  funksiya boshqa chegaralanishlarga ham ega qaysiki ular (37.6) tenglamadan kelib

chiqadi.

2.  $v_{1x}$  va  $v_{1y}$  funksiyalar 0 va 1 orasida joylashishi shart, bu funksiyadagi qolgan hadlar ixtiyoriy bo'lishi mumkin.

### 3. Kuchlanish

$$\sigma_y = E_y (AY_1 + BY_2). \quad (37.8)$$

formula bo'yicha aniqlanadi. A va B o'zgarmaslar yuklangan yoq shartidan va ixtiyoriy ko'ndalang kesimda

$$\int_{-b/2}^{b/2} \sigma_x dy = P, \quad \int_{-b/2}^{b/2} \sigma_x y dy = M, \quad (37.9)$$

bilan aniqlanadi. Bu yerdan A va B lar uchun 2 ta tenglamalar sistemasini olamiz:

$$\left. \begin{aligned} A \int_{-b/2}^{b/2} E_y Y_1 dy + B \int_{-b/2}^{b/2} E_y Y_2 dy &= P, \\ A \int_{-b/2}^{b/2} E_y Y_1 y dy + B \int_{-b/2}^{b/2} E_y Y_2 y dy &= M, \end{aligned} \right\} \quad (37.10)$$

4. Siljish (37.2) formula bo'yicha topilib bu yerda  $\sigma_x, E_1, v_1$  lar

$$\left. \begin{aligned} u &= (AY_1 + BY_2) \int (C_1 X_1 + C_2 X_2) dx - \omega y + u_0, \\ v &= -(C_1 X_1 + C_2 X_2) v_{1x} \int (AY_1 + BY_2) v_{1y} dy + \omega x + v_0, \end{aligned} \right\} \quad (37.11)$$

ko'rinishni qabul qiladi.

$\omega, u_0, v_0$  o'zgarmaslar sterjin o'qidagi yoqning mahkamlanganlik shartidan, yani  $x=0$  dan aniqlanadi.

$n=0$  holat ham mumkin bo'lgan holatlarning biri hisoblanib, unga modul va kuchlanish mos keladi:

$$E_1 = \frac{\nu_{1x} E_y(y)}{C_1 + C_2 \frac{x}{l}}, \quad (37.12)$$

$$\sigma_x = E_y \left( A + B \frac{y}{l} \right), \quad (37.13)$$

va nihoyat, takidlaymizki  $\nu_1$  Puasson koeffitsientlari o'zgarmas son va  $n$ - hajmiy, nolga tengv bo'lmagan son bo'lganda (37.7) va (37.8) ifodalar

$$E = \frac{E_y}{C_1 ch \frac{nx}{l} + C_2 sh \frac{nx}{l}}, \quad (37.14)$$

$$\sigma_y = E_y \left( A ch \frac{n\sqrt{\nu_1}}{l} y + B sh \frac{n\sqrt{\nu_1}}{l} y \right). \quad (37.15)$$

ko'rinishini oladi.

Agar  $n$ - turg'un son bo'lsa, u holda giperbolik kosinus va sinuslar kosinus va sinus bilan almashadi.

o'rinishini oladi.

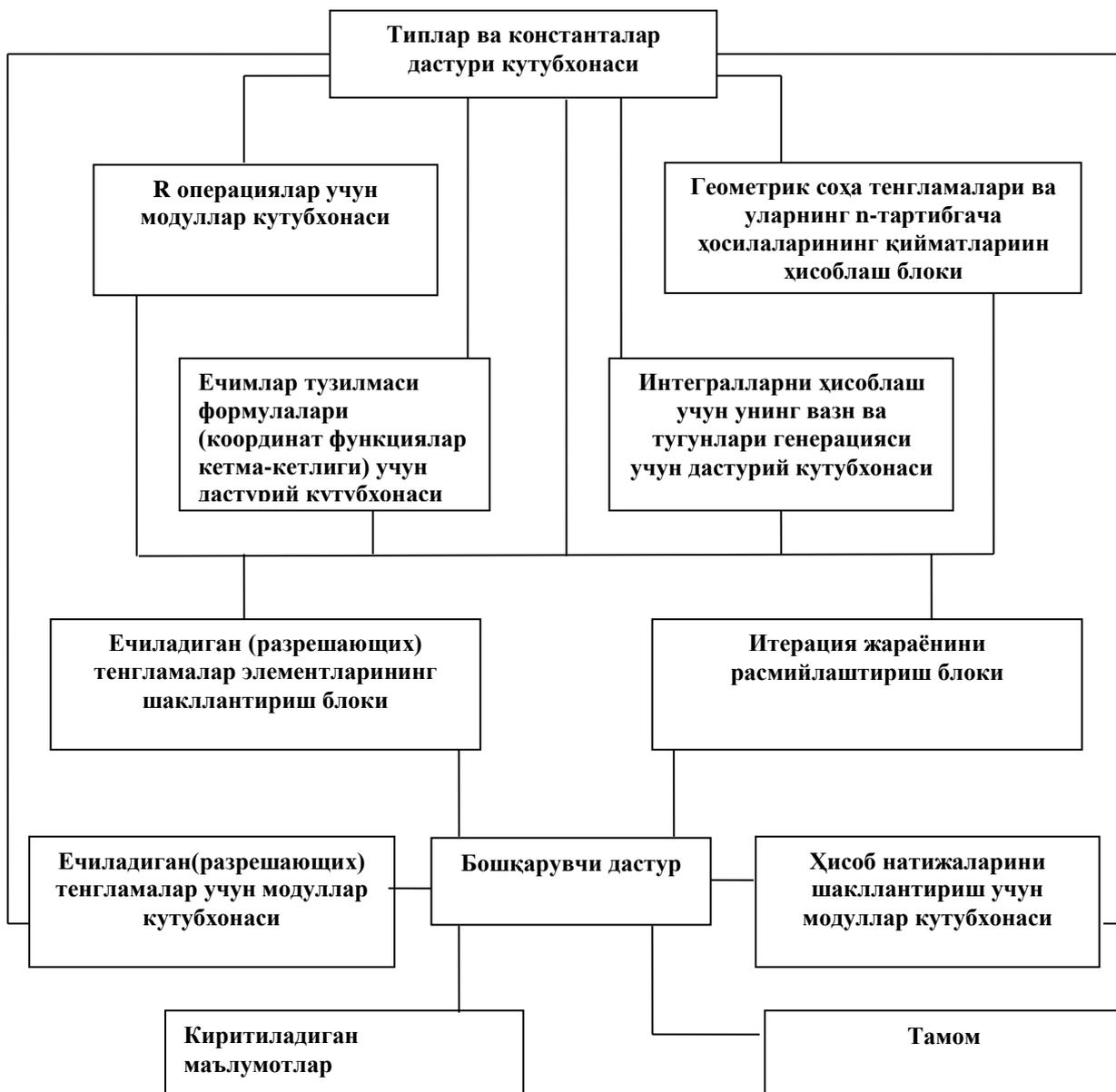
### III BOB. KLASSIK SHAKLGA EGA B'ULGAN EGILUVCHAN ANIZOTROP PLASTINKALAR ҲИСОБИ

**Учинчи боб** классик шаклга эга бўлган эгиловчан анизотроп пластинка мувозанати масаласининг ечиш бўйича ҳисоблаш тажрибаларини ўтказишга бағишланган.

Татқиқот натижасида олинган сонли натижаларнинг ишончилигини аниқлаш бошқа муаллифларнинг натижалари билан таққослаш кузда тутилган.

#### III. 1. Egiluvchan izotrop plastinka masalasi

Чегаралари қаттиқ маҳкамланган эгиловчан тўғри тўртбурчакли ўзгармас қалинликдаги изотроп пластинка масаласини кўриб чиқамиз ва  $\lambda$  нинг турли қийматларида ( $\lambda = 2a/2b$ ,  $a$  ва  $b$  – мос равишда пластинканинг эни ва бўйи) ва  $\nu = 0.3$  учун ҳисоб-китоб натижаларини дастур ёрдамида оламиз 1-жадвалда келтирилган. Бу ерда,  $W^*$  нинг эгилиш ва  $\sigma_x$  кучланишининг қийматлари координата марказида  $O(0,0)$  нуқтада ҳисобланган .



1-расм Дастурлар мажмуасининг тuzилиши

Натижаларни солиштириш.

$\lambda = 1$				
$q^*$	$w_0^*$		$\sigma_{x,0}$	
	М.С.Корнишин натижалари	R-функция усуллари	М.С.Корнишин натижалари	R-функция усуллари
5.63	0.077	0.079	0.197	0.199
8.44	0.115	0.118	0.298	0.299
12.7	0.171	0.174	0.448	0.450
19.0	0.252	0.254	0.675	0.670
28.5	0.365	0.368	0.996	0.993

Итерация сони 4 га тенг бўлганда ҳисоб натижалари келтирилган. Диссертация ишида  $\lambda = 1,5$  ва  $\lambda = 3$  даги натижалар ҳам ҳисоб-китоб қилинган.

### III.2. Yupqa anizotrop plastinkaning deformatsion holati

Bizga XOY tekisligida joylashgan uzunligi 3 m ,eni 4 m qalinligi 0,1 m ga teng bo'lgan to'g'ri turtburchak shaklidagi yupqa plastinka berilgan bo'lib, plastinkada Yung moduli  $E_1=3 \cdot 10^7$  kPa,  $E_2=2.8 \cdot 10^7$  kPa,  $E_3=3.2 \cdot 10^7$  kPa, Puasson koeffitsenti  $\nu_1=0.2$ ,  $\nu_2=0.19$ ,  $\nu_3=0.23$  ga teng chiziqli izotrop matireal qaralayotgan bo'lsin.

Elastiklik plastinkani ifodalovchi begarmonik tenglama:

$$\lambda(\omega) \left\{ \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \omega}{\partial y^4} \right\} = - \frac{q}{D}$$

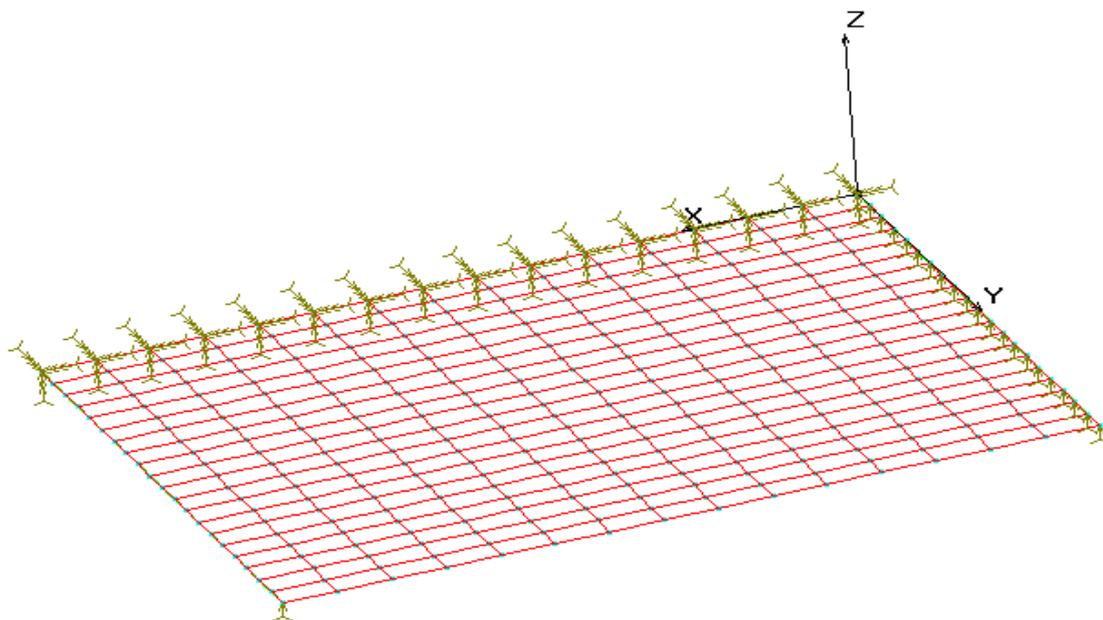
$$\begin{cases} \omega(x,0) = 0 \\ \omega(x,a) = f(x) \\ \omega(0,y) = 0 \\ \omega(x,b) = f(y) \end{cases} \text{-chegaraviy shart.}$$

bu yerda  $\lambda(\omega)$  -jismning fizik xossalari ifodalovchi  $\omega$  ga bog'liq funktsiya,  $D = \frac{E \delta^3}{9}$  - silindrik bikrlilik,  $E$ -elastiklik modul,  $\omega$  -plastinka egilishini ifodalovchi noma'lum funktsiya,  $q(x,y)$ -tashqi kundalang yuklanish funktsiyasi.

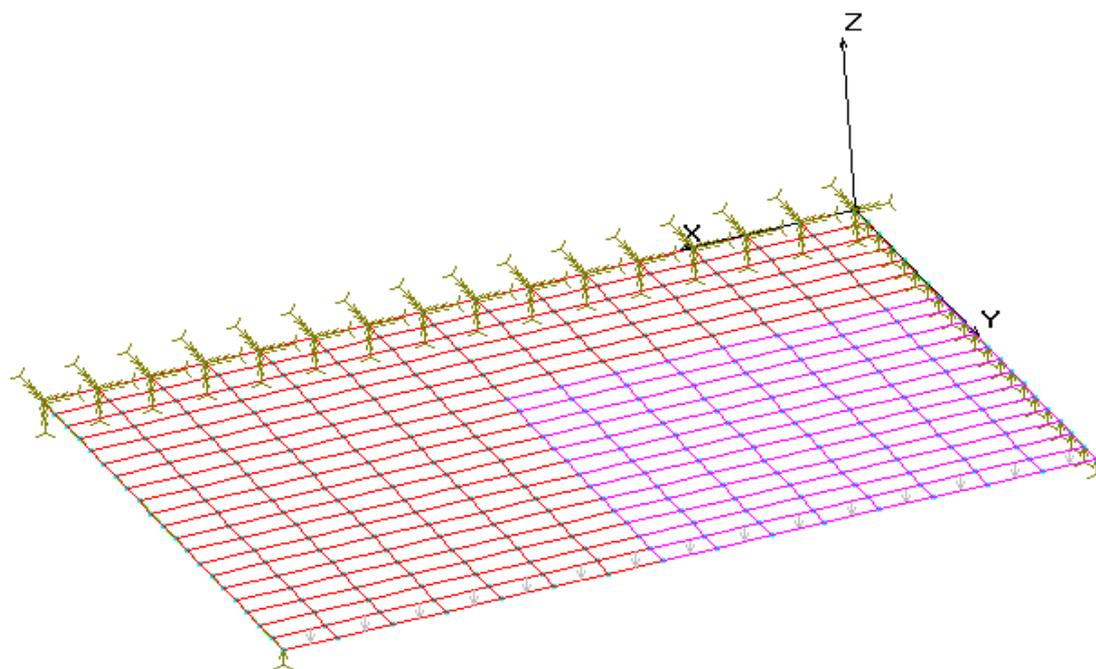
Plastinkaning uzun tomonlaridan bittasi Sharnarli tayanchga birlashtirilgan, qisqa tomonlaridan biri esa qattiq mahkamlangan. Qolgan tomonlari erkin holda

turibdi.  $\{x = 0,0 \dots 2,0m; y = 1,0 \dots 3,0m\}$  plastinkaning markaziy qismiga og'irligi  $p=20$  kPa bo'lgan yuklanish teng taqsimlangan holda qo'yilgan. Plastinkaning qisqa erkin turgan tomoniga  $q=1kH/m$  teng taqsimlangan yuklanish ta'sir etmoqda.

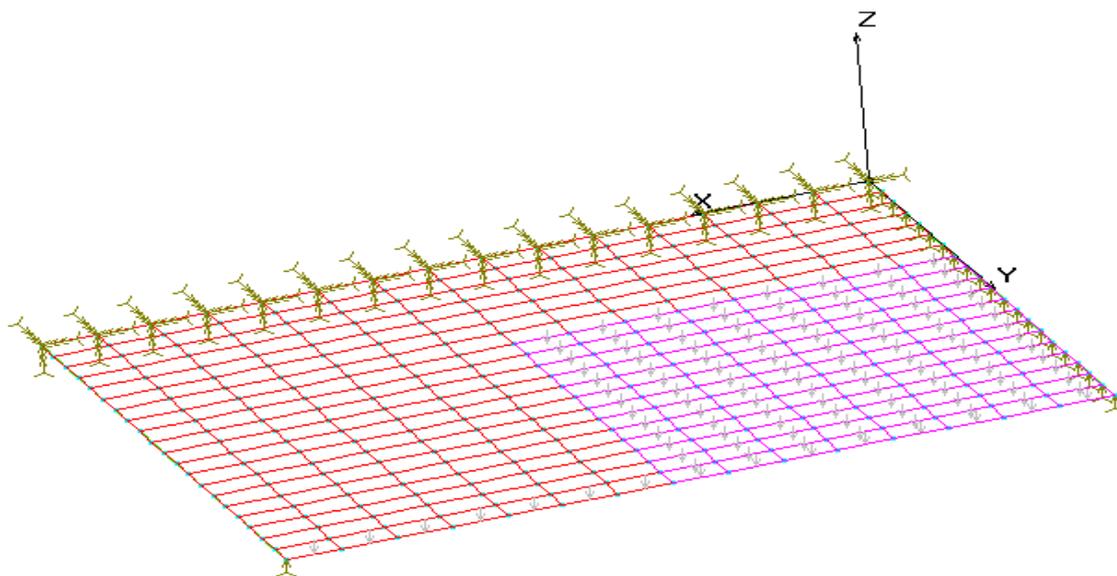
### Grafik natijalar.



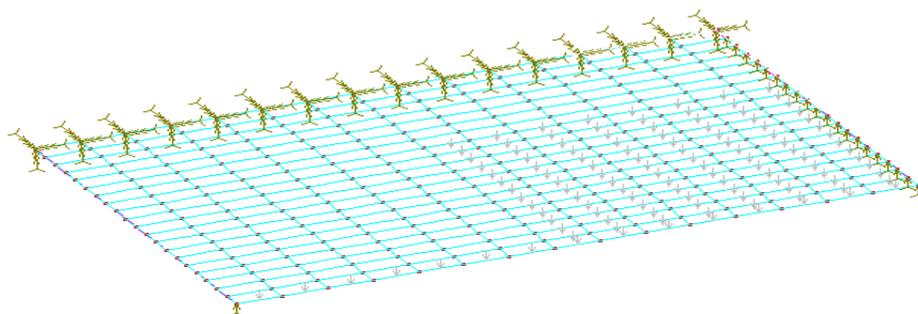
2-rasm.yuklanish ostidagi plastinka ko'rinishi.



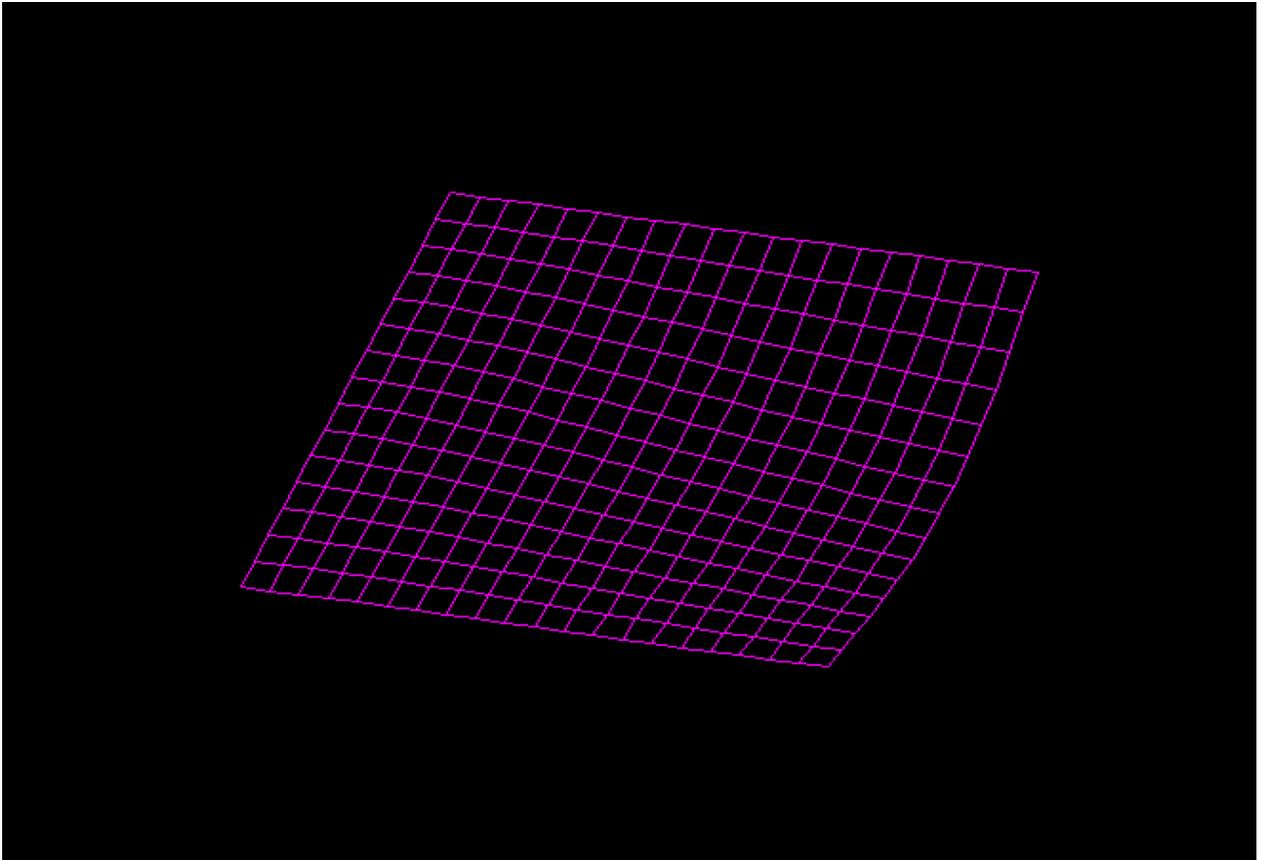
**3-rasm. Plastinkaning sharnerli tayanchda turgan holatini tasvirlash**



**4-rasm. Har bir elementar yuzaga ta'sir etayotgan kuchlanishlarni tasvirlash.**



**5-rasm. Berilgan chegaraviy shartlar ostida bo'lgan plastinkaning umumiy ko'rinishi.**



6-rasm.Tashqi kuch ta'siridagi plastinkaning holati.

Sonli natijalar.

```

*****
*****
**
**
** CCC OO SSS M M OO SSS **
** C OO S MM MM OO S **
** C OO SS MMMM OO SS **
** C OO S M M O O S **
** CCC OO SSS M M OO SSS **
**
**

```

```

**                               **
**      VERSION: 2.85             **
**      DISTRIBUTED BY:           **
**      STRUCTURAL RESEARCH AND ANALYSIS CORPORATION   **
**      12121 WILSHIRE BLVD. SUITE 700                 **
**      LOS ANGELES, CALIFORNIA 90025                 **
**      TEL. NO. (310) 207-2800                       **
**      COPYRIGHT 1988-2003 S. R. A. C.                **
**                               **

```

```

*****
*****

```

```

Problem name: Plastinka
Date      : 04/14/2011   Time: 14:29:20
Title    :
Subtitle :

```

CONTROL INFORMATION

```

NUMBER OF LOAD CASES .....(NLCASE) =    1
SOLUTION MODE .....(MODEX) =    0
  EQ. 0, STATIC ANALYSIS
  EQ. 1, BUCKLING ANALYSIS
  EQ. 2, DYNAMIC ANALYSIS
SOLVER TYPE .....(ISOL) =    0
  EQ. 0, DIRECT SPARSE SOLVER
  EQ. 1, DIRECT SKYLINE SOLVER
  EQ. 2, ITERATIVE SOLVER

THERMAL LOADING FLAG .....(ITHERM) =    0
  EQ. 0, NO THERMAL EFFECTS CONSIDERED
  EQ. 1, ADD TEMPERATURE EFFECT
GRAVITY LOADING FLAG .....(IGRAV) =    0
  EQ. 0, NO GRAVITY LOADING CONSIDERED
  EQ. 1, ADD GRAVITY LOADING EFFECT
CENTRIFUGAL LOADING FLAG .....(ICNTRF) =    0
  EQ. 0, NO CENTRIFUGAL LOADING CONSIDERED
  EQ. 1, ADD CENTRIFUGAL LOADING EFFECT
IN-PLANE STIFFENING FLAG .....(INPLN) =    0
  EQ. 0, NO IN-PLANE EFFECTS CONSIDERED
  EQ. 1, IN-PLANE EFFECTS CONSIDERED
SOFT SPRING ADDITION FLAG .....(ISOFT) =    0
  EQ. 0, NO SOFT SPRING OPTION
  EQ. 1, SOFT SPRING ADDED

SAVE DECOMPOSED STIFFNESS MATRIX FLAG ... (ISAVK) =    0
  EQ. 0, DO NOT SAVE DECOMPOSED K
  EQ. 1, SAVE DECOMPOSED K
FORM STIFFNESS MATRIX FLAG .....(IFORMK) =    0
  EQ. 0, FORM STIFFNESS MATRIX
  EQ. 1, USE EXISTING DECOMPOSED STIFFNESS MATRIX

```

SPIN SOFTENING FLAG ..... (ISPIN) = 0  
 EQ. 0, NO SPIN SOFTENING EFFECTS CONSIDERED  
 EQ. 1, SPIN SOFTENING EFFECTS CONSIDERED  
 INERTIA RELIEF FLAG ..... (IFORMK) = 0  
 EQ. 0, NO INERITA RELIEF EFFECTS CONSIDERED  
 EQ. 1, INERITA RELIEF EFFECTS CONSIDERED  
 RIGID CONNECTIONS FLAG ..... (IRIGID) = 0  
 EQ. 0, HINGE CONNECTIONS BETWEEN SOLIDS & SHELLS  
 EQ. 1, RIGID CONNECTIONS BETWEEN SOLIDS & SHELLS

TOTAL SYSTEM DATA

NUMBER OF EQUATIONS .....(NEQ) = 1899  
 MEAN HALF BANDWIDTH .....(MM) = 45  
 NUMBER OF ELEMENTS.....(NUME) = 300  
 NUMBER OF NODAL POINTS.....(NUMNP)= 336

ORIGINAL NO. OF MATRIX ELEMENTS .....(NWK) = 24631

\*\*\*\*\*  
 \* RESPONSE PRINTOUT (LOAD CASE 1) \*  
 \*\*\*\*\*

STATUS OF THERMAL EFFECTS FOR THIS LOAD CASE:

-----

- Thermal flag is off (no thermal effect)

DISPLACEMENTS

NODE	X-DISPL.	Y-DISPL.	Z-DISPL.	XX-ROT.	YY-ROT.	ZZ-ROT.
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.0000	0.0000	0.0000	-1.73051E-06	8.39428E-05	0.0000
3	0.0000	0.0000	0.0000	-3.66876E-07	2.58889E-04	0.0000
4	0.0000	0.0000	0.0000	-4.66552E-07	5.28335E-04	0.0000
5	0.0000	0.0000	0.0000	-3.05369E-07	8.70671E-04	0.0000
6	0.0000	0.0000	0.0000	-2.41950E-07	1.27071E-03	0.0000
7	0.0000	0.0000	0.0000	-2.56450E-07	1.71442E-03	0.0000
8	0.0000	0.0000	0.0000	-2.68773E-07	2.18784E-03	0.0000
9	0.0000	0.0000	0.0000	-1.37945E-07	2.67596E-03	0.0000
10	0.0000	0.0000	0.0000	3.97466E-09	3.16542E-03	0.0000
11	0.0000	0.0000	0.0000	7.50537E-08	3.64724E-03	0.0000
12	0.0000	0.0000	0.0000	1.29337E-07	4.11605E-03	0.0000
13	0.0000	0.0000	0.0000	1.73447E-07	4.56904E-03	0.0000

14	0.0000	0.0000	0.0000	2.13516E-07	5.00536E-03	0.0000
15	0.0000	0.0000	0.0000	2.53699E-07	5.42576E-03	0.0000
16	0.0000	0.0000	0.0000	2.98959E-07	5.83251E-03	0.0000
17	0.0000	0.0000	0.0000	3.46538E-07	6.22931E-03	0.0000
18	0.0000	0.0000	0.0000	4.65224E-07	6.62142E-03	0.0000
19	0.0000	0.0000	0.0000	1.43591E-07	7.01596E-03	0.0000
20	0.0000	0.0000	0.0000	3.33995E-06	7.42137E-03	0.0000
21	0.0000	0.0000	0.0000	-1.89896E-05	7.84847E-03	0.0000
22	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
23	0.0000	0.0000	-1.75539E-05	-2.21954E-04	8.03171E-05	0.0000
24	0.0000	0.0000	-6.49387E-05	-4.00097E-04	2.47878E-04	0.0000
25	0.0000	0.0000	-1.36253E-04	-5.42828E-04	5.06099E-04	0.0000
26	0.0000	0.0000	-2.26685E-04	-6.56214E-04	8.34025E-04	0.0000
27	0.0000	0.0000	-3.32165E-04	-7.44186E-04	1.21681E-03	0.0000
28	0.0000	0.0000	-4.49050E-04	-8.08350E-04	1.64070E-03	0.0000
29	0.0000	0.0000	-5.73726E-04	-8.47159E-04	2.09242E-03	0.0000
30	0.0000	0.0000	-7.02246E-04	-8.60293E-04	2.55861E-03	0.0000
31	0.0000	0.0000	-8.31088E-04	-8.53791E-04	3.02748E-03	0.0000
32	0.0000	0.0000	-9.57941E-04	-8.35230E-04	3.49054E-03	0.0000
33	0.0000	0.0000	-1.08141E-03	-8.09665E-04	3.94231E-03	0.0000
34	0.0000	0.0000	-1.20073E-03	-7.80867E-04	4.37976E-03	0.0000
35	0.0000	0.0000	-1.31567E-03	-7.51915E-04	4.80175E-03	0.0000
36	0.0000	0.0000	-1.42642E-03	-7.25508E-04	5.20880E-03	0.0000
37	0.0000	0.0000	-1.53353E-03	-7.04191E-04	5.60287E-03	0.0000
38	0.0000	0.0000	-1.63798E-03	-6.90531E-04	5.98733E-03	0.0000
39	0.0000	0.0000	-1.74110E-03	-6.87287E-04	6.36692E-03	0.0000
40	0.0000	0.0000	-1.84469E-03	-6.97600E-04	6.74805E-03	0.0000
41	0.0000	0.0000	-1.95101E-03	-7.24690E-04	7.13842E-03	0.0000
42	0.0000	0.0000	-2.06303E-03	-7.73616E-04	7.54470E-03	0.0000
43	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
44	0.0000	0.0000	-3.36197E-05	-4.25523E-04	7.02282E-05	0.0000
45	0.0000	0.0000	-1.24488E-04	-7.67650E-04	2.17207E-04	0.0000
46	0.0000	0.0000	-2.61322E-04	-1.04162E-03	4.44143E-04	0.0000
47	0.0000	0.0000	-4.34822E-04	-1.25871E-03	7.32381E-04	0.0000
48	0.0000	0.0000	-6.37065E-04	-1.42611E-03	1.06854E-03	0.0000
49	0.0000	0.0000	-8.60921E-04	-1.54718E-03	1.44022E-03	0.0000
50	0.0000	0.0000	-1.09946E-03	-1.62118E-03	1.83606E-03	0.0000
51	0.0000	0.0000	-1.34557E-03	-1.64938E-03	2.24566E-03	0.0000

#### DISPLACEMENTS

NODE	X-DISPL.	Y-DISPL.	Z-DISPL.	XX-ROT.	YY-ROT.	ZZ-ROT.
52	0.0000	0.0000	-1.59294E-03	-1.64148E-03	2.65999E-03	0.0000
53	0.0000	0.0000	-1.83715E-03	-1.60976E-03	3.07187E-03	0.0000
54	0.0000	0.0000	-2.07536E-03	-1.56359E-03	3.47614E-03	0.0000
55	0.0000	0.0000	-2.30599E-03	-1.51033E-03	3.86958E-03	0.0000
56	0.0000	0.0000	-2.52846E-03	-1.45606E-03	4.25068E-03	0.0000
57	0.0000	0.0000	-2.74301E-03	-1.40608E-03	4.61943E-03	0.0000
58	0.0000	0.0000	-2.95066E-03	-1.36531E-03	4.97713E-03	0.0000
59	0.0000	0.0000	-3.15317E-03	-1.33863E-03	5.32633E-03	0.0000

60	0.0000	0.0000	-3.35302E-03	-1.33114E-03	5.67080E-03	0.0000
61	0.0000	0.0000	-3.55350E-03	-1.34850E-03	6.01555E-03	0.0000
62	0.0000	0.0000	-3.75881E-03	-1.39741E-03	6.36740E-03	0.0000
63	0.0000	0.0000	-3.97425E-03	-1.48569E-03	6.73151E-03	0.0000
64	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
65	0.0000	0.0000	-4.70128E-05	-5.95617E-04	5.55227E-05	0.0000
66	0.0000	0.0000	-1.74303E-04	-1.07599E-03	1.72444E-04	0.0000
67	0.0000	0.0000	-3.66186E-04	-1.46108E-03	3.53678E-04	0.0000
68	0.0000	0.0000	-6.09589E-04	-1.76587E-03	5.84564E-04	0.0000
69	0.0000	0.0000	-8.93294E-04	-2.00023E-03	8.54431E-04	0.0000
70	0.0000	0.0000	-1.20722E-03	-2.16946E-03	1.15345E-03	0.0000
71	0.0000	0.0000	-1.54173E-03	-2.27448E-03	1.47284E-03	0.0000
72	0.0000	0.0000	-1.88728E-03	-2.31848E-03	1.80475E-03	0.0000
73	0.0000	0.0000	-2.23546E-03	-2.31363E-03	2.14244E-03	0.0000
74	0.0000	0.0000	-2.58014E-03	-2.27514E-03	2.48041E-03	0.0000
75	0.0000	0.0000	-2.91724E-03	-2.21534E-03	2.81447E-03	0.0000
76	0.0000	0.0000	-3.24437E-03	-2.14438E-03	3.14175E-03	0.0000
77	0.0000	0.0000	-3.56051E-03	-2.07085E-03	3.46065E-03	0.0000
78	0.0000	0.0000	-3.86586E-03	-2.00227E-03	3.77070E-03	0.0000
79	0.0000	0.0000	-4.16170E-03	-1.94564E-03	4.07252E-03	0.0000
80	0.0000	0.0000	-4.45032E-03	-1.90777E-03	4.36771E-03	0.0000
81	0.0000	0.0000	-4.73506E-03	-1.89573E-03	4.65887E-03	0.0000
82	0.0000	0.0000	-5.02037E-03	-1.91720E-03	4.94946E-03	0.0000
83	0.0000	0.0000	-5.31188E-03	-1.98088E-03	5.24422E-03	0.0000
84	0.0000	0.0000	-5.61668E-03	-2.09688E-03	5.54695E-03	0.0000
85	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
86	0.0000	0.0000	-5.69681E-05	-7.22626E-04	3.82413E-05	0.0000
87	0.0000	0.0000	-2.11561E-04	-1.30793E-03	1.19653E-04	0.0000
88	0.0000	0.0000	-4.44977E-04	-1.77841E-03	2.46878E-04	0.0000
89	0.0000	0.0000	-7.41385E-04	-2.15124E-03	4.10149E-04	0.0000
90	0.0000	0.0000	-1.08711E-03	-2.43816E-03	6.02212E-04	0.0000
91	0.0000	0.0000	-1.46986E-03	-2.64604E-03	8.16335E-04	0.0000
92	0.0000	0.0000	-1.87805E-03	-2.77728E-03	1.04652E-03	0.0000
93	0.0000	0.0000	-2.30036E-03	-2.83659E-03	1.28749E-03	0.0000
94	0.0000	0.0000	-2.72687E-03	-2.83787E-03	1.53466E-03	0.0000
95	0.0000	0.0000	-3.15021E-03	-2.79814E-03	1.78425E-03	0.0000
96	0.0000	0.0000	-3.56535E-03	-2.73163E-03	2.03324E-03	0.0000
97	0.0000	0.0000	-3.96920E-03	-2.65033E-03	2.27939E-03	0.0000
98	0.0000	0.0000	-4.36034E-03	-2.56458E-03	2.52125E-03	0.0000
99	0.0000	0.0000	-4.73881E-03	-2.48355E-03	2.75809E-03	0.0000
100	0.0000	0.0000	-5.10597E-03	-2.41576E-03	2.98992E-03	0.0000
101	0.0000	0.0000	-5.46442E-03	-2.36949E-03	3.21741E-03	0.0000
102	0.0000	0.0000	-5.81802E-03	-2.35323E-03	3.44190E-03	0.0000
103	0.0000	0.0000	-6.17193E-03	-2.37604E-03	3.66533E-03	0.0000

#### DISPLACEMENTS

NODE	X-DISPL.	Y-DISPL.	Z-DISPL.	XX-ROT.	YY-ROT.	ZZ-ROT.
104	0.0000	0.0000	-6.53277E-03	-2.44803E-03	3.89039E-03	0.0000
105	0.0000	0.0000	-6.90872E-03	-2.58062E-03	4.11929E-03	0.0000

106	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
107	0.0000	0.0000	-6.31321E-05	-8.01952E-04	2.01414E-05	0.0000
108	0.0000	0.0000	-2.34910E-04	-1.45496E-03	6.41342E-05	0.0000
109	0.0000	0.0000	-4.94822E-04	-1.98203E-03	1.34220E-04	0.0000
110	0.0000	0.0000	-8.25421E-04	-2.40107E-03	2.25738E-04	0.0000
111	0.0000	0.0000	-1.21154E-03	-2.72467E-03	3.35046E-04	0.0000
112	0.0000	0.0000	-1.63953E-03	-2.96067E-03	4.58667E-04	0.0000
113	0.0000	0.0000	-2.09657E-03	-3.11242E-03	5.93512E-04	0.0000
114	0.0000	0.0000	-2.57031E-03	-3.18562E-03	7.36879E-04	0.0000
115	0.0000	0.0000	-3.04989E-03	-3.19512E-03	8.86420E-04	0.0000
116	0.0000	0.0000	-3.52716E-03	-3.15887E-03	1.04008E-03	0.0000
117	0.0000	0.0000	-3.99644E-03	-3.09203E-03	1.19608E-03	0.0000
118	0.0000	0.0000	-4.45416E-03	-3.00756E-03	1.35291E-03	0.0000
119	0.0000	0.0000	-4.89853E-03	-2.91673E-03	1.50937E-03	0.0000
120	0.0000	0.0000	-5.32939E-03	-2.82969E-03	1.66458E-03	0.0000
121	0.0000	0.0000	-5.74801E-03	-2.75588E-03	1.81803E-03	0.0000
122	0.0000	0.0000	-6.15707E-03	-2.70448E-03	1.96955E-03	0.0000
123	0.0000	0.0000	-6.56063E-03	-2.68481E-03	2.11928E-03	0.0000
124	0.0000	0.0000	-6.96417E-03	-2.70676E-03	2.26767E-03	0.0000
125	0.0000	0.0000	-7.37473E-03	-2.78116E-03	2.41549E-03	0.0000
126	0.0000	0.0000	-7.80105E-03	-2.92014E-03	2.56337E-03	0.0000
127	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
128	0.0000	0.0000	-6.54957E-05	-8.33319E-04	2.70267E-06	0.0000
129	0.0000	0.0000	-2.44250E-04	-1.51606E-03	1.04053E-05	0.0000
130	0.0000	0.0000	-5.15398E-04	-2.06995E-03	2.47238E-05	0.0000
131	0.0000	0.0000	-8.60997E-04	-2.51230E-03	4.57320E-05	0.0000
132	0.0000	0.0000	-1.26534E-03	-2.85567E-03	7.31663E-05	0.0000
133	0.0000	0.0000	-1.71427E-03	-3.10825E-03	1.06672E-04	0.0000
134	0.0000	0.0000	-2.19455E-03	-3.27394E-03	1.46056E-04	0.0000
135	0.0000	0.0000	-2.69342E-03	-3.35885E-03	1.91293E-04	0.0000
136	0.0000	0.0000	-3.19975E-03	-3.37800E-03	2.42344E-04	0.0000
137	0.0000	0.0000	-3.70506E-03	-3.34931E-03	2.98940E-04	0.0000
138	0.0000	0.0000	-4.20336E-03	-3.28795E-03	3.60502E-04	0.0000
139	0.0000	0.0000	-4.69075E-03	-3.20693E-03	4.26200E-04	0.0000
140	0.0000	0.0000	-5.16519E-03	-3.11776E-03	4.95068E-04	0.0000
141	0.0000	0.0000	-5.62623E-03	-3.03085E-03	5.66110E-04	0.0000
142	0.0000	0.0000	-6.07497E-03	-2.95602E-03	6.38361E-04	0.0000
143	0.0000	0.0000	-6.51393E-03	-2.90279E-03	7.10907E-04	0.0000
144	0.0000	0.0000	-6.94706E-03	-2.88077E-03	7.82867E-04	0.0000
145	0.0000	0.0000	-7.37980E-03	-2.90003E-03	8.53338E-04	0.0000
146	0.0000	0.0000	-7.81913E-03	-2.97150E-03	9.21244E-04	0.0000
147	0.0000	0.0000	-8.27377E-03	-3.10730E-03	9.85759E-04	0.0000
148	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
149	0.0000	0.0000	-6.43504E-05	-8.20231E-04	-1.27375E-05	0.0000
150	0.0000	0.0000	-2.40582E-04	-1.49686E-03	-3.74523E-05	0.0000
151	0.0000	0.0000	-5.08648E-04	-2.04887E-03	-7.33656E-05	0.0000
152	0.0000	0.0000	-8.51093E-04	-2.49184E-03	-1.16456E-04	0.0000
153	0.0000	0.0000	-1.25251E-03	-2.83758E-03	-1.64210E-04	0.0000
154	0.0000	0.0000	-1.69900E-03	-3.09435E-03	-2.14385E-04	0.0000
155	0.0000	0.0000	-2.17762E-03	-3.26658E-03	-2.64552E-04	0.0000

## DISPLACEMENTS

NODE	X-DISPL.	Y-DISPL.	Z-DISPL.	XX-ROT.	YY-ROT.	ZZ-ROT.
156	0.0000	0.0000	-2.67603E-03	-3.36057E-03	-3.11821E-04	0.0000
157	0.0000	0.0000	-3.18340E-03	-3.39049E-03	-3.53645E-04	0.0000
158	0.0000	0.0000	-3.69142E-03	-3.37299E-03	-3.88664E-04	0.0000
159	0.0000	0.0000	-4.19407E-03	-3.32214E-03	-4.16544E-04	0.0000
160	0.0000	0.0000	-4.68731E-03	-3.25024E-03	-4.37660E-04	0.0000
161	0.0000	0.0000	-5.16882E-03	-3.16841E-03	-4.52830E-04	0.0000
162	0.0000	0.0000	-5.63790E-03	-3.08689E-03	-4.63153E-04	0.0000
163	0.0000	0.0000	-6.09533E-03	-3.01535E-03	-4.69924E-04	0.0000
164	0.0000	0.0000	-6.54331E-03	-2.96321E-03	-4.74609E-04	0.0000
165	0.0000	0.0000	-6.98546E-03	-2.93986E-03	-4.78890E-04	0.0000
166	0.0000	0.0000	-7.42680E-03	-2.95498E-03	-4.84737E-04	0.0000
167	0.0000	0.0000	-7.87388E-03	-3.01882E-03	-4.94739E-04	0.0000
168	0.0000	0.0000	-8.33480E-03	-3.14248E-03	-5.10932E-04	0.0000
169	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
170	0.0000	0.0000	-6.02448E-05	-7.69413E-04	-2.51420E-05	0.0000
171	0.0000	0.0000	-2.25848E-04	-1.40880E-03	-7.62579E-05	0.0000
172	0.0000	0.0000	-4.78497E-04	-1.93346E-03	-1.53442E-04	0.0000
173	0.0000	0.0000	-8.02010E-04	-2.35644E-03	-2.49549E-04	0.0000
174	0.0000	0.0000	-1.18196E-03	-2.68815E-03	-3.59801E-04	0.0000
175	0.0000	0.0000	-1.60530E-03	-2.93656E-03	-4.79856E-04	0.0000
176	0.0000	0.0000	-2.06000E-03	-3.10740E-03	-6.05231E-04	0.0000
177	0.0000	0.0000	-2.53486E-03	-3.20768E-03	-7.30756E-04	0.0000
178	0.0000	0.0000	-3.02009E-03	-3.24912E-03	-8.51891E-04	0.0000
179	0.0000	0.0000	-3.50790E-03	-3.24521E-03	-9.66073E-04	0.0000
180	0.0000	0.0000	-3.99243E-03	-3.20817E-03	-1.07228E-03	0.0000
181	0.0000	0.0000	-4.46957E-03	-3.14918E-03	-1.17048E-03	0.0000
182	0.0000	0.0000	-4.93679E-03	-3.07857E-03	-1.26128E-03	0.0000
183	0.0000	0.0000	-5.39312E-03	-3.00605E-03	-1.34575E-03	0.0000
184	0.0000	0.0000	-5.83894E-03	-2.94085E-03	-1.42530E-03	0.0000
185	0.0000	0.0000	-6.27605E-03	-2.89192E-03	-1.50168E-03	0.0000
186	0.0000	0.0000	-6.70754E-03	-2.86805E-03	-1.57704E-03	0.0000
187	0.0000	0.0000	-7.13782E-03	-2.87807E-03	-1.65396E-03	0.0000
188	0.0000	0.0000	-7.57266E-03	-2.93099E-03	-1.73593E-03	0.0000
189	0.0000	0.0000	-8.01918E-03	-3.03612E-03	-1.82570E-03	0.0000
190	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
191	0.0000	0.0000	-5.38780E-05	-6.89485E-04	-3.41619E-05	0.0000
192	0.0000	0.0000	-2.02548E-04	-1.26686E-03	-1.04887E-04	0.0000
193	0.0000	0.0000	-4.30088E-04	-1.74371E-03	-2.12987E-04	0.0000
194	0.0000	0.0000	-7.22221E-04	-2.13037E-03	-3.48831E-04	0.0000
195	0.0000	0.0000	-1.06609E-03	-2.43545E-03	-5.05590E-04	0.0000
196	0.0000	0.0000	-1.45004E-03	-2.66620E-03	-6.77032E-04	0.0000
197	0.0000	0.0000	-1.86339E-03	-2.82919E-03	-8.57284E-04	0.0000
198	0.0000	0.0000	-2.29650E-03	-2.93161E-03	-1.04056E-03	0.0000
199	0.0000	0.0000	-2.74092E-03	-2.98231E-03	-1.22196E-03	0.0000
200	0.0000	0.0000	-3.18963E-03	-2.99118E-03	-1.39827E-03	0.0000
201	0.0000	0.0000	-3.63709E-03	-2.96819E-03	-1.56775E-03	0.0000

202	0.0000	0.0000	-4.07928E-03	-2.92304E-03	-1.72981E-03	0.0000
203	0.0000	0.0000	-4.51356E-03	-2.86499E-03	-1.88464E-03	0.0000
204	0.0000	0.0000	-4.93867E-03	-2.80294E-03	-2.03306E-03	0.0000
205	0.0000	0.0000	-5.35466E-03	-2.74541E-03	-2.17637E-03	0.0000
206	0.0000	0.0000	-5.76283E-03	-2.70065E-03	-2.31632E-03	0.0000
207	0.0000	0.0000	-6.16570E-03	-2.67666E-03	-2.45511E-03	0.0000

## D I S P L A C E M E N T S

NODE	X-DISPL.	Y-DISPL.	Z-DISPL.	XX-ROT.	YY-ROT.	ZZ-ROT.
208	0.0000	0.0000	-6.56697E-03	-2.68122E-03	-2.59545E-03	0.0000
209	0.0000	0.0000	-6.97150E-03	-2.72187E-03	-2.74099E-03	0.0000
210	0.0000	0.0000	-7.38525E-03	-2.80593E-03	-2.89459E-03	0.0000
211	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
212	0.0000	0.0000	-4.59235E-05	-5.88802E-04	-4.03636E-05	0.0000
213	0.0000	0.0000	-1.73120E-04	-1.08582E-03	-1.24944E-04	0.0000
214	0.0000	0.0000	-3.68492E-04	-1.49980E-03	-2.55022E-04	0.0000
215	0.0000	0.0000	-6.20192E-04	-1.83861E-03	-4.18999E-04	0.0000
216	0.0000	0.0000	-9.17465E-04	-2.10895E-03	-6.08330E-04	0.0000
217	0.0000	0.0000	-1.25049E-03	-2.31668E-03	-8.15346E-04	0.0000
218	0.0000	0.0000	-1.61030E-03	-2.46740E-03	-1.03341E-03	0.0000
219	0.0000	0.0000	-1.98877E-03	-2.56699E-03	-1.25686E-03	0.0000
220	0.0000	0.0000	-2.37871E-03	-2.62204E-03	-1.48116E-03	0.0000
221	0.0000	0.0000	-2.77398E-03	-2.63987E-03	-1.70301E-03	0.0000
222	0.0000	0.0000	-3.16957E-03	-2.62822E-03	-1.92032E-03	0.0000
223	0.0000	0.0000	-3.56165E-03	-2.59505E-03	-2.13208E-03	0.0000
224	0.0000	0.0000	-3.94759E-03	-2.54832E-03	-2.33811E-03	0.0000
225	0.0000	0.0000	-4.32596E-03	-2.49589E-03	-2.53895E-03	0.0000
226	0.0000	0.0000	-4.69648E-03	-2.44547E-03	-2.73563E-03	0.0000
227	0.0000	0.0000	-5.06001E-03	-2.40452E-03	-2.92967E-03	0.0000
228	0.0000	0.0000	-5.41851E-03	-2.38018E-03	-3.12303E-03	0.0000
229	0.0000	0.0000	-5.77501E-03	-2.37924E-03	-3.31814E-03	0.0000
230	0.0000	0.0000	-6.13347E-03	-2.40798E-03	-3.51815E-03	0.0000
231	0.0000	0.0000	-6.49881E-03	-2.47206E-03	-3.72556E-03	0.0000
232	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
233	0.0000	0.0000	-3.68426E-05	-4.73176E-04	-4.50997E-05	0.0000
234	0.0000	0.0000	-1.39278E-04	-8.76457E-04	-1.40289E-04	0.0000
235	0.0000	0.0000	-2.97385E-04	-1.21700E-03	-2.86819E-04	0.0000
236	0.0000	0.0000	-5.02203E-04	-1.50047E-03	-4.71204E-04	0.0000
237	0.0000	0.0000	-7.45511E-04	-1.73111E-03	-6.83475E-04	0.0000
238	0.0000	0.0000	-1.01965E-03	-1.91239E-03	-9.15051E-04	0.0000
239	0.0000	0.0000	-1.31747E-03	-2.04765E-03	-1.15900E-03	0.0000
240	0.0000	0.0000	-1.63233E-03	-2.14063E-03	-1.40984E-03	0.0000
241	0.0000	0.0000	-1.95821E-03	-2.19575E-03	-1.66342E-03	0.0000
242	0.0000	0.0000	-2.28981E-03	-2.21818E-03	-1.91678E-03	0.0000
243	0.0000	0.0000	-2.62265E-03	-2.21377E-03	-2.16800E-03	0.0000
244	0.0000	0.0000	-2.95318E-03	-2.18889E-03	-2.41609E-03	0.0000
245	0.0000	0.0000	-3.27881E-03	-2.15022E-03	-2.66079E-03	0.0000
246	0.0000	0.0000	-3.59801E-03	-2.10462E-03	-2.90244E-03	0.0000
247	0.0000	0.0000	-3.91023E-03	-2.05895E-03	-3.14187E-03	0.0000

248	0.0000	0.0000	-4.21598E-03	-2.01996E-03	-3.38028E-03	0.0000
249	0.0000	0.0000	-4.51676E-03	-1.99411E-03	-3.61924E-03	0.0000
250	0.0000	0.0000	-4.81499E-03	-1.98740E-03	-3.86061E-03	0.0000
251	0.0000	0.0000	-5.11396E-03	-2.00524E-03	-4.10677E-03	0.0000
252	0.0000	0.0000	-5.41773E-03	-2.05229E-03	-4.35958E-03	0.0000
253	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
254	0.0000	0.0000	-2.67308E-05	-3.44073E-04	-5.03269E-05	0.0000
255	0.0000	0.0000	-1.01525E-04	-6.43058E-04	-1.56301E-04	0.0000
256	0.0000	0.0000	-2.18202E-04	-9.03612E-04	-3.17717E-04	0.0000
257	0.0000	0.0000	-3.71256E-04	-1.12846E-03	-5.18332E-04	0.0000
258	0.0000	0.0000	-5.55390E-04	-1.31799E-03	-7.46789E-04	0.0000
259	0.0000	0.0000	-7.65288E-04	-1.47195E-03	-9.94094E-04	0.0000

### DISPLACEMENTS

NODE	X-DISPL.	Y-DISPL.	Z-DISPL.	XX-ROT.	YY-ROT.	ZZ-ROT.
260	0.0000	0.0000	-9.95614E-04	-1.59047E-03	-1.25361E-03	0.0000
261	0.0000	0.0000	-1.24111E-03	-1.67461E-03	-1.52052E-03	0.0000
262	0.0000	0.0000	-1.49676E-03	-1.72656E-03	-1.79138E-03	0.0000
263	0.0000	0.0000	-1.75797E-03	-1.74960E-03	-2.06390E-03	0.0000
264	0.0000	0.0000	-2.02070E-03	-1.74800E-03	-2.33662E-03	0.0000
265	0.0000	0.0000	-2.28163E-03	-1.72680E-03	-2.60887E-03	0.0000
266	0.0000	0.0000	-2.53822E-03	-1.69161E-03	-2.88054E-03	0.0000
267	0.0000	0.0000	-2.78882E-03	-1.64846E-03	-3.15200E-03	0.0000
268	0.0000	0.0000	-3.03271E-03	-1.60357E-03	-3.42398E-03	0.0000
269	0.0000	0.0000	-3.27009E-03	-1.56316E-03	-3.69747E-03	0.0000
270	0.0000	0.0000	-3.50209E-03	-1.53329E-03	-3.97362E-03	0.0000
271	0.0000	0.0000	-3.73073E-03	-1.51956E-03	-4.25368E-03	0.0000
272	0.0000	0.0000	-3.95880E-03	-1.52686E-03	-4.53912E-03	0.0000
273	0.0000	0.0000	-4.18979E-03	-1.55919E-03	-4.83104E-03	0.0000
274	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
275	0.0000	0.0000	-1.51121E-05	-1.96484E-04	-5.93568E-05	0.0000
276	0.0000	0.0000	-5.86686E-05	-3.82622E-04	-1.80491E-04	0.0000
277	0.0000	0.0000	-1.29680E-04	-5.62390E-04	-3.58398E-04	0.0000
278	0.0000	0.0000	-2.26976E-04	-7.31529E-04	-5.72259E-04	0.0000
279	0.0000	0.0000	-3.48468E-04	-8.83416E-04	-8.10315E-04	0.0000
280	0.0000	0.0000	-4.91112E-04	-1.01240E-03	-1.06454E-03	0.0000
281	0.0000	0.0000	-6.51160E-04	-1.11481E-03	-1.32963E-03	0.0000
282	0.0000	0.0000	-8.24466E-04	-1.18901E-03	-1.60198E-03	0.0000
283	0.0000	0.0000	-1.00678E-03	-1.23520E-03	-1.87922E-03	0.0000
284	0.0000	0.0000	-1.19401E-03	-1.25511E-03	-2.15982E-03	0.0000
285	0.0000	0.0000	-1.38242E-03	-1.25176E-03	-2.44297E-03	0.0000
286	0.0000	0.0000	-1.56880E-03	-1.22914E-03	-2.72838E-03	0.0000
287	0.0000	0.0000	-1.75061E-03	-1.19204E-03	-3.01627E-03	0.0000
288	0.0000	0.0000	-1.92607E-03	-1.14583E-03	-3.30719E-03	0.0000
289	0.0000	0.0000	-2.09425E-03	-1.09627E-03	-3.60199E-03	0.0000
290	0.0000	0.0000	-2.25507E-03	-1.04937E-03	-3.90166E-03	0.0000
291	0.0000	0.0000	-2.40941E-03	-1.01115E-03	-4.20721E-03	0.0000
292	0.0000	0.0000	-2.55899E-03	-9.87333E-04	-4.51940E-03	0.0000
293	0.0000	0.0000	-2.70638E-03	-9.82919E-04	-4.83882E-03	0.0000

294	0.0000	0.0000	-2.85479E-03	-1.00155E-03	-5.16555E-03	0.0000
295	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
296	0.0000	0.0000	-8.59882E-08	-1.49537E-05	-8.26306E-05	0.0000
297	0.0000	0.0000	-6.94957E-06	-8.78589E-05	-2.23685E-04	0.0000
298	0.0000	0.0000	-2.79120E-05	-1.97318E-04	-4.15422E-04	0.0000
299	0.0000	0.0000	-6.67133E-05	-3.21062E-04	-6.35967E-04	0.0000
300	0.0000	0.0000	-1.24146E-04	-4.42494E-04	-8.75417E-04	0.0000
301	0.0000	0.0000	-1.98943E-04	-5.50469E-04	-1.12786E-03	0.0000
302	0.0000	0.0000	-2.88499E-04	-6.38062E-04	-1.38972E-03	0.0000
303	0.0000	0.0000	-3.89428E-04	-7.01536E-04	-1.65872E-03	0.0000
304	0.0000	0.0000	-4.97976E-04	-7.39591E-04	-1.93345E-03	0.0000
305	0.0000	0.0000	-6.10345E-04	-7.52815E-04	-2.21312E-03	0.0000
306	0.0000	0.0000	-7.22941E-04	-7.43268E-04	-2.49745E-03	0.0000
307	0.0000	0.0000	-8.32570E-04	-7.14162E-04	-2.78658E-03	0.0000
308	0.0000	0.0000	-9.36594E-04	-6.69609E-04	-3.08102E-03	0.0000
309	0.0000	0.0000	-1.03304E-03	-6.14418E-04	-3.38161E-03	0.0000
310	0.0000	0.0000	-1.12072E-03	-5.53941E-04	-3.68944E-03	0.0000
311	0.0000	0.0000	-1.19925E-03	-4.93983E-04	-4.00585E-03	0.0000

#### DISPLACEMENTS

NODE	X-DISPL.	Y-DISPL.	Z-DISPL.	XX-ROT.	YY-ROT.	ZZ-ROT.
312	0.0000	0.0000	-1.26917E-03	-4.40754E-04	-4.33221E-03	0.0000
313	0.0000	0.0000	-1.33199E-03	-4.00814E-04	-4.66970E-03	0.0000
314	0.0000	0.0000	-1.39018E-03	-3.80587E-04	-5.01881E-03	0.0000
315	0.0000	0.0000	-1.44712E-03	-3.84072E-04	-5.37727E-03	0.0000
316	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
317	0.0000	0.0000	2.07214E-05	2.07810E-04	-8.86964E-05	0.0000
318	0.0000	0.0000	5.63724E-05	2.36756E-04	-2.54020E-04	0.0000
319	0.0000	0.0000	8.87713E-05	1.81523E-04	-4.60199E-04	0.0000
320	0.0000	0.0000	1.09613E-04	9.14393E-05	-6.85682E-04	0.0000
321	0.0000	0.0000	1.15953E-04	-6.86379E-06	-9.23900E-04	0.0000
322	0.0000	0.0000	1.07882E-04	-9.77560E-05	-1.17147E-03	0.0000
323	0.0000	0.0000	8.72970E-05	-1.71973E-04	-1.42653E-03	0.0000
324	0.0000	0.0000	5.71507E-05	-2.24333E-04	-1.68801E-03	0.0000
325	0.0000	0.0000	2.09401E-05	-2.52507E-04	-1.95538E-03	0.0000
326	0.0000	0.0000	-1.76565E-05	-2.56263E-04	-2.22850E-03	0.0000
327	0.0000	0.0000	-5.50533E-05	-2.36970E-04	-2.50757E-03	0.0000
328	0.0000	0.0000	-8.79684E-05	-1.97223E-04	-2.79314E-03	0.0000
329	0.0000	0.0000	-1.13585E-04	-1.40577E-04	-3.08600E-03	0.0000
330	0.0000	0.0000	-1.29678E-04	-7.13260E-05	-3.38724E-03	0.0000
331	0.0000	0.0000	-1.34713E-04	5.65172E-06	-3.69823E-03	0.0000
332	0.0000	0.0000	-1.27927E-04	8.49789E-05	-4.02060E-03	0.0000
333	0.0000	0.0000	-1.09399E-04	1.60732E-04	-4.35627E-03	0.0000
334	0.0000	0.0000	-8.01572E-05	2.26047E-04	-4.70726E-03	0.0000
335	0.0000	0.0000	-4.23824E-05	2.71713E-04	-5.07472E-03	0.0000
336	0.0000	0.0000	0.0000	2.81502E-04	-5.45406E-03	0.0000

#### MINIMUM/MAXIMUM DISPLACEMENTS

NODE	1	1	168	157	336	1
MIN.	0.0000	0.0000	-8.33480E-03	-3.39049E-03	-5.45406E-03	0.0000

NODE	336	336	321	336	21	336
MAX.	0.0000	0.0000	1.15953E-04	2.81502E-04	7.84847E-03	0.0000

MAXIMUM RESULTANT DISPLACEMENT

NODE	168
MAX.	8.33480E-03

REACTION FORCE FOR LOAD CASE NO. 1

NODE	CSYS	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
1	0	0.000	0.000	-1.538	-.1661E-01	-.6855E-01	0.000
2	0	-----	-----	-3.521	-----	-----	-----
3	0	-----	-----	-2.631	-----	-----	-----
4	0	-----	-----	-2.008	-----	-----	-----
5	0	-----	-----	-1.359	-----	-----	-----
6	0	-----	-----	-.7470	-----	-----	-----
7	0	-----	-----	-.1012	-----	-----	-----
8	0	-----	-----	0.7989	-----	-----	-----
9	0	-----	-----	1.652	-----	-----	-----
10	0	-----	-----	2.153	-----	-----	-----
11	0	-----	-----	2.521	-----	-----	-----
12	0	-----	-----	2.796	-----	-----	-----
13	0	-----	-----	2.995	-----	-----	-----
14	0	-----	-----	3.131	-----	-----	-----
15	0	-----	-----	3.210	-----	-----	-----
16	0	-----	-----	3.237	-----	-----	-----
17	0	-----	-----	3.217	-----	-----	-----
18	0	-----	-----	3.122	-----	-----	-----
19	0	-----	-----	3.174	-----	-----	-----
20	0	-----	-----	1.756	-----	-----	-----
21	0	-----	-----	14.49	-----	-----	-----
22	0	0.000	0.000	1.665	1.142	-.1314	0.000
43	0	0.000	0.000	3.139	2.188	-.1152	0.000
64	0	0.000	0.000	4.288	3.056	-.9084E-01	0.000
85	0	0.000	0.000	5.051	3.699	-.6236E-01	0.000
106	0	0.000	0.000	5.416	4.094	-.3260E-01	0.000
127	0	0.000	0.000	5.408	4.240	-.3957E-02	0.000
148	0	0.000	0.000	5.080	4.159	0.2136E-01	0.000
169	0	0.000	0.000	4.517	3.886	0.4161E-01	0.000
190	0	0.000	0.000	3.825	3.468	0.5619E-01	0.000
211	0	0.000	0.000	3.098	2.951	0.6606E-01	0.000
232	0	0.000	0.000	2.395	2.363	0.7349E-01	0.000
253	0	0.000	0.000	1.708	1.711	0.8155E-01	0.000
274	0	0.000	0.000	0.9129	0.9526	0.9274E-01	0.000

295	0	0.000	0.000	-1.502	-7.399E-01	0.1419	0.000
316	0	0.000	0.000	-5.741	-8.014	0.1429E-01	0.000
336	0	-----	-----	11.59	-----	-----	-----

FOR REQUESTED (Global Cartesian Coord. System)  
 NODES FX FY FZ MX MY MZ  
 Total React. 0.0000E+00 0.0000E+00 0.8720E+02 0.3702E+02 0.8430E-01 0.0000E+00

TOTAL STRAIN ENERGY..... = 0.168380E+00

MAXIMUM NODAL VON MISES STRESS

NODE 126  
 MAX. 9080.8

ERROR ESTIMATION  
 (for requested elements)

Total Strain Energy (TSE) = 0.168380E+00  
 Total Error Energy (TEE) = 0.175070E-03  
 Ave. Percentage Error (APE) = 0.227947E+01  
 ( APE = sqrt (TEE/(TSE\*2. + TEE)) \* 100. )

MFLOP Rate of Matrix Decomposition . . . . . (MF/Sec)= 106.0

SOLUTION TIME LOG IN SEC  
 FOR PROBLEM

TIME FOR INPUT PHASE . . . . . = 0  
 TIME FOR CALCULATION OF STRUCTURE STIFFNESS MATRIX= 0  
 TIME FOR DECOMPOSITION OF STIFFNESS MATRIX ... = 0  
 TIME FOR LOAD CASE SOLUTIONS . . . . . = 0  
 TOTAL SOLUTION TIME . . . . . = 0  
 ( 0:0:0)

Olingan grafik va sonli natijalar bir biriga mos bo'lib, grafik natijalardan plastinkaning istalgan nuqtasidagi jarayonni kuzatish imkoniyati mavjud. Sonli natijalar esa plastinkaga ta'sir etayotgan kuch ta'sirida unda sodir bo'layotgan siljish va egilishlarni aks ettirishga imkon yaratgan.

## **Xulosa .**

Dissertatsiya ishida qo'yilgan masalani yechish uchun qattiq jismlar mexanikasi kursidan xabardor bo'lish, kompyuter texnikasi bilan ishlash malakasiga ega bo'lishlik talab etiladi. Shu maqsadda ishni bajarish davomida qattiq jismlar mexanikasining bir qator tushunchalarini ish tarkibiga kiritildi. Bulardan tashqari ishninig bajarilishi bo'yicha quyidagilarni ta'kidlash lozim.

1. Elastiklik nazariyasi masalalarining qo'yilishi batafsil o'rganib chiqildi va yoritildi.
2. Ayrim elastic anizotrop materiallar haqida ishning birinchi bobida tushunchalar keltirildi.
3. Elastiklik nazariyasining masalalarining qo'yilishi hamda variatsion prinsiplar o'rganildi.
4. Umumlashgan defoematsiya va kuchlanish holatlari ishning ikkinchi bobida bayon etildi.
5. To'g'ri to'rtburchakli anizotrop plastinkaning cho'zilish va egilish momentlari batafsil tahlil etildi.
6. Ishda egiluvchan izotrop va anizotrop plastinka masalalari uchun qurilgan programmaviy vositadan foydalanib sonli va grafik natijalar olindi.
7. Olingan sonli va grafik natijalar tahlil qilindi.

Ushbu ishda o'rganilgan klassik shaklli egiluvchan anizotrop plastinkaning kuchlanish – deformatsion holatini o'rganish masalasi arxitektura, mashinasozlik, yo'l qurilish sohalariga tadbiq etish o'zining ijobiy natijalarini beradi deb hisoblaymiz.

## Фойдаланилган адабиётлар руйхати

1. Александров А.В, Потапов В.Д. Основы теории упругости и пластичности. - М.: Высшая школа, 1990. – 405 с.
2. Амбарцумян С. А. Теория анизотропных пластин. – М.: Наука, 1987. – 360 с.
3. Белоцерковский О.М. Численное моделирование в механике сплошных сред. – М.: Наука, 1994. – 442 с.
4. Биркган А.Ю., Вольмир А.С. Исследование больших прогибов прямоугольной пластинки при помощи цифровых электронных машин // ОТН. Механика и машиностроение. – Москва, 1959. - N2. -С.47-56.
5. Буриев Т. Расчет тонких плит на ЭВМ.- Ташкент: Фан, 1976.-171 с.
6. Вабищевич П.Н. Численное моделирование. – М.: Изд-во МГУ, 1993. – 152 с.
7. Васильев В.В. Нелинейный анализ больших прогибов тонкой пластины. –М.: Наука, 1975. -272 с.
8. Власов Б.Ф. Об уравнениях теории изгиба пластинок // ОТН. – Москва, 1957. - N 12. – С.41-47.
9. Войцеховский С. А., Новиченко В.Н. Метод фиктивных областей для задачи изгиба анизотропных пластинок // Вычислительная и прикладная математика. – Киев, 1987. - N63. - С.57-63.
10. Вольмира А.С. Теория гибких круглых пластин: Пер. с кит. - М.: ИЛ, 1957. -247 с.
11. Галимов К.З. К вариационным методам решения задач нелинейной теории пластин и оболочек // Изв. АН Казанск.фил.СССР. Сер.физ.-мат.и техн. наук. –Казань, 1956. - N10. - С.27-38.
12. Галисеев Г.В.Компоненты в Delphi 7: Профессиональная работа. -М.: Диалектика, 2004. -619 с.
13. Годунов С.К., Рябенкий В.С. Разностные схемы (введение в теорию). – М.: Наука, 1977. – 440 с.
14. Гольденблат И.И. Нелинейные проблемы теории упругости. -М.:Наука, 1969. -371 с.
15. Дарахвелидзе П., Марков Е. Delphi 7 среда визуального программирования. - СПб.:БХБ-Санкт-Петербург, 2006. – 516 с.
16. Кабулов В.К. Алгоритмизация в механике сплошных сред. - Ташкент: Фан, 1979. – 391 с.

17. Кабулов В.К., Файзуллаев О., Назиров Ш.А. Ал-Хоразмий, Алгоритм, Алгоритмизация. – Ташкент: Фан, 2006. – 672 с.
18. Кабулов В.К. Алгоритмизация в теории упругости и деформационной теории пластичности.- Ташкент: Фан, 1966. – 394 с.
19. Киракосян Р.М. Уточненная теория цилиндрически анизотропных пластин переменной толщины // Докл.АН Арм.ССР. –Ереван, 1990. - 90. - N 4. - С.151-155.
20. Колтунов М.А. Изгиб прямоугольных пластин с учетом больших прогибов // Инж. сб, - М., 1952.- Т.ХІІІ. - С.72-80.
21. Корнишин М.С. Нелинейная задача теории пластин и пологих оболочек и методы их решения. - М: Наука, 1964. – 192 с.
22. Корнишин М.С., Исонбаев Ф.С. Гибкие пластины и панели. - М.: Наука, 1969. – 260 с.
23. Корнишин М.С., Касимова Д.А. Об одном способе решения систем нелинейных конечно-разностных уравнений изгиба пластин // Труды конференции по теории пластин и оболочек. Октябрь, 1960. - Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 1961.-С.55-62.
24. Краснощеков П.С., Петров А.А. Принципы построения моделей. – М.: Изд-во МГУ, 1983. – 264 с.
25. Лейбензон Л.С. Вариационные методы решения задач теории упругости.- М.: Гостехиздат, 1943. – 307 с.
26. Лехницкий С.Г. Анизотропные пластинки. - М. –Л.: Гостехтеориздат, 1947. – 355 с.
27. Максименко В.Н., Подружин Е.Г. Задача изгиба анизотропных консольных пластин // Динамика и прочность элементов авиационных конструкций. –Москва, 1987. - С. 102-107.
28. Марченко А.И., Марченко Л.А. Программирование в среде Turbo Pascal 7.0. - К.:ВЕК+. - М.: Бином универсал, 1998. – 496 с.
29. Мелконян А.П., Хачатрян А.А. Об устойчивости прямоугольных трансверсально изотропных пластин // Прикладная механика. –Москва, 1966. Т. 2, вып. 2.
30. Метсавеэр Я.А. Нелинейные колебания прямоугольных пластин с жестким защемлением по контуру // Труды Таллинского политехн. инс-та. –Таллин, 1967. – N257. –С. 27-32.
31. Михлин С.Г. Вариационные методы в математической физике. - М.: Физматгиз, 1966. – 512 с.
32. Михлин С.Г. Численная реализация вариационных методов. - М.: Наука, 1966. – 512 с.
33. Муштари Х.М. Полунелинейная теория среднего изгиба пластин и оболочек // Доклад на X международном конгрессе по прикладной механике. Москва, 1960. -С. 17-21.

34. Новожилов В.В. Теория упругости. – Л.: Судопромгиз, 1958. -370 с.
35. Новожилов В.В. Основы нелинейной теории упругости. -М.: Гостехиздат, 1948.-211с.
36. Огибалов П.М., Колтунов М.А. Оболочки и пластины. - М.: Изд-во Гос.ун-та, 1969. - 696 с.
37. Победря Б.Е. Численные методы в теории упругости и пластичности. -М.: Изд-во МГУ, 1981. -570 с.