


UO‘K: 621:018

 10.70769/3030-3214.SRT.4.2.2026.12

© 2026 Authors. Licensed under CC BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

BESH O‘QLI RDB TIZIMIDAGI ISSIQLIK YUKLAMALARI VA DEFORMATSIYALARNI HISOBGA OLGAN HOLDA AYLANUVCHI O‘Q KORPUSINING TERMOMEKANIK TAHLILI



**Ataullayev Azizjon
Odilovich**

PhD, dotsent, Navoiy davlat
konchilik va texnologiyalar
universiteti, Navoiy, O‘zbekiston
E-mail: aziz-217@mail.ru
ORCID ID: 0009-0001-2761-8850
Science ID: FNV-1225-0023



**Jo‘rayev Nodirbek
Normurodovich**

PhD, dotsent, Navoiy davlat
konchilik va texnologiyalar
universiteti, Navoiy, O‘zbekiston
E-mail: Nodirjura@mail.ru
ORCID ID: 0009-0004-5149-5901
Science ID: FSN-1225-0073



**Egamberdiyev Ilhom
Pulatovich**

DSc, professor, Navoiy davlat
konchilik va texnologiyalar
universiteti, Navoiy, O‘zbekiston
E-mail: ilhom1977@mail.ru
ORCID ID: 0000-0002-7549-2156



**Yaxshiyev Sherali
Namozovich**

DSc, professor, Navoiy davlat
konchilik va texnologiyalar
universiteti, Navoiy, O‘zbekiston
E-mail:
sheraliyaxshiyev1978@mail.ru
ORCID ID: 0000-0003-3259-9735
Science ID: DBX-0326-0026

Annotatsiya. Ushbu maqolada besh koordinatali RDB dastgohining burilish uzeli termomekanik holatining sonli tadqiqoti keltirilgan. Chekli elementlar usulidan foydalangan holda issiqlik maydonlari va korpusning yuzaga keladigan deformatsiyalarining bog‘liq tahlili amalga oshirildi. Maksimal qizish zonalari va ularning fazoviy siljishlar kattaligiga ta’siri aniqlandi. Olingan natijalar aylanish o‘qi pozitsion xatoligining shakllanishida issiqlik omillarining hissasini baholash imkonini beradi..

Kalit so‘zlar: RDB, burilish o‘qi, termik deformatsiya, ChEU, termik tahlil, strukturaviy tahlil.

Received: 10.05.2026

Accepted: 05.06.2026

Published: 29.06.2026

ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КОРПУСА ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ОСИ С УЧЕТОМ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК И СТРУКТУРНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ В ПЯТИОСЕВОЙ СИСТЕМЕ ЧПУ

**Атауллаев Азизжон
Одирович**

Навоийский государственный
университет горного дела и
технологий, доктор философии
(PhD) по техническим наукам,
доцент, Навои, Узбекистан

**Жураев Нодирбек
Нормуродович**

Навоийский государственный
университет горного дела и
технологий, доктор философии
(PhD) по техническим наукам,
доцент, Навои, Узбекистан

**Эгамбердиев Илхом
Пулотович**

Навоийский государственный
университет горного дела и
технологий, доктор технических
наук (DSc), профессор, Навои,
Узбекистан

**Яхшиев Шерали
Намозович**

Навоийский государственный
университет горного дела и
технологий, доктор технических
наук (DSc), профессор, Навои,
Узбекистан

Аннотация. В статье представлено численное исследование термомеханического состояния поворотного узла пятикоординатного станка с ЧПУ. С использованием метода конечных элементов выполнен связанный анализ тепловых полей и возникающих деформаций корпуса. Установлены зоны максимального нагрева и их влияние на величину пространственных смещений. Полученные результаты позволяют оценить вклад тепловых факторов в формирование позиционной погрешности вращательной оси.

Ключевые слова: ЧПУ, поворотная ось, термическая деформация, МКЭ, переходный термический анализ, структурный анализ.

THERMOMECHANICAL ANALYSIS OF A ROTATING AXIS HOUSING TAKING INTO ACCOUNT THERMAL LOADS AND STRUCTURAL DEFORMATIONS IN A FIVE-AXIS CNC SYSTEM

**Ataullaev Azizjon
Odilovich**

Navoi State University of Mining
and Technologies, PhD in
Technical Sciences, Associate
Professor, Navoi, Uzbekistan

**Juraev Nodirbek
Normurodovich**

Navoi State University of Mining
and Technologies, PhD in
Technical Sciences, Associate
Professor, Navoi, Uzbekistan

**Egamberdiev Ilkhom
Pulatovich**

Navoi State University of Mining
and Technologies, Doctor of
Technical Sciences (DSc),
Professor, Navoi, Uzbekistan

**Yakhshiev Sherali
Namozovich**

Navoi State University of Mining
and Technologies, Doctor of
Technical Sciences (DSc),
Professor, Navoi, Uzbekistan

Abstract. *This article presents a numerical study of the thermomechanical state of the rotary unit of a five-axis CNC machine. Using the finite element method, a coupled analysis of thermal fields and the resulting housing deformations was performed. Zones of maximum heating and their influence on the magnitude of spatial displacements were identified. The obtained results allow us to estimate the contribution of thermal factors to the positional error of the rotary axis.*

Keywords: *CNC, rotary axis, thermal deformation, FEM, transient thermal analysis, structural analysis.*

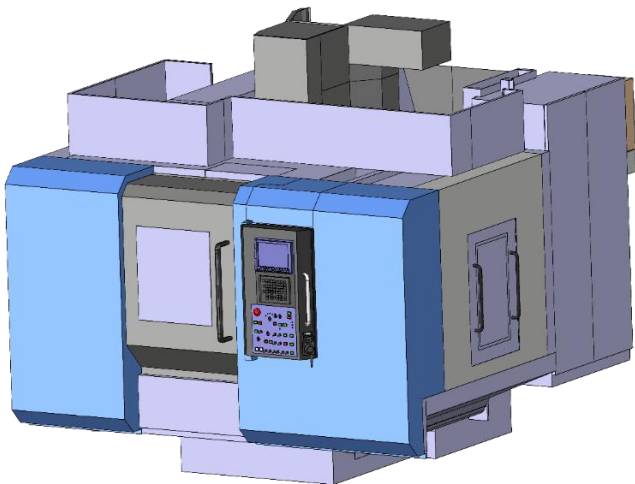
Kirish. Besh o'qli RDB dastgohlarda aylanish o'qlarini (A, B, C turidagi) pozitsiyalash aniqligi asosan yuk ko'taruvchi tizimning issiqlik deformatsiyalari bilan cheklanadi. ISO 230-7:2015 standartiga ko'ra, pretsizion ishlov berish uchun ruxsat etilgan xatolik 10-15 burchak sekundini tashkil etadi, biroq issiqlik effektlari umumiy xatolikka 40-70% hissa qo'shadi [1, 2]. Aylanma tugunlardagi asosiy issiqlik manbalari dumalash podshipniklari (issiqlik oqimlari 2000–5000 Vt/m²) va to'g'ri uzatmali momentli dvigatellar (hajmiy issiqlik ajralishi) hisoblanadi. Gibson va Stein [3] shuni ko'rsatdiki, podshipniklarning dastlabki tarangligini termoinduktivlangan tarzda o'zgartirish issiqlik ajralishini 30-50% ga oshirishi mumkin. Mayr va boshqalar [4] fundamental sharhda dastgohlarning issiqlik xatoliklarini tizimlashtirib, gradiyent maydonlarining muhim rolini ta'kidladilar. Ibaraki va Knapp [5] R-test yordamida geometrik va issiqlik xatoliklarini ajratish usulini taklif etishdi. Gebhardt va boshqalar [6] xatolikni 40-50% ga kamaytiradigan "kulrang" kompensatsiya modelini ishlab chiqdilar. ETH Zürich'dagi Zimmermann, Mayr va Wegener [7] ikkita stanokda hajmiy issiqlik xatolarini 76-84 mkm dan 20-33 mkm gacha (61-74% ga), impellerlarga ishlov berishda esa profil xatosini 32 dan 9 mkm gacha kamaytiradigan o'z-o'zini o'rganuvchi termokompensatsiya tizimini (CIRP,

2023) taqdim etdilar. Li va boshqalar [8] shpin-delning integrallashgan termomekanik modelini ishlab chiqdilar. Bryan [9] va Ramesh et al. [10] klassik sharhlarda korpus detallaridagi odatiy harorat o'zgarishlari 20-50 °C ni, aylanish o'qlarining issiqlik deformatsiyalari esa 20-50 mkm ni tashkil etishini ko'rsatgan. Mavjud tadqiqotlar aylanma tugunlarning issiqlik deformatsiyalarining o'q simmetriyasini ta'kidlaydi, ammo haqiqiy korpuslar asimmetrikdir (texnologik oynalar, dvigatelning siljishi). Adabiyotlarda deformatsiyalar anizotropiyasini miqdoriy baholash mavjud emas. Ushbu ishning maqsadi issiqlik jarayonlarini modellashtirish, harorat taqsimotini aniqlash, yuzaga keladigan deformatsiyalarni tahlil qilish, harorat maydonlarining tugun aniqligiga ta'sirini baholashdan iborat.

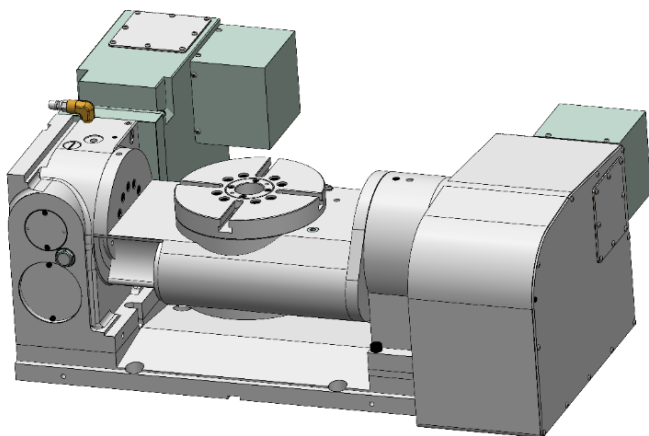
Adabiyotlar tahlili va metodlar.

Tadqiqotning obyektini sifatida besh koordinatali RDB frezalash dastgohining burish uzeli tanlangan. Konstruktiv jihatdan uzal kulrang cho'yandan quyma korpus, o'tqazish yuzasining diametri 300 mm bo'lgan buriluvchi stol, dumalash podshipnikli tayanchlari, shuningdek, o'rnatilgan to'g'ri uzatmali sinxron elektr dvigatel. Termomekanik masalaning yechimi nostatsionar harorat maydoni va undan keyingi elastik deformatsiyalarning bog'liq tahliliga asoslanadi. Bog'lanish Dyamel-Neyman modeli bo'yicha deformatsiyalar vek-

torining haroratga bog‘liqligi orqali amalga oshiriladi.



1-rasm. HURCO besh koordinatali dastgohining CAD modeli.



2-rasm. HURCO dastgohining burish-qiya stolining CAD modeli.

Korpusda issiqlikning tarqalish jarayoni differensial shakldagi nostatsionar issiqlik o‘tkazuvchanlik tenglamasi bilan tavsiflanadi:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_v \quad (1)$$

bu yerda (ρ)- materialning zichligi, kg/m³; (c_p)- o‘zgarimas bosimdagi solishtirma issiqlik sig‘imi, J/ (kg·°C); (T) - harorat, °C; (t) - vaqt, s; (k_x, k_y, k_z) - izotrop yaqinlashishda issiqlik o‘tkazuvchanlik tenzorining komponentlari ($k_x = k_y = k_z = k$), Vt/ (m·°C); (Q_v) - ichki issiqlik manbalarining hajmiy zichligi, Vt/m³.

Birinchi tur chegaraviy shartlar (Dirixle)

texnologik muhit bilan aloqa yuzalarida berilgan:

$$T = T_{amb} = 22 \text{ °C} \quad \text{при } t = 0 \quad (2)$$

Uchinchi turdagi (Nyuton-Rixman) chegaraviy shartlar korpusning atrofdagi havo bilan aloqada bo‘lgan tashqi yuzalarida berilgan:

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T_s - T_{amb}) \quad (3)$$

bu yerda (h) - konvektiv issiqlik uzatish koeffitsiyenti, Vt/ (m²·°C); (T_s) - korpus sirtining harorati, °C; (n) - sirtga nisbatan tashqi normal.

Issiqlik manbalari podshipnik tugunlarining yuzalarida va dvigatel statorining tutashish zonasida issiqlik oqimlari ko‘rinishida modellashtirildi:

$$Q_{bearing} = q_0 \cdot A_{bearing} \quad (4)$$

bu yerda (q_0) - 2000-5000 Vt/m² oralig‘ida qabul qilinadigan solishtirma issiqlik oqimi (ish rejimiga qarab), ($A_{bearing}$) - issiqlik ajratuvchi sirt yuzasi.

Korpusning deformatsiyalangan holati harorat deformatsiyasini hisobga olgan holda chiziqli elastiklik nazariyasi tenglamalari tizimi bilan tavsiflanadi. To‘liq deformatsiya elastik va harorat tarkibiy qismlarining yig‘indisi ko‘rinishida ifodalanadi:

$$\varepsilon_{ij}^{total} = \varepsilon_{ij}^{el} + \varepsilon_{ij}^{th} \quad (5)$$

Izotrop material uchun harorat deformatsiyasi quyidagicha aniqlanadi:

$$\varepsilon_{ij}^{th} = \alpha \Delta T \delta_{ij} \quad (6)$$

bu yerda (α) - chiziqli harorat kengayish koeffitsiyenti (CHKK), °C⁻¹; ($\Delta T = T - T_{ref}$) - haroratning referens qiymatga nisbatan o‘shishi ($T_{ref} = 22 \text{ °C}$); (δ_{ij}) - Kroneker belgisi.

Kuchlanishlar va elastik deformatsiyalar o‘rtasidagi bog‘liqlik Dyamel-Neyman shaklidagi umumlashtirilgan Guk qonuni bilan ifodalanadi:

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{1+\nu} \left(\varepsilon_{ij}^{el} + \frac{\nu}{1-2\nu} \varepsilon_{kk}^{el} \delta_{ij} \right) \quad (7)$$

yoki to‘liq deformatsiyalar orqali to‘g‘ridan-to‘g‘ri shaklda:

$$\sigma_{ij} = 2G \varepsilon_{ij}^{total} + \lambda \varepsilon_{kk}^{total} \delta_{ij} - (3\lambda + 2G) \alpha \Delta T \delta_{ij} \quad (8)$$

bu yerda (E) - Yung moduli (birinchi tur elastiklik moduli), Pa; (ν) - Puasson koeffitsiyenti; ($G = \frac{E}{2(1+\nu)}$) - siljish moduli, Pa; ($\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}$) - Lamé parametri, Pa.

Chegaraviy masala quyidagi chegaraviy shartlarda yechildi: korpusning tayanch yuzalarida nolga teng siljishlar berilgan (to‘liq siqilish); qolgan

yuzalarda erkin chegaraviy shartlar. Hisob-kitoblarda korpus materialining (yuqori mustahkam cho‘yan / konstruksion po‘lat) quyidagi issiqlik-fizik va mexanik xususiyatlaridan foydalanilgan:

1-jadval

Korpus materialining issiqlik-fizik va mexanik xususiyatlari

Parametr	Belgilash	Ahamiyat	O‘lchov birligi
Zichlik	ρ	7800	kg/m ³
Solishtirma issiqlik sig‘imi	c_p	470	J/(kg·°C)
Issiqlik o‘tkazuvchanlik	k	45	W/(m·°C)
Yung moduli	E	2,0·10 ¹¹	Pa
Puasson koeffitsiyenti	ν	0,3	o‘lchamsiz.
KLTR	α	12·10 ⁻⁶	°C ⁻¹
Konveksiya koeffitsiyenti	h	20	W/(m ² ·°C)

Tanlangan qiymatlarning asoslanishi metall kesish dastgohlari staninalari va korpuslarining namunaviy materiallariga mos keladi (GOST 1412-85, ASTM A48/A48M).

Shakllantirilgan chegaraviy masalani sonli yechish uchun ANSYS Workbench muhitida (Thermal va Static Structural modullari) chekli elementlar usuli (CHEU) qo‘llanildi. Hisoblash to‘ri ikkinchi tartibli 10 tugunli tetraedrik elementlar (mexanik tahlil uchun SOLID187 va issiqlik tahlili uchun SOLID279) asosida qurilgan. Ikkinchi tartibli elementlarni tanlash harorat gradiyentlari va kuchlanish konsentratsiyalarini to‘g‘ri aks ettirish zarurati bilan bog‘liq. Chekli elementli modelning xarakteristikalari tugunlar soni 347.218, elementlar soni 198.456, elementning o‘rtacha o‘lchami 3,5 mm, issiqlik ajralish zonalarida lokal quyuqlashish 1,0 mm. To‘r bo‘yicha yechimning yaqinlashishi ketma-ket maydalangan uchta to‘rda hisoblash orqali tasdiqlandi. 198 ming va 320 ming elementli to‘rlar orasidagi maksimal harorat va maksimal deformatsiyaning og‘ishi 1,2% dan oshmadi, bu qoniqarli deb topildi.

Yechim ikki ketma-ket bosqichda amalga oshirildi:

1. Nostatsionar issiqlik analizi (Transient Thermal). 10 soniyalik qadam bilan ($t \in [0; 200]$) vaqt oralig‘ida harorat maydonini hisoblash. Vaqtli diskretlashning oshkormas usulidan foydalanilgan (Galyorkin sxemasi).

2. Statik strukturaviy tahlil (Static Structural). Har bir vaqt qadamida harorat maydoni mexanik modelga yuklama sifatida import qilindi. Muvozanatlar tizimi yechildi:

$$[K]\{u\} = F_{th} \quad (9)$$

bu yerda $[K]$ — global bikrlilik matritsasi; $\{u\}$ — tugun ko‘chishlari vektori; $F_{th} = \int_V [B]^T [D] \{\varepsilon_{th}\} dV$ — harorat deformatsiyasidan hosil bo‘lgan ekvivalent tugun kuchlari vektori. Haqiqiy foydalanish sharoitlarini modellashtirish uchun quyidagi issiqlik yuklamalari berilgan:

2-jadval.

Hisoblash modelida berilgan chegaraviy shartlar va issiqlik yuklamalari

Issiqlik manbai	Yuk turi	Ahamiyat	Ilova hududi
Podshipnik uzeli 1	Yuza issiqlik oqimi	3000 Wt/m ²	Podshipnikning tashqi halqasi
Podshipnik uzeli 2	Yuza issiqlik oqimi	3500 Wt/m ²	Podshipnikning ichki halqasi
Momentli dvigatel statori	Hajmiy issiqlik ajralishi	1,2·10 ⁵ Wt/m ³	Dvigatelning aktiv zonasi
Konveksiya	III tur chegaraviy shart	h=20	Barcha tashqi yuzalar

Tahlil jarayonida quyidagi chiqish kattaliklari qayd etildi: harorat maydoni - harorat taqsimoti ($T(x, y, z, t)$), mahalliy maksimumlar va gradiyentlar; umumiy deformatsiya ($u_{total} = \sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2}$); global koordinatalar tizimidagi tarkibiy deformatsiyalar (u_x), (u_y), (u_z); shuningdek, stolning ishchi yuzasi deformatsiyasi (u_{table}) (markazda va chetda ko‘chish vektori).

Issiqlik deformatsiyalarining aylanish o‘qi joylashuvining aniqligiga ta’sirini miqdoriy baholash uchun stolning issiqlik siljishi bilan bog‘liq bo‘lgan aylanma xatolik mezonidan foydalanildi. Ushbu xatolik quyidagi formula yordamida baholandi:

$$(\Delta\theta = \arctan\left(\frac{u_{tan}}{R}\right) \approx \frac{u_{tan}}{R}) \text{ (rad)}, \quad (10)$$

bu yerda (u_{tan}) - stol deformatsiyasining tangensial komponenti, (R) - stol radiusi. Kichik burchakli siljishlarda (pretsizion tugunlarning issiqlik deformatsiyalari uchun xos bo‘lgan) chiziqli yaqinlashishga yo‘l qo‘yiladi, uning xatoligi rad da 0,1% dan oshmaydi ($u_{tan}/R < 0,05$).

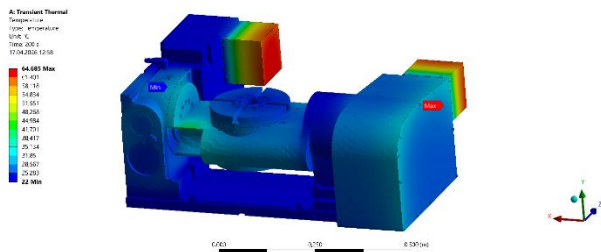
Natijalar. Issiqlik o‘tkazuvchanlikning nostatsionar masalasini yechish natijasida aylanish o‘qi korpusida haroratning fazoviy-vaqt taqsimoti olingan. 3-rasmda oxirgi s vaqtdagi ($t = 200$) harorat maydoni ko‘rsatilgan.

Aniqlanishicha, maksimal harorat momentli dvigatelning podshipnik uzeli va statori tutashgan sohada erishiladi: $T_{max} = 64,7^\circ\text{C}$, minimal harorat korpusning issiqlik manbalaridan uzoqlashgan qismlarida qayd etiladi va atrof-muhit haroratiga

mos keladi $T_{min} = 22,0 \text{ }^\circ\text{C}$, hamda konstruksiyadagi to'liq harorat farqi quyidagicha bo'ladi:

$$\Delta T_{total} = T_{max} - T_{min} = 42,7 \text{ }^\circ\text{C} \quad (11)$$

Tahlillar natijasida harorat maydoni shakllanishining quyidagi qonuniyatlari aniqlandi. Birinchidan, qizishning yaqqol ifodalangan lokalizatsiyasi kuzatiladi: $55 \text{ }^\circ\text{C}$ dan yuqori haroratli zona korpus hajmining ko'pi bilan 12-15% ini egallaydi va faqat podshipnik qismlari hamda dvigatel atrofida to'plangan bo'ladi. Ikkinchidan, gradiyent zonalarini aniqlandi - haroratning eng katta fazoviy gradiyentlari ($8 \text{ }^\circ\text{C/mm}$ gacha) korpusning qizigan sohasi va sovuq qismlari o'rtasidagi chegarada qayd etiladi, bunda aynan shu zonalar maksimal termik kuchlanishlarni hosil qiladi. Uchinchidan, harorat maydonining sezilarli asimmetriyasi aniqlandi: momentli dvigatelning nosimmetrik joylashuvi (korpusning markaziy o'qiga nisbatan siljishi) tufayli maydon o'q simmetriyasiga ega emas, yuqori haroratlar zonasi esa musbat Y o'qi yo'nalishida kengaygan. To'rtinchidan, isitish vaqt dinamikasining eksponensial xususiyati aniqlandi - dastlabki 60 soniyada harorat barqaror qiymatning 80 foiziga yetadi, shundan so'ng isitish tezligi sezilarli darajada sekinlashadi.



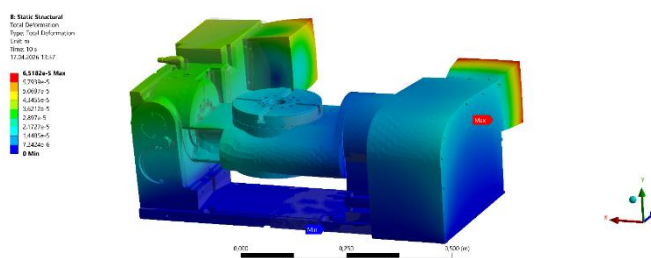
3-rasm. Harorat maydonlarining nostatsionar tahlili.

Xarakterli o'lchami 150-200 mm bo'lgan yuqori harorat gradiyenti ($42,7 \text{ }^\circ\text{C}$) korpusning egilish deformatsiyalari paydo bo'lishiga zamin yaratadi. Miqdoriy jihatdan gradiyent quyidagi parametr bilan tavsiflanishi mumkin:

$$\nabla T \approx \frac{\Delta T}{L} \approx \frac{42,7}{0,18} \approx 237 \text{ }^\circ\text{C/m} \quad (12)$$

bu yerda (L) - issiqlik ajralish markazi va korpusning eng uzoq nuqtasi orasidagi masofa.

4-rasmida korpus va stolda yig'indi deformatsiyaning taqsimlanishi keltirilgan ($u_{total} = \sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2}$).



4-rasm. Statik strukturaviy tahlil.

Statik strukturaviy tahlildan ko'rinib turibdiki, butun tugun bo'ylab maksimal deformatsiya

$$u_{max}^{total} = 6,52 \times 10^{-5} \text{ m} = 65,2 \text{ } \mu\text{m} \quad (13)$$

Maksimumning lokalizatsiyasi stolning periferik zonalarida va korpusning tayanch yuzalaridan uzoqlashgan qismlarida joylashgan. Deformatsiyalanishning xususiyati shundaki, korpus vertikal tekislikda egilishning ustunligi bilan murakkab egilish-buralish deformatsiyasini boshdan kechiradi.

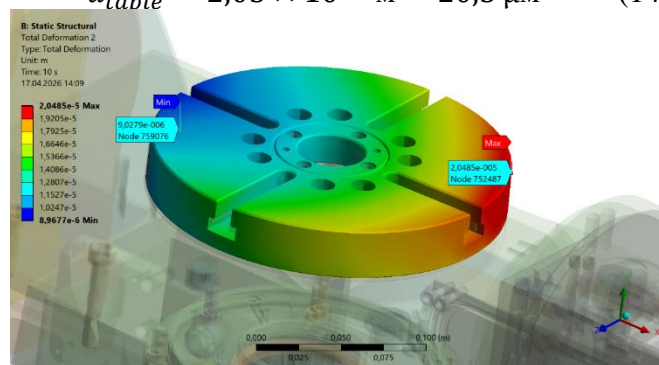
3-jadval.

Uchta zona aniqlandi

Zona	Deformatsiya turi	Qiymat, mkm	Maksimal ulush
Stol periferiyasi	Egilish va buralish	65,2	100%
Korpusning o'rtasi	Egilish	35-50	54-77%
Tayanch asoslar	Siqish	5-10	8-15%

Buriluvchi stol funksional jihatdan eng muhim element hisoblanadi, chunki ishlov beriladigan detal aynan unga asoslanadi. Stolning deformatsiyasi bevosita ishlov berish xatoligiga o'tadi. Stolning maksimal deformatsiyasi:

$$u_{table}^{max} = 2,05 \times 10^{-5} \text{ m} = 20,5 \text{ } \mu\text{m} \quad (14)$$



5-rasm. Statik tarkibiy tahlil.

Stol deformatsiyasining tarkibiy qismlarini tahlil qilish deformatsiyaning ustun yo'nalishini ko'rsatadi - vertikal (Z o'qi) va tangensial (Y o'qi); stol chetining markazga nisbatan "ko'tarilish"

effekti kuzatiladi (differensial issiqlik kengayishi); stol perimetri bo‘ylab deformatsiyaning notekisligi 30% ga yetadi. Stol periferiyasining tangensial siljishi aylanish o‘qining joylashishidagi burchak xatoligiga olib keladi. Baholash stol radiusi ($R = 150 \text{ mm}$) uchun amalga oshirildi (ushbu sinfdagi dastgoh uchun namunaviy qiymat):

$$\Delta\theta = \frac{u_{table}^{tan}}{R} = \frac{20,5 \times 10^{-6}}{0,15} = 1,37 \times 10^{-4} \text{ rad} \quad (15)$$

$$\Delta\theta = 1,37 \times 10^{-4} \times \frac{180}{\pi} \times 3600 \approx$$

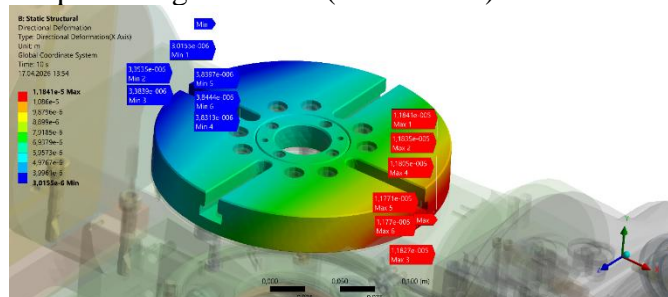
$$28,2 \text{ uglovix sekund} \quad (16)$$

4-jadval.

Ruxsat etilgan qiymatlar bilan taqqoslash

Aniqlik toifasi	Joylashtirishning ruxsat etilgan xatoligi, burchak soniya	Nisbat
Aniq ishlov berish (ISO 10791)	10–15	1,9–2,8 baravar oshib ketgan
O‘rtacha aniqlikdagi ishlov berish	30–40	Ruxsat etilgan chegaralarda
Xomaki ishlov berish	60–90	Ruxsat etilgan darajadan past

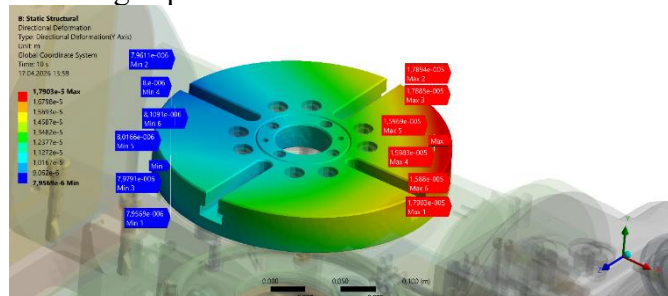
Deformatsiyalarning dominant yo‘nalishlarini aniqlash uchun global koordinatalar tizimida (u_x), (u_y), (u_z) komponentlarni alohida ko‘rib chiqish amalga oshirildi (5-7-rasmlar).



6-rasm X o‘qi bo‘ylab statik strukturaviy tahlil.

$$u_x^{max} = 1,18 \times 10^{-5} \text{ m} = 11,8 \mu\text{m} \quad (17)$$

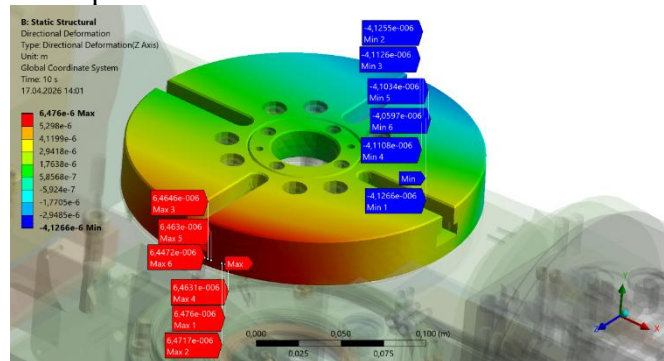
Deformatsiyaning taqsimlanish xarakteri markaziy tekislikka nisbatan simmetrik bo‘lib, maksimumlar korpusning yon zonalarida kuzatiladi, bu esa qizigan zonaning ko‘ndalang kengayishi bilan bog‘liq.



7-rasm. Y o‘qi bo‘yicha statik strukturaviy tahlil.

$$u_y^{max} = 1,79 \times 10^{-5} \text{ m} = 17,9 \mu\text{m} \quad (18)$$

Deformatsiyaning taqsimlanish xususiyati asimmetrik bo‘lib, bu dvigatelning nosimmetrik joylashuvi bilan bog‘liq; bunda maksimum yuritma joylashgan tomonga siljigan bo‘lib, ushbu komponent stolning tangensial siljishiga asosiy hissa qo‘shadi.



8-rasm Z o‘qi bo‘ylab statik strukturaviy tahlil.

$$u_z^{max} = 6,47 \times 10^{-6} \text{ m} = 6,5 \mu\text{m} \quad (19)$$

5-jadval

Termomexanik tahlilning umumlashtirilgan natijalari

Parametr	Belgilash	Ahamiyat	O‘lchov birligi
Maksimal harorat	T_{max}	64,7	°C
Harorat farqi	ΔT	42,7	°C
Maksimal yig‘indi deformatsiya	$u_{totalmax}$	65,2	mkm
Stolning deformatsiyasi	$u_{tablemax}$	20,5	mkm
X bo‘yicha deformatsiya	u_{xmax}	11,8	mkm
Y bo‘yicha deformatsiya	u_{ymax}	17,9	mkm
Z bo‘yicha deformatsiya	u_{zmax}	6,5	mkm
Y/X anizotropiya koeffitsiyenti	K_{yx}	1,52	—
Y/Z anizotropiya koeffitsiyenti	K_{yz}	2,75	—
Pozitsiyalashning burchak xatoligi	$\Delta\theta$	28,2	burchak soniya

Deformatsiyaning ushbu tarkibiy qismining tarqalish xarakteri ko‘rib chiqilayotgan barcha yo‘nalishlar orasida minimal qiymatlar bilan tavsiflanadi, bu korpusning tayanch yuzalari tomonidan vertikal siljishlarning cheklanishi bilan bog‘liq; bunda mahalliy ko‘tarilish va cho‘kish zonalarida kuzatiladi.

$$u_y^{max} > u_x^{max} > u_z^{max} \quad (20)$$

Anizotropiya koeffitsiyentlari:

$$K_{yx} = \frac{u_y^{max}}{u_x^{max}} = \frac{17,9}{11,8} \approx 1,52 \quad (21)$$

$$K_{yz} = \frac{u_y^{max}}{u_z^{max}} = \frac{17,9}{6,5} \approx 2,75 \quad (22)$$

$$K_{xz} = \frac{u_x^{max}}{u_z^{max}} = \frac{11,8}{6,5} \approx 1,82 \quad (23)$$

Deformatsiyalar anizotropiyasi uchta asosiy omilga bog'liq. Birinchidan, korpusning geometrik asimmetriyasi: texnologik oynalar va bikrlilik qirralari mavjudligi sababli Y yo'nalishdagi bikrlilik X ga qaraganda pastroq. Ikkinchidan, issiqlik manbalarining asimmetriyasi: momentli dvigatel va asosiy podshipnik uzeli markaziy o'qqa nisbatan siljigan, bu esa nosimmetrik issiqlik impulsini hosil qiladi. Uchinchidan, mahkamlashning chegaraviy shartlari: tayanch yuzalar asosan Z o'qi bo'ylab siljishni cheklaydi, X va Y o'qlari bo'ylab esa korpus ko'proq erkinlikka ega.

Muhokama. O'tkazilgan tadqiqotlar shuni ko'rsatdiki, korpusning issiqlik maydoni yuqori darajadagi qizdirish lokalizatsiyasi va sezilarli gradiyentlar bilan tavsiflanadi ($\nabla T \approx 237 \text{ }^\circ\text{C}/\text{M}$). Tugunning maksimal deformatsiyasi 65,2 mkm ga yetadi, bunda stolning deformatsiyasi eng kritik hisoblanadi — 20,5 mkm. Birinchi marta ushbu konstruktsiya uchun Y ($u_y > u_x > u_z$) yo'nalishining ustunligi bilan deformatsiyalarning anizotropiyasi miqdoriy jihatdan tasdiqlandi; anizotropiya koeffitsiyentlari 1,52 va 2,75 ni tashkil etadi. Aylanma o'qni joylashtirishning issiqlik xatosi 28,2 burchak soniyasiga teng deb baholandi, bu esa aniq ishlov berish ruxsat etilganidan (10-15 burchak soniyasi) 1,9–2,8 baravar yuqori. Olingan natijalar besh koordinatali stanokning aniqligini boshqarish tizimini loyihalashda issiqlik deformatsiyalarini hisobga olish zarurligini yaqqol

tasdiqlaydi.

Xulosa. Olingan harorat maydoni ($T_{max} = 64,7 \text{ }^\circ\text{C}$), ($\Delta T = 42,7 \text{ }^\circ\text{C}$) issiqlik bilan yuklangan tugunlar uchun xosdir: mahalliy issiqlik manbalari yuqori gradiyentli zonalarini hosil qiladi. Bio mezonining past qiymati ($(Bi \approx 0,022 \ll 0,1)$) shuni ko'rsatadiki, sovutish intensivligi emas, balki materialning cheklangan issiqlik o'tkazuvchanligi haroratni $k = 45 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{ }^\circ\text{C})$ tenglashtirishni cheklaydi. Korpusning deformatsiyalanishi bir jinsli bo'lmagan kengayish oqibatidir. Erkin element uchun ko'chish 102 mkm ni tashkil etadi, biroq haqiqiy deformatsiya (65,2 mkm) konstruktsiya bikrligi tufayli 36% ga pastroq bo'ladi. Aniqlangan anizotropiya dvigatelning asimmetrik joylashuvi ($(u_y > u_x > u_z)$, ($K_{yx} = 1,52$), ($K_{yz} = 2,75$)) X o'qiga nisbatan eguvchi moment hosil qiluvchi issiqlik dipoli va vertikal siljishlarning tayanchlar bilan cheklanishi bilan tushuntiriladi.

Adabiyotlar bilan solishtirish [Bryan, 1990; Mayr va boshqalar, 2012; Ramesh et al., 2000] olingan qiymatlar ma'lum diapazonlar bilan mos kelishini ko'rsatadi. Ushbu konstruktsiya uchun birinchi marta anizotropiya miqdoriy jihatdan isbotlandi, bu esa kompensatsiyaning o'qqa nisbatan simmetrik modellarining qo'llanilishini shubha ostiga qo'yadi. Pozitsiyalash xatoligi (28,2 burchak soniya) pretsizion joizlikdan (10-15 burchak soniya) 1,9–2,8 marta oshib ketadi, bu esa kompensatsiyani talab etadi. Modellashtirish xatoligi bahosi: ($\delta_{total} \approx 13\%$), ($u_{table} = 20,5$) mkm uchun ishonch oralig'i: ($\pm 2,7$) mkm.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO'YXATI

- [1] International Organization for Standardization. (2015). ISO 230-7:2015. Test code for machine tools—Part 7: Geometric accuracy of axes of rotation. ISO.
- [2] Mayr, J., Jedrzejewski, J., Uhlmann, E., Donmez, A., Knapp, W., Härtig, F., Wendt, K., Moriwaki, T., Shore, P., Schmitt, R., Brecher, C., Würz, T., & Wegener, K. (2012). Thermal issues in machine tools. *CIRP Annals*, 61(2), 771–791. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.05.008>
- [3] Gibson, A., & Stein, J. L. (2020). Reduced-order finite element thermal model of a machine tool spindle. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 142(4), 041008. <https://doi.org/10.1115/1.4045798>
- [4] Mayr, J., & Wegener, K. (2012). Thermal errors in machine tools: A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 62, 1–15.
- [5] Ibaraki, S., & Knapp, W. (2012). Indirect measurement of volumetric accuracy in five-axis machine tools. *CIRP Annals*, 61(2), 729–748. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.05.050>
- [6] Gebhardt, M., Knapp, W., & Wegener, K. (2014). Thermal error compensation in machine tools. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 7(4), 241–251.

- [7] Zimmermann, N., Mayr, J., & Wegener, K. (2023). Self-learning thermal error compensation for five-axis machine tools. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 46, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2023.01.001>
- [8] Li, Y., Zhao, W., & Lu, B. (2019). Thermal-mechanical coupling analysis of high-speed optical grinding spindle. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 20(8), 1325–1335. <https://doi.org/10.1007/s12541-019-00147-4>
- [9] Bryan, J. B. (1990). International status of thermal error research. *CIRP Annals*, 39(2), 645–656. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63001-7](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63001-7)
- [10] Ramesh, R., Mannan, M. A., & Poo, A. N. (2000). Error compensation in machine tools—A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 40(9), 1235–1256. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(00\)00009-2](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(00)00009-2)

Maqolaga iqtibos keltirish | Как цитировать статью | How to cite this article

Ataullayev, A. O., Jo'rayev, N. N., Egamberdiyev, I. P., & Yaxshiyev, Sh. N. (2026). Besh o'qli RDB tizimidagi issiqlik yuklamalari va deformatsiyalarni hisobga olgan holda aylanuvchi o'q korpusining termomehanik tahlili. *Sanoatda raqamli texnologiyalar*, 4(2). <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.2.2026.12>
