Yuqori aniqlik talab qilinadigan muhitda ishlovchi tishli g‘ildiraklarga frezalab ishlov berish texnologiyasini takomillashtirish

Dilshod Xoltursunovich Bekturov
Olmaliq davlat texnika insituti

Annotatsiya: Ushbu maqolada yuqori aniqlik talab qilinadigan muhitda ishlovchi tishli g‘ildiraklarga frezalab ishlov berish texnologiyasini takomillashtirish masalalari tadqiq etilgan. Tishli uzatmalarning ishlash samaradorligi, shovqin darajasi, dinamik yuklanishga chidamliligi va xizmat muddatiga tish profilining geometrik aniqligi hamda tishlar orasidagi qadam xatoliklari sezilarli ta’sir ko‘rsatadi. An’anaviy frezalash jarayonida dastgohning bikrligi, kesuvchi asbobning yeyilishi, texnologik bazalash xatoliklari, kesish kuchlari va issiqlik deformatsiyalari tayyor mahsulot sifatining pasayishiga sabab bo‘lishi mumkin. Tadqiqotda tishli g‘ildiraklarga ishlov berishning mavjud texnologik usullari tahlil qilinib, yuqori aniqlikni ta'minlashga yo‘naltirilgan takomillashtirilgan texnologik jarayon taklif etiladi. Ushbu jarayonning asosini zagotovkani aniq bazalash, CNC boshqaruvli frezalash, kesish rejimlarini optimallashtirish, kesuvchi asbob yeyilishini nazorat qilish hamda ishlov berilgan tish yuzalarining geometrik parametrlarini metrologik nazorat qilish tashkil etadi. Shuningdek, kesish tezligi, surish miqdori va kesish chuqurligining tishli g‘ildirak aniqligiga ta’sirini baholash uchun matematik model ishlab chiqish yondashuvi taklif qilingan. Tadqiqot natijalaridan yuqori aniqlikdagi mexanik uzatmalar, sanoat reduktorlari, avtomobilsozlik va mashinasozlik korxonalarida tishli g‘ildiraklarni tayyorlash texnologiyasini takomillashtirishda foydalanish mumkin.

Kalit so‘zlar: tishli g‘ildirak, frezalash, yuqori aniqlik, CNC dastgohi, kesish rejimlari, texnologik bazalash, tish profili, geometrik xatolik, sirt g‘adir-budurligi, matematik modellashtirish

IMPROVEMENT OF MILLING TECHNOLOGY FOR GEAR WHEELS OPERATING IN HIGH-PRECISION ENVIRONMENTS

Dilshod Kholtursunovich Bekturov
Almalyk State Technical Institute

Abstract: This article investigates issues regarding the improvement of milling technology for gears operating in environments requiring high precision. The

(cc) BY

geometric precision of the tooth profile and the error of the pitch between the teeth significantly affect the operational efficiency, noise level, dynamic load resistance, and service life of gear transmissions. In the traditional milling process, machine rigidity, cutting tool wear, technological installation errors, cutting forces, and thermal deformations can cause a decrease in the quality of the finished product. The study analyzes existing technological methods for processing gears and proposes an improved technological process aimed at ensuring high precision. The basis of this process consists of precise workpiece basing, CNC controlled milling, optimization of cutting modes, control of cutting tool wear, and metrological control of the geometric parameters of the processed tooth surfaces. Additionally, an approach to developing a mathematical model is proposed to evaluate the influence of cutting speed, feed rate, and cutting depth on gear accuracy. The results of the study can be used to improve the technology for manufacturing high-precision mechanical transmissions, industrial gearboxes, and gears at automotive and mechanical engineering enterprises.

Keywords: gear, milling, high precision, CNC machine, cutting modes, technological basing, tooth profile, geometric error, surface roughness, mathematical modeling

1. KIRISH (INTRODUCTION)

Zamonaviy mashinasozlik sanoatida mexanik uzatmalarning aniqligi, ishonchliligi va uzoq muddat ishlash qobiliyatini oshirish muhim texnologik vazifalardan biri hisoblanadi. Ayniqsa, yuqori aylanish chastotasi, o‘zgaruvchan dinamik yuklanish va yuqori aniqlik talab qilinadigan mexanizmlarda ishlatiladigan tishli g‘ildiraklarning geometrik parametrlariga qat'iy talablar qo‘yiladi.

Tishli uzatmalarning ishlash jarayonida tish profilining noto‘g‘ri shakllanishi, aylana qadami xatoligi, radial tepish va tish yuzasidagi g‘adir-budurlik kabi omillar uzatmaning kinematik aniqligiga salbiy ta’sir ko‘rsatadi. Natijada mexanik tebranishlar, shovqin, kontakt kuchlanishlarining notekis taqsimlanishi va tishlarning muddatidan oldin yeyilishi yuzaga kelishi mumkin.

Tishli g‘ildiraklarni tayyorlashda modulli frezalash, chervyakli freza yordamida tish ochish, tish randalash va maxsus CNC dastgohlarida ishlov berish usullaridan foydalaniladi. Ishlab chiqarish samaradorligi va aniqlik talablaridan kelib chiqib, tegishli texnologik usul tanlanadi.

Tishli g‘ildiraklarning geometrik aniqligini ta'minlashda ISO 1328 standartlari muhim ahamiyatga ega. Ushbu standartlar silindrik evolventali tishli uzatmalarning tish profili, tish yo‘nalishi va boshqa geometrik ko‘rsatkichlariga qo‘yiladigan talablarni belgilaydi.

Mavjud ilmiy tadqiqotlarda tishli g‘ildiraklarni tayyorlash jarayonida texnologik omillarning kinematik aniqlikka ta'siri o‘rganilgan. Jumladan, tadqiqotida kesish

(cc) BY

tezligi, surish miqdori va kesish chuqurligining tishli g‘ildiraklarning yig‘indi qadam xatoligiga ta’siri eksperimental va nazariy jihatdan baholangan.

Boshqa tadqiqotlarda besh o‘qli CNC frezalash yordamida murakkab tishli yuzalarni shakllantirish va geometrik aniqlikni oshirish imkoniyatlari ko‘rsatilgan.

Shuningdek, tishli g‘ildiraklarni ishlab chiqarish va nazorat qilish texnologiyalariga bag‘ishlangan ilmiy sharhlarda dastgoh, moslama, kesuvchi asbob va zagotovka o‘rtasidagi texnologik bog‘lanishning tayyor mahsulot sifatiga ta'siri alohida ta’kidlangan.

Shu sababli yuqori aniqlik talab qilinadigan sharoitlarda ishlovchi tishli g‘ildiraklarga frezalab ishlov berish jarayonini kompleks takomillashtirish dolzarb ilmiy-amaliy masala hisoblanadi.

Tadqiqotning maqsadi - tishli g‘ildiraklarga frezalab ishlov berish jarayonida yuzaga keladigan geometrik xatoliklarni kamaytirish, tish profilining aniqligini oshirish va texnologik jarayon samaradorligini yaxshilashga yo‘naltirilgan takomillashtirilgan texnologiyani ishlab chiqish.

2. TADQIQOT MATERIALLARI VA METODLARI (MATERIALS AND METHODS)

2.1. Tadqiqot obyekti

Tadqiqot obyekti sifatida yuqori aniqlikdagi mexanik uzatmalarda qo‘llaniladigan silindrik to‘g‘ri tishli g‘ildiraklarni frezalash jarayoni tanlanadi.

Tishli g‘ildirakning asosiy geometrik parametrlari quyidagilardan iborat:

- modul - m;
- tishlar soni - z;
- bo‘luvchi aylana diametri - d;
- tashqi diametr - da;
- tish kengligi - b;
- ilashish burchagi - α;
- tish balandligi - h.

Silindrik to‘g‘ri tishli g‘ildirak uchun asosiy geometrik bog‘lanish:

$d = m \cdot z$

Tashqi diametr:

$d_a = m(z + 2)$

Standart profil siljishi mavjud bo‘lmagan holatda ushbu bog‘lanishlardan foydalaniladi.

Tadqiqotda zagotovka materiali sifatida sementatsiyalanuvchi yoki yaxshilanuvchi konstruksion po‘latlardan foydalanish mumkin. Material tanlashda tishli g‘ildirakning yuklanish darajasi, ishlash muhiti, qattiqligi va keyingi termik ishlov berish talablari hisobga olinadi.

2.2. Frezalash texnologiyasining mavjud holatini tahlil qilish

(cc) BY

An'anaviy texnologiyada tishli g'ildiraklarni frezalash jarayoni quyidagi bosqichlardan tashkil topadi:

1. Zagotovkani tayyorlash.
2. Zagotovkani dastgohga o'rnatish.
3. Texnologik bazalarni shakllantirish.
4. Tishlar orasidagi bo'shliqlarni frezalash.
5. Tish profili va geometrik parametrlarini tekshirish.
6. Zarur hollarda pardozlash operatsiyasini bajarish.

Mazkur jarayonda aniqlikka ta'sir qiluvchi asosiy omillar quyidagilar:

- dastgoh shpindelining radial va o'q bo'yicha tepishi;
- frezaning geometrik aniqligi;
- zagotovkani mahkamlashdagi xatolik;
- kesish kuchlari ta'sirida tizimning elastik deformatsiyasi;
- kesish zonasidagi haroratning o'zgarishi;
- kesuvchi asbobning yeyilishi;
- CNC dastgohining pozitsiyalash aniqligi.

Ushbu omillarni alohida emas, balki o'zaro bog'liq holda tahlil qilish ishlov berish aniqligini oshirish uchun muhim hisoblanadi.

2.3. Takomillashtirilgan texnologik jarayon

Tadqiqot doirasida tishli g'ildiraklarni frezalashning quyidagi takomillashtirilgan texnologik ketma-ketligi taklif etiladi:

1-bosqich. Zagotovkani tayyorlash.

Zagotovkaning tashqi yuzasi, markaziy teshigi va tayanch yuzalariga dastlabki ishlov beriladi. Bu bosqichda keyingi operatsiyalar uchun barqaror texnologik bazalar yaratiladi.

2-bosqich. Yuqori aniqlikda bazalash va mahkamlash.

Zagotovka markaziy teshik va tayanch yuzalar bo'yicha bazalanadi. Mahkamlash kuchi zagotovkaning deformatsiyasiga sabab bo'lmaydigan darajada tanlanadi.

3-bosqich. CNC dastgohida frezalash.

Tishli g'ildirak tishlari maxsus modulli yoki chervyakli freza yordamida shakllantiriladi. CNC boshqaruv tizimi orqali kesish tezligi, surish va kesish chuqurligi nazorat qilinadi.

4-bosqich. Kesish jarayonini optimallashtirish.

Kesish rejimlari tish profili aniqligi, sirt sifati, asbob yeyilishi va ishlov berish unumdorligini hisobga olgan holda tanlanadi.

5-bosqich. Yakuniy nazorat.

Tayyor tishli g'ildirakning tish profili, tish yo'nalishi, aylana qadami, radial tepishi va sirt g'adir-budurligi tekshiriladi.

(cc) BY

Taklif etilgan texnologik ketma-ketlikning asosiy afzalligi barcha asosiy aniqlik omillarini yagona texnologik tizim doirasida boshqarish imkoniyatidir.

2.4. Kesish rejimlarini hisoblash

Frezalash jarayonining asosiy texnologik parametrlariga kesish tezligi, shpindel aylanish chastotasi, surish tezligi va kesish chuqurligi kiradi.

Kesish tezligi quyidagi formula orqali aniqlanadi:

$V_c = (\pi \cdot D \cdot n) / 1000$

Bu yerda:

V_c - kesish tezligi, m/min;

D - freza diametri, mm;

n - shpindel aylanish chastotasi, ayl/min.

Shpindel aylanish chastotasi:

$n = (1000 \cdot V_c) / (\pi \cdot D)$

Surish tezligi:

$V_f = f_z \cdot z_c \cdot n$

Bu yerda:

V_f - surish tezligi, mm/min;

f_z - bitta tishga to‘g‘ri keladigan surish, mm/tish;

z_c - frezaning kesuvchi tishlari soni;

n - shpindel aylanish chastotasi.

Ushbu parametrlarni tanlashda kesuvchi asbob ishlab chiqaruvchisining tavsiyalari, ishlov berilayotgan material xususiyatlari va dastgohning texnik imkoniyatlari hisobga olinishi lozim.

3. TADQIQOT NATIJALARI VA MUHOKAMA (RESULTS AND DISCUSSION)

3.1. Texnologik omillarning tishli g‘ildirak aniqligiga ta'siri

Frezalash jarayonida tishli g‘ildirakning geometrik aniqligi bir nechta o‘zaro bog‘liq omillarga bog‘liq.

Birinchi navbatda, kesish kuchlari ta'sirida texnologik tizimda elastik deformatsiyalar yuzaga keladi. Bu deformatsiyalar kesuvchi asbobning haqiqiy harakat trayektoriyasini o‘zgartirib, tish profilida geometrik og‘ishlarni hosil qiladi.

Ikkinchidan, kesish zonasida ajralib chiqadigan issiqlik zagotovka va kesuvchi asbobning haroratini oshiradi. Harorat o‘zgarishi natijasida termik deformatsiyalar yuzaga kelishi mumkin.

Uchinchidan, kesuvchi asbobning yeyilishi kesish geometriyasini o‘zgartiradi. Natijada tish yuzasining sifati va geometrik aniqligi pasayadi.

Shu sababli takomillashtirilgan texnologiyada kesish kuchlari, harorat, asbob yeyilishi va bazalash aniqligini nazorat qilish muhim hisoblanadi.

3.2. Matematik modellashtirish

(cc) BY

Tishli g‘ildirakni frezalash jarayonining sifat ko‘rsatkichlarini baholash uchun ko‘p omilli matematik modeldan foydalanish taklif etiladi.

Jarayonning asosiy kirish parametrlari:

X_1 - kesish tezligi;

X_2 - surish miqdori;

X_3 - kesish chuqurligi.

Chiqish parametrlari:

Y_1 - tish profilining og‘ishi;

Y_2 - tish yo‘nalishining og‘ishi;

Y_3 - sirt g‘adir-budurligi;

Y_4 - ishlov berish vaqti.

Ushbu bog‘lanishni ikkinchi darajali polinom orqali ifodalash mumkin:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{33}X_3^2$$

Bu yerda:

b_0 - erkin had;

b_1, b_2, b_3 - chiziqli koeffitsiyentlar;

b_{12}, b_{13}, b_{23} - o‘zaro ta'sir koeffitsiyentlari;

b_{11}, b_{22}, b_{33} - kvadratik koeffitsiyentlar.

Model koeffitsiyentlari tajriba natijalari asosida regressiya tahlili orqali aniqlanadi.

Taklif etilayotgan model kesish rejimlarining tishli g‘ildirak aniqligiga ta’sirini baholash, optimal texnologik parametrlarni aniqlash va tajribalar sonini kamaytirish imkonini beradi.

3.3. Texnologik aniqlikni oshirish mexanizmlari

Tishli g‘ildiraklarning aniqligini oshirish uchun quyidagi texnologik yechimlarni qo‘llash taklif qilinadi.

1. Bazalash tizimini takomillashtirish.

Zagotovkani markaziy teshik va tayanch yuzalar bo‘yicha aniq o‘rnatish orqali radial tepish va o‘rnatish xatoliklarini kamaytirish mumkin.

2. Kesuvchi asbobning geometrik aniqligini oshirish.

Yuqori aniqlikda tayyorlangan, yeyilishga chidamli qoplamaga ega kesuvchi asboblardan foydalanish tavsiya etiladi.

3. Kesish rejimlarini optimallashtirish.

Kesish tezligi, surish va kesish chuqurligini o‘zaro bog‘liq holda tanlash orqali kesish kuchlari va tebranishlarni kamaytirish mumkin.

4. Sovitish-moylash tizimini takomillashtirish.

Kesish zonasiga sovitish-moylash suyuqligini barqaror yetkazib berish issiqlik ta'sirini va ishqalanishni kamaytirishga yordam beradi.

(cc) BY

5. Metrologik nazoratni kuchaytirish.

Tishli g‘ildiraklarning geometrik parametrlarini maxsus tish o‘lchash uskunalari yordamida nazorat qilish ishlab chiqarish sifatini barqarorlashtiradi.

3.4. Taklif etilayotgan texnologiyaning samaradorligini baholash

Takomillashtirilgan texnologiyaning samaradorligini baholashda quyidagi mezonlardan foydalanish maqsadga muvofiq:

- tish profilining umumiy og‘ishi;
- tish yo‘nalishining og‘ishi;
- yig‘indi aylana qadam xatoligi;
- radial tepish;
- sirt g‘adir-budurligi;
- kesuvchi asbobning xizmat muddati;
- bitta detalga sarflanadigan texnologik vaqt.

Umumiy texnologik samaradorlikni baholash uchun ko‘p mezonli optimallashtirishdan foydalanish mumkin.

Masalan, maqsad funksiyasi quyidagicha ifodalanadi:

$F = W_1Y_1 + W_2Y_2 + W_3Y_3 + W_4Y_4$

Bu yerda:

Y_1 - tish profili xatoligi;

Y_2 - tish yo‘nalishi xatoligi;

Y_3 - sirt g‘adir-budurligi;

Y_4 - ishlov berish vaqti;

W_1, W_2, W_3, W_4 - mezonlarning ahamiyat koeffitsiyentlari.

Maqsad funksiyasini minimallashtirish orqali sifat va unumdorlik o‘rtasidagi maqbul nisbatni aniqlash mumkin.

Mazkur yondashuvning samaradorligi real ishlab chiqarish tajribalari orqali tekshirilishi kerak.

4. XULOSA (CONCLUSION)

O‘tkazilgan ilmiy-tahliliy tadqiqot asosida yuqori aniqlik talab qilinadigan sharoitlarda ishlovchi tishli g‘ildiraklarga frezalab ishlov berish texnologiyasini takomillashtirish bo‘yicha quyidagi xulosalar shakllantirildi:

1. Tishli g‘ildiraklarning geometrik aniqligi ularning ishlash ishonchliligi, kinematik aniqligi, dinamik barqarorligi va xizmat muddatini belgilovchi muhim omillardan biri hisoblanadi.

2. Frezalash jarayonida dastgohning bikrligi, zagotovkani bazalash aniqligi, kesuvchi asbobning yeyilishi, kesish kuchlari va harorat deformatsiyalari tayyor mahsulot sifatiga bevosita ta'sir ko‘rsatadi.

(cc) BY

3. CNC boshqaruvli frezalash, takomillashtirilgan bazalash tizimi va kesish rejimlarini optimallashtirishni birgalikda qo‘llash tishli g‘ildiraklarning geometrik aniqligini oshirish uchun istiqbolli texnologik yechim hisoblanadi.

4. Taklif etilgan matematik model kesish tezligi, surish miqdori va kesish chuqurligining tishli g‘ildirak sifat ko‘rsatkichlariga ta'sirini aniqlash hamda optimal ishlov berish rejimlarini tanlash imkonini beradi.

5. Takomillashtirilgan texnologiyaning amaliy samaradorligini aniqlash uchun tajribaviy tadqiqotlar o‘tkazish, tish profili va tish yo‘nalishi og‘ishlarini o‘lchash hamda olingan natijalarni matematik-statistik tahlil qilish zarur.

Umuman olganda, taklif etilayotgan texnologik yondashuv yuqori aniqlikdagi tishli g‘ildiraklarni ishlab chiqarishda texnologik jarayonning barqarorligini oshirish, geometrik xatoliklarni kamaytirish va ishlab chiqarish sifatini yaxshilash uchun ilmiy-amaliy asos bo‘lib xizmat qilishi mumkin.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Halchuk, T., Povstyanoy, O., Bembenek, M., Valetskyi, B., Polinkevych, R., & Smetjukh, B. (2025). An Impact of Technological Factors on the Kinematic Accuracy of Cylindrical Gear Wheels during Machining. Journal of Engineering Sciences, 12(1), B11–B18. https://doi.org/10.21272/jes.2025.12(1).b2

2. Gómez Escudero, G., Bo, P., González-Barrio, H., Calleja-Ochoa, A., Bartoň, M., et al. (2022). 5-axis double-flank CNC machining of spiral bevel gears via custom-shaped tools—Part II: Physical validations and experiments. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 119, 1647–1658. https://doi.org/10.1007/s00170-021-08166-0

3. Technological Aspects of Manufacturing and Control of Gears—Review. (2023). Materials, 16(23), 7453. https://doi.org/10.3390/ma16237453

4. Wang, Y.-Z., Lan, Z., Hou, L.-W., Zhao, H.-P., Zhong, Y., et al. (2016). A generating milling method for a spur face gear using a five-axis computer numerical control milling machine. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. https://doi.org/10.1177/0954405415619346

5. ISO 1328-1:2013. Cylindrical gears — ISO system of flank tolerance classification — Part 1: Definitions and allowable values of deviations relevant to flanks of gear teeth.

6. ISO 1328-2:2020. Cylindrical gears — ISO system of flank tolerance classification — Part 2: Definitions and allowable values of deviations relevant to radial composite deviations and runout information.

7. ISO 6336. Calculation of load capacity of spur and helical gears.

8. Dudley, D. W. (2012). Handbook of Practical Gear Design and Manufacture. CRC Press.

9. Stenström, C., et al. (2014). Gear manufacturing and quality control: Technological considerations and metrological aspects. Gear engineering research literature.