

OPTIMIZATION OF THE CUTTING PROCESS USING NANOFLUID MINIMUM QUANTITY LUBRICATION

Raxmonov Sohibjon Shokirjon o'g'li

Qo'qon davlat universiteti assistent o'qituvchisi

Annotatsiya: Mazkur tadqiqotda qattiqlashtirilgan 90CrSi po'latni kesish jarayonida MoS₂ nanopartikullariga asoslangan nanofluidli minimal miqdordagi moylash (MQL) tizimining texnologik samaradorligi eksperimental ravishda o'rganildi. Tadqiqot jarayonida nanopartikula konsentratsiyasi, havo bosimi va havo oqimi sarfi kabi parametrlarning sirt g'adir-budurligi (Rz) va natijaviy kesish kuchi (Fr) ga ta'siri baholandi. Eksperimental tadqiqotlar Box–Behnken dizayni asosida tashkil etildi va olingan natijalar statistik usullar yordamida tahlil qilindi. Natijalar nanopartikula konsentratsiyasi kesish jarayoniga eng katta ta'sir ko'rsatishini ko'rsatdi. Nanofluidli MQL tizimi kesish zonasidagi tribologik sharoitlarni yaxshilab, kesish kuchini kamaytirish va sirt sifatini oshirishga yordam berishi aniqlangan. Tadqiqot natijalari nanofluid parametrlarini optimallashtirish orqali qattiq kesish jarayonining samaradorligini oshirish imkoniyatini ko'rsatadi.

Kalit so'zlar: MoS₂ nanopartikullari, nanofluid, minimal miqdordagi moylash (MQL), qattiq kesish, 90CrSi po'lat, sirt g'adir-budurligi, kesish kuchi, Box–Behnken dizayni, tribologik sharoitlar, optimallashtirish.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МИНИМАЛЬНОЙ СМАЗКИ НА ОСНОВЕ НАНОЖИДКОСТИ

Рахмонов Сохибджон Шокирджон оглы

Ассистент, Кокандский государственный университет

Аннотация: В данной работе экспериментально исследована эффективность применения минимальной смазки (MQL) на основе наножидкости с наночастицами MoS₂ при обработке закалённой стали 90CrSi. В ходе исследования оценено влияние концентрации наночастиц, давления воздуха и расхода воздушного потока на шероховатость поверхности (Rz) и результирующую силу резания (Fr). Эксперименты были проведены на основе плана Бокса–Бенкена, а полученные данные обработаны статистическими методами. Результаты показали, что концентрация наночастиц оказывает наибольшее влияние на параметры процесса резания. Применение наножидкости в системе MQL способствует улучшению

трибологических условий в зоне резания, снижению силы резания и повышению качества поверхности. Полученные результаты подтверждают перспективность использования наножидкостей для повышения эффективности процессов твердого точения.

Ключевые слова: наночастицы MoS₂, наножидкость, минимальная смазка (MQL), твердое точение, сталь 90CrSi, шероховатость поверхности, сила резания, дизайн Бокса–Бенкена, трибологические условия, оптимизация.

NANOFLUIDLI MINIMAL MIQDORDAGI MOYLASH YORDAMIDA KESISH JARAYONINI OPTIMALLASHTIRISH

Rakhmonov Sohijjon Shokirjon oğlu

Assistant Lecturer, Kokand State University

Abstract: This study experimentally investigates the effectiveness of minimum quantity lubrication (MQL) based on MoS₂ nanoparticle nanofluid in the machining of hardened 90CrSi steel. The influence of nanoparticle concentration, air pressure, and air flow rate on surface roughness (R_z) and resultant cutting force (F_r) was evaluated. The experiments were designed using the Box–Behnken experimental design, and the obtained data were analyzed using statistical methods. The results indicate that nanoparticle concentration has the most significant effect on machining performance. The application of nanofluid in the MQL system improves tribological conditions in the cutting zone, reduces cutting forces, and enhances surface quality. The findings demonstrate that optimizing nanofluid parameters can significantly improve the efficiency of hard machining processes.

Keywords: MoS₂ nanoparticles, nanofluid, minimum quantity lubrication (MQL), hard turning, 90CrSi steel, surface roughness, cutting force, Box–Behnken design, tribological conditions, optimization.

Usullar: Tadqiqotda qattiqlashtirilgan 90CrSi po‘latni kesish jarayoni eksperimental ravishda o‘rganildi. Tajribalar nanofluidli minimal miqdordagi moylash (MQL) tizimi qo‘llangan holda amalga oshirildi. Kesish jarayonida MoS₂ nanopartikullariga asoslangan nanofluid aerosol shaklida kesish zonasiga uzatildi. Ishlov berish jarayonida CBN turidagi kesish plastinkalari qo‘llanildi.

Eksperimental tadqiqotlar Box–Behnken eksperimental dizayni asosida tashkil etildi. Tadqiqotda nanopartikula konsentratsiyasi, havo bosimi va havo oqimi sarfi parametrlarining sirt g‘adir-budurligi (R_z) hamda kesish kuchi (F_r) ga

ta'siri baholandi. Olingan natijalar statistik usullar yordamida qayta ishlanib, kesish jarayoniga ta'sir qiluvchi asosiy omillar aniqlandi.

Xulosa: Mazkur tadqiqotda qattiqlashtirilgan 90CrSi po'latni kesish jarayonida MoS₂ nanopartikullariga asoslangan nanofluidli minimal miqdordagi moylash (MQL) tizimining ta'siri eksperimental ravishda o'rganildi. Tadqiqot jarayonida nanopartikula konsentratsiyasi, havo bosimi va havo oqimi sarfi kabi texnologik parametrlarning sirt g'adir-budurligi va kesish kuchiga ta'siri baholandi. Olingan natijalar nanofluidli MQL tizimi kesish jarayonining tribologik sharoitlarini yaxshilash hamda ishlov berish samaradorligini oshirishda muhim ahamiyatga ega ekanligini ko'rsatadi.

KIRISH

Metall kesish jarayonlari zamonaviy mashinasozlikda yuqori aniqlik va sifatli detallar ishlab chiqarishning asosiy usuli bo'lsa-da, qattiqlashtirilgan po'latlarni ishlashda yuzaga keladigan yuqori harorat va mexanik yuklanishlar kesish asbobining tez yeyilishi hamda sirt sifatining yomonlashishiga olib keladi. An'anaviy sovitish suyuqliklarining ekologik va iqtisodiy kamchiliklari tufayli, bugungi kunda minimal miqdordagi moylash (MQL) texnologiyasi istiqbolli muqobil sifatida keng tadqiq qilinmoqda. Ushbu usulda moylash materiali aerosol shaklida uzatilib, ishqalanishni kamaytirsada, qattiq kesish jarayonlarida oddiy moylar har doim ham yetarli tribologik samaradorlikni ta'minlay olmaydi.

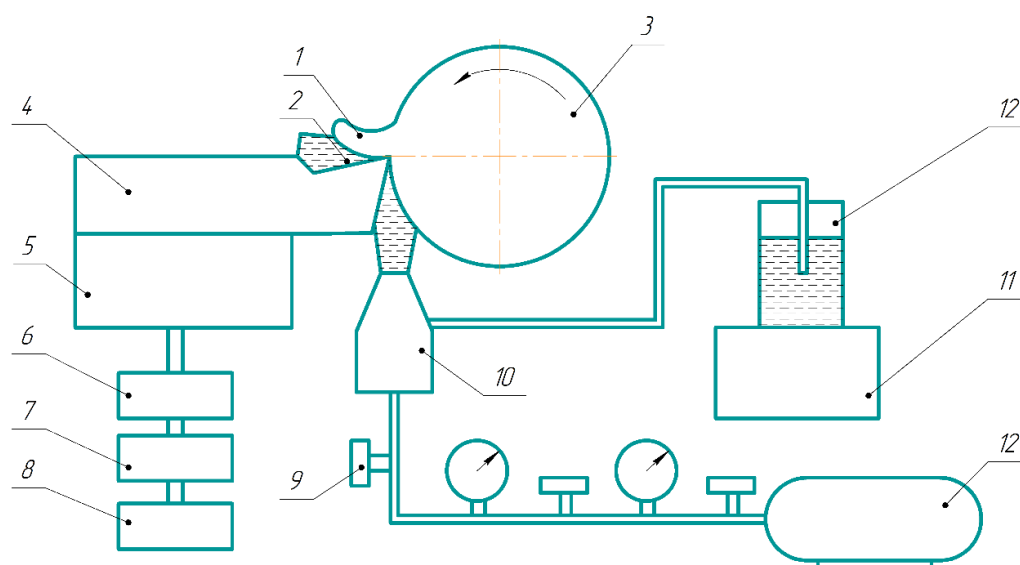
Shu sababli, keyingi yillarda moy tarkibiga molibden disulfid (MoS₂) nanopartikullari kiritilgan nanofluidlardan foydalanishga alohida e'tibor qaratilmoqda. MoS₂ nanopartikullari o'zining qatlamli kristall tuzilishi bilan ishqalanish yuzalarida yupqa plyonka hosil qilib, kesish kuchini pasaytiradi va issiqlikni samarali olib chiqadi. Mazkur tadqiqotning asosiy maqsadi qattiqlashtirilgan 90CrSi po'latni kesishda ushbu nanofluidli MQL tizimining kesish kuchi va sirt g'adir-budurligiga ta'sirini Box–Behnken eksperimental dizayni asosida tahlil qilish hamda nanopartikula konsentratsiyasi, havo bosimi va oqimi kabi parametrlarning optimal qiymatlarini aniqlashdan iboratdir.

TADQIQOT USULLARI

Mazkur tadqiqotda qattiqlashtirilgan po'latni kesish jarayonida minimal miqdordagi moylash (MQL) sharoitida MoS₂ nanopartikullariga asoslangan nanofluidning texnologik parametrlarining kesish kuchi va sirt g'adir-budurligiga ta'siri eksperimental ravishda o'rganildi. Tadqiqotning asosiy maqsadi nanofluidli MQL tizimining tribologik va termik samaradorligini baholash hamda texnologik parametrlarning ishlov berish natijalariga ta'sirini aniqlashdan iborat. Tajriba jarayonida nanofluid aerosol shaklida kesish zonasiga uzatiladi, bu esa ishqalanish

koeffitsientini kamaytirish va issiqlikni kesish zonasidan samarali olib chiqish imkonini beradi.

Eksperimental qurilmaning umumiy sxemasi nanofluid tayyorlash tizimi, MQL purkash mexanizmi, kesish asbobi, ishlov beriluvchi detal va o'lchash tizimlaridan iborat bo'lib, ushbu tizim kesish jarayonini kompleks nazorat qilish imkonini beradi. Nanofluid maxsus rezervuarda tayyorlanadi va ultratovushli aralashtirgich yordamida bir jinsli suspenziya hosil qilinadi. Tayyorlangan nanofluid siqilgan havo yordamida purkagich orqali kesish zonasiga uzatiladi. Kesish jarayonida hosil bo'ladigan kuchlar Kistler 9257B dinamometri yordamida o'lchanadi va signal kuchaytirgich hamda ma'lumotlarni yig'ish tizimi orqali kompyuterga uzatiladi. Ushbu eksperimental tizimning umumiy tuzilishi 1-rasmda ko'rsatilgan.



- 1 – Qirindi (kesish qirindisi); 2 – Nano suyuqlik; 3 – Ishlov berilayotgan detal;
4 – Asbob; 5 – Kistler 9257B dinamometri; 6 – Kuchaytirgich; 7 – Ma'lumotlarni yig'ish tizimi; 8 – DasyLab dasturi; 9 – Klapan; 10 – MQL/MQCL purkagich nozuli; 11 – Ultratovushli aralashtirgich; 12 – Nano suyuqlik idishi (rezervuari);
13 – Siqilgan havo

1-rasm. Tajriba qurilmasining sxemasi

Tadqiqotlarda ishlov beriluvchi material sifatida qattiqlashtirilgan 90CrSi po'lat tanlangan bo'lib, uning qattiqligi 60–62 HRC ni tashkil etadi. Ushbu material yuqori mustahkamlik va aşinishga chidamlilik xususiyatlariga ega bo'lib, qattiq kesish jarayonlarini o'rganishda keng qo'llaniladi. Materialning kimyoviy tarkibi uglerod, kremniy, marganes, xrom va boshqa legirlovchi elementlardan iborat bo'lib, ushbu elementlar materialning mexanik xususiyatlarini va kesish

jarayonidagi deformatsiya xatti-harakatini belgilaydi. Tadqiqotda qo'llanilgan material tarkibi 1-jadvalda keltirilgan.

1-jadval

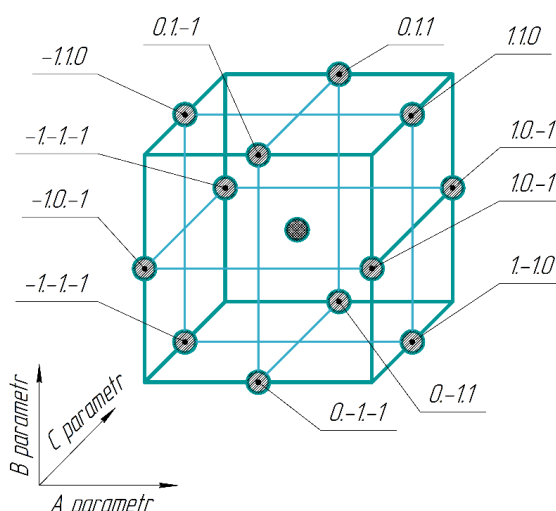
90CrSi po'latining kimyoviy tarkibi, %

Element	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Mo	W	V	Ti	Cu
Og'irlik (%)	0.85 — 0.95	1.20 — 1.60	0.30 — 0.60	Maks — 0.40	Maks — 0.03	Maks — 0.03	0.95 — 1.25	Maks — 0.20	Maks — 0.20	Maks — 0.15	Maks — 0.03	Maks — 0.30

Kesish operatsiyalarida asbob sifatida CBN turidagi kesish plastinkalari qo'llanildi. Ushbu turdagi asboblarda yuqori qattqlikdagi materiallarni ishlov berishda yuqori termik barqarorlik, aşinishga chidamlilik va kesish jarayonining barqarorligini ta'minlaydi. Tajriba davomida kesish tezligi $V = 160$ m/min, kesish chuqurligi $t = 0.12$ mm va surish miqdori $f = 0.12$ mm/aylanish qilib doimiy saqlandi. Bunday yondashuv eksperimental jarayonda asosiy e'tibor nanofluidli MQL parametrlarining ta'sirini o'rganishga qaratilganligini ta'minlaydi.

Nanofluid moylash muhiti sifatida MoS₂ nanopartikullariga asoslangan suspenziya qo'llanildi. MoS₂ nanopartikullari qatlamli kristall tuzilishga ega bo'lib, kesish yuzalarida tribologik plyonka hosil qilish xususiyatiga ega. Ushbu plyonka kesish yuzalaridagi ishqalanishni kamaytiradi hamda kesish jarayonida hosil bo'ladigan mexanik yuklanishlarning pasayishiga yordam beradi. Bundan tashqari, nanopartikullarning yuqori issiqlik o'tkazuvchanligi kesish zonasidan issiqlikni samarali olib chiqishga imkon beradi, bu esa asbob yeyilishining kamayishi va sirt sifatining yaxshilanishiga olib keladi.

Eksperimental tadqiqotlarni rejalashtirishda Box–Behnken eksperimental dizayni qo'llanildi. Ushbu metod ko'p faktorli texnologik jarayonlarni tahlil qilishda samarali bo'lib, o'rganilayotgan parametrlarning asosiy va o'zaro ta'sirlarini aniqlash imkonini beradi. Tajriba dizaynida uchta asosiy texnologik parametr tanlandi: nanopartikula konsentratsiyasi (NC), havo bosimi (P) va havo oqimi sarfi (Q). Ushbu parametrlarning kombinatsiyalari Box–Behnken dizayni asosida shakllantirilib, eksperimental nuqtalar uch o'lchamli faktor fazosida joylashtirildi. Eksperimental dizaynning geometrik tuzilishi 2-rasmda ko'rsatilgan.



2-rasm. Box–Behnken tajriba loyihasi (eksperiment dizayni)

Eksperimental dizayn asosida jami 15 ta tajriba o'tkazildi. Har bir tajribada nanofluid parametrlarining ma'lum kombinatsiyasi qo'llanilib, natijada hosil bo'lgan sirt g'adir-budurligi (R_z) va natijaviy kesish kuchi (Fr) qiymatlari qayd etildi. Tajriba natijalari statistik tahlil va matematik modellashirish uchun ishlatildi. Eksperimental tajriba matritsasi hamda o'lchangan natijalar 2-jadvalda keltirilgan.

Tadqiqot davomida o'rganilgan texnologik parametrlarning qiymatlari ma'lum diapazonda o'zgartirildi. Nanopartikula konsentratsiyasi 0.2–0.8 wt% oralig'ida tanlandi, havo bosimi 4–6 bar diapazonida o'zgartirildi va havo oqimi sarfi 150–250 L/min qiymatlarda belgilandi. Ushbu parametrlar MQL tizimining kesish zonasida samarali ishlashi uchun muhim hisoblanadi, chunki ular nanofluidning kesish zonasiga yetib borish samaradorligi va moylash jarayonining barqarorligini belgilaydi. Tadqiqotda qo'llanilgan parametrlarning qiymatlari va ularning diapazoni 3-jadvalda keltirilgan.

2-jadval

Tajriba dizayni va o'lchangan natijalar (kesish tezligi $V = 160$ m/min; kesish chuqurligi $t = 0.12$ mm; uzatish tezligi $f = 0.12$ mm/ayl.)

Standart tartib	Tajriba tartibi	Nuqta turi	Blok	NC (og' %)	p (bar)	Q (L/min)	R_z (μ m)	Fr (N)
5	1	2	1	0.2	5	150	1.848	307.1019
3	2	2	1	0.2	6	200	1.980	385.1642
14	3	0	1	0.5	5	200	1.198	135.7268
10	4	2	1	0.5	6	150	1.321	165.9382
13	5	0	1	0.5	5	200	1.203	143.3989
12	6	2	1	0.5	6	250	1.353	190.324
7	7	2	1	0.2	5	250	1.955	302.4206
8	8	2	1	0.8	5	250	1.898	658.5913

11	9	2	1	0.5	4	250	1.291	208.8865
6	10	2	1	0.8	5	150	2.518	728.2449
4	11	2	1	0.8	6	200	2.143	489.8893
1	12	2	1	0.2	4	200	1.295	268.6225
2	13	2	1	0.8	4	200	2.436	537.0321
9	14	2	1	0.5	4	150	1.846	141.9083
15	15	0	1	0.5	5	200	1.213	155.6953

3-jadval

Kirish parametrlari va ularning qiymatlari

№	Parametr	Belgisi	Past daraja	Yuqori daraja	Natijalar
1	Nanozarrachalar konsentratsiyasi (%)	NC	0.2	0.8	Sirt notekisligi, (Rz) Natijaviy kesish kuchi, (Fr)
2	Havo bosimi (bar)	p	4	6	
3	Havo oqim tezligi (L/min)	Q	150	250	

Kesish jarayonida hosil boʻladigan natijaviy kesish kuchi Fr uchta kuch komponentining geometrik yigʻindisi sifatida aniqlanadi. Ushbu yondashuv kesish jarayonida hosil boʻladigan umumiy mexanik yuklanishni kompleks tarzda baholash imkonini beradi. Eksperimental natijalar asosida sirt gʻadir-budurligi va kesish kuchining regressiya modellari tuzilib, nanofluid parametrlarining ishlov berish jarayoniga taʼsiri matematik jihatdan tavsiflandi. Ushbu modellar keyinchalik texnologik parametrlarning optimal qiymatlarini aniqlash hamda kesish jarayonini optimallashtirish uchun asos boʻlib xizmat qiladi.

TADQIQOT NATIJALARI

Eksperimental tadqiqotlar natijasida MoS₂ nanopartikullariga asoslangan nanofluidli MQL parametrlarining sirt gʻadir-budurligi va natijaviy kesish kuchiga taʼsiri statistik va grafik tahlil usullari yordamida baholandi. Olingan natijalar kesish jarayonining asosiy koʻrsatkichlari sifatida sirt gʻadir-budurligi (Rz) va natijaviy kesish kuchi (Fr) orqali tahlil qilindi. Tadqiqot davomida olingan eksperimental maʼlumotlar ANOVA tahlili, Pareto diagrammalari hamda taʼsir grafigi yordamida baholandi, bu esa texnologik parametrlarning kesish jarayoniga taʼsir darajasini aniqlash imkonini berdi.

Statistik tahlil natijalari sirt gʻadir-budurligiga taʼsir qiluvchi omillarni aniqlash uchun variatsion tahlil yordamida baholandi. ANOVA natijalari sirt gʻadir-budurligi uchun tuzilgan regressiya modelining statistik jihatdan ishonchli ekanligini koʻrsatdi. Fisher mezoni qiymati yuqori boʻlishi hamda p-qiymatining 0.05 dan kichik boʻlishi modelning eksperimental natijalarni yaxshi ifodalashini tasdiqlaydi. Regressiya modelining aniqlik koeffitsienti $R^2 = 94.90\%$ boʻlib, tuzilgan model sirt gʻadir-budurligining oʻzgarishini yetarli darajada izohlash

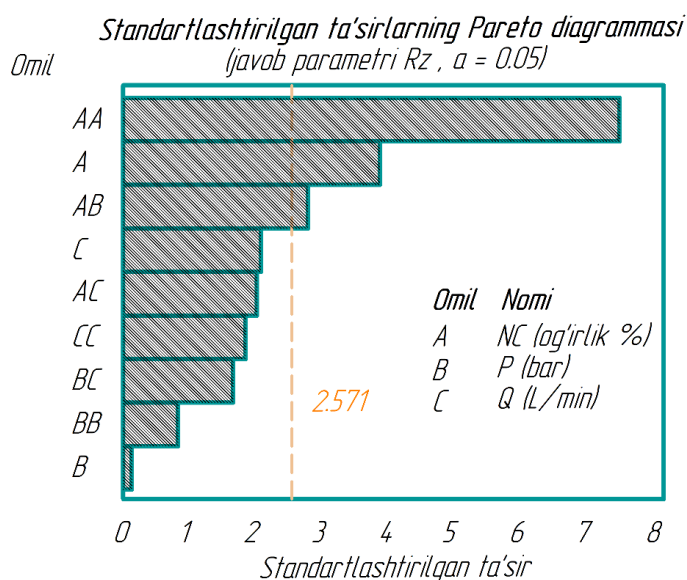
imkonini beradi. Shu bilan birga, tuzatilgan aniqlik koeffitsienti ham yuqori qiymatga ega bo'lib, modelning eksperimental ma'lumotlarga mos kelishini ko'rsatadi. Variatsion tahlil natijalari 4-jadvalda keltirilgan.

4-jadval

Sirt notekisligi Rz uchun ANOVA tahlili natijalari

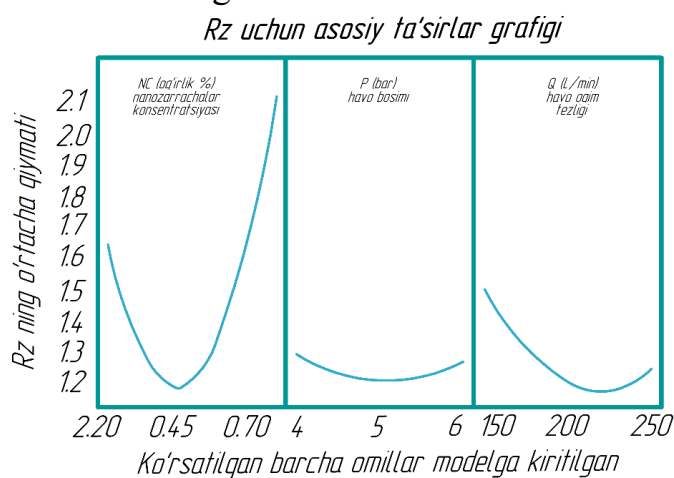
Manba	DF	Tuzatilgan SS	Tuzatilgan MS	F-qiymat	p-qiymat
Model	9	281.326	0.31258	10.34	0.010
Chiziqli	3	0.59415	0.19805	6.55	0.035
NC (og'.%)	1	0.45936	0.45936	15.19	0.011
P (bar)	1	0.00063	0.00063	0.02	0.891
Q (L/min)	1	0.13416	0.13416	4.44	0.089
Kvadratik	3	176.171	0.58724	19.42	0.003
NC (og'.%) × NC (og'.%)	1	170.942	170.942	56.53	0.001
P (bar) × P (bar)	1	0.02270	0.02270	0.75	0.426
Q (L/min) × Q (L/min)	1	0.10629	0.10629	3.52	0.120
2-omilli o'zaro ta'sir	3	0.45740	0.15247	5.04	0.057
NC (og'.%) × P (bar)	1	0.23912	0.23912	7.91	0.037
NC (og'.%) × Q (L/min)	1	0.13213	0.13213	4.37	0.091
P (bar) × Q (L/min)	1	0.08614	0.08614	2.85	0.152
Xatolik	5	0.15119	0.03024	—	—
Mos kelmaslik	3	0.15108	0.05036	863.29	0.001
Sof xatolik	2	0.00012	0.00006	—	—
Jami	14	296.446	—	—	—

Sirt g'adir-budurligiga ta'sir qiluvchi asosiy texnologik omillarni aniqlash maqsadida standartlashtirilgan effektlar Pareto diagrammasi yordamida baholandi. Pareto diagrammasi sirt g'adir-budurligiga eng katta ta'sir ko'rsatuvchi parametrlar va ularning o'zaro ta'sirlarini ko'rsatadi. Diagramma natijalari nanopartikula konsentratsiyasi asosiy ta'sir qiluvchi omil ekanligini ko'rsatadi. Shuningdek, nanopartikula konsentratsiyasining kvadratik ta'siri ham sezilarli darajada katta ekanligi kuzatiladi. Bu holat MoS₂ nanopartikullari kesish zonasida tribologik plyonka hosil qilish jarayoniga bevosita ta'sir qilishini ko'rsatadi. Boshqa omillar, jumladan havo bosimi va havo oqimi sarfi sirt g'adir-budurligiga nisbatan kamroq ta'sir ko'rsatadi. Ushbu natijalar Pareto diagrammasida ko'rsatilgan (3-rasm).



3-rasm. Sirt notekisligi Rz ga ishlov berish jarayonidagi kirish omillarining ta'sirini ko'rsatuvchi Pareto diagrammasi. (A – NC: nanozarrachalar konsentratsiyasi, B – P: havo bosimi, C – Q: havo oqim tezligi.)

Texnologik parametrlarning sirt g'adir-budurligiga ta'siri asosiy effektlar grafigi yordamida ham tahlil qilindi. Grafik natijalari nanopartikula konsentratsiyasining oshishi bilan sirt g'adir-budurligi dastlab kamayishini, ma'lum qiymatdan keyin esa yana ortishini ko'rsatadi. Bu holat MoS₂ nanopartikullari kesish zonasida optimal konsentratsiyada eng samarali tribologik muhit hosil qilishini bildiradi. Nanopartikula konsentratsiyasi juda yuqori bo'lganda esa zarrachalar aglomeratsiyasi yuzaga kelishi mumkin, bu esa sirt sifatining yomonlashishiga olib keladi. Havo bosimi va havo oqimi sarfi esa sirt g'adir-budurligiga nisbatan kamroq ta'sir ko'rsatadi, ammo ularning optimal qiymatlari nanofluidning kesish zonasiga samarali yetib borishini ta'minlaydi. Ushbu bog'liqlik 4-rasmda tasvirlangan.



4-rasm. Ishlov berish jarayonidagi kirish omillarining sirt notekisligi Rz ning o'rtacha qiymatlariga ta'siri

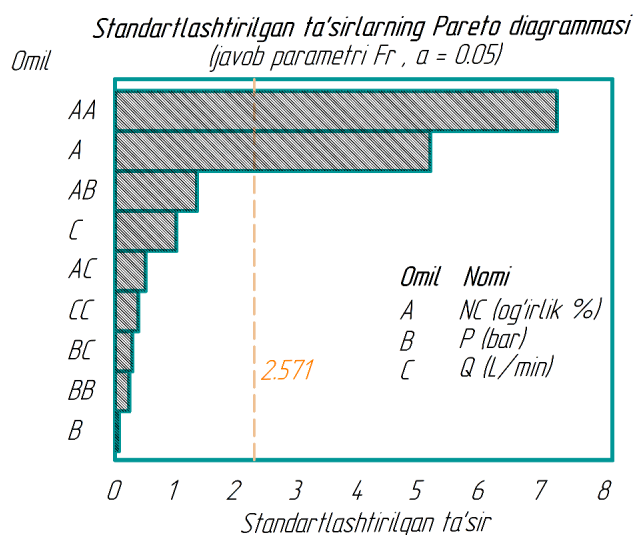
Sirt g'adir-budurligiga ta'sir qiluvchi texnologik parametrlarning o'zaro bog'liqligini aniqlash uchun kontur diagrammasi tahlil qilindi. Diagramma nanopartikula konsentratsiyasi va havo bosimi o'rtasidagi bog'liqlikni ko'rsatadi. Tahlil natijalariga ko'ra, nanopartikula konsentratsiyasi 0.2–0.45% diapazonida bo'lganda sirt g'adir-budurligi qiymatlari kamayadi. Bu holat MoS₂ nanopartikullari kesish zonasiga kirib borib, tribofilm hosil qilishi natijasida ishqalanishning kamayishi bilan izohlanadi. Biroq nanopartikula konsentratsiyasi ortib borishi bilan zarrachalarning aglomeratsiyasi yuzaga keladi va bu sirt g'adir-budurligining ortishiga sabab bo'ladi.

Kesish jarayonining yana bir muhim ko'rsatkichi bo'lgan natijaviy kesish kuchi Fr ham statistik usullar yordamida tahlil qilindi. Kesish kuchi uchun o'tkazilgan ANOVA tahlili modelning statistik jihatdan ishonchli ekanligini ko'rsatdi. Tahlil natijalariga ko'ra, nanopartikula konsentratsiyasi kesish kuchiga sezilarli darajada ta'sir ko'rsatadi. Boshqa omillar, jumladan havo bosimi va havo oqimi sarfi kesish kuchiga nisbatan kamroq ta'sir qiladi. Variatsion tahlil natijalari 5-jadvalda keltirilgan.

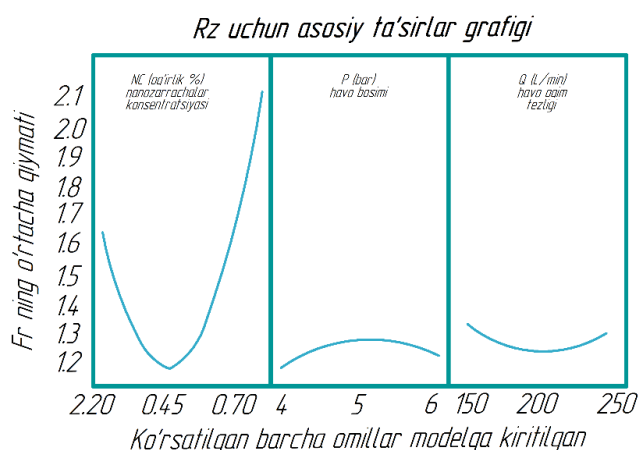
Kesish kuchiga ta'sir qiluvchi omillarni yanada aniqroq baholash uchun Pareto diagrammasi tahlil qilindi. Diagramma natijalari nanopartikula konsentratsiyasi kesish kuchiga eng katta ta'sir ko'rsatishini ko'rsatadi. Bundan tashqari, nanopartikula konsentratsiyasining kvadratik ta'siri ham muhim ahamiyatga ega. Bu holat MoS₂ nanopartikullari kesish yuzalarida tribologik qatlam hosil qilib, kesish jarayonidagi ishqalanish va deformatsiya jarayonlarini o'zgartirishini ko'rsatadi. Pareto diagrammasi 5-rasmda keltirilgan.

Texnologik parametrlarning kesish kuchiga ta'siri asosiy effektlar grafigi orqali ham tahlil qilindi. Grafik natijalari nanopartikula konsentratsiyasi ortishi bilan kesish kuchining sezilarli darajada kamayishini ko'rsatadi. Bu holat MoS₂ nanopartikullarining yuqori moylash xususiyati bilan izohlanadi, chunki nanopartikullar kesish yuzalarida ishqalanishni kamaytiradi va kesish jarayonini barqarorlashtiradi. Havo bosimi va havo oqimi sarfi esa kesish kuchiga nisbatan kamroq ta'sir ko'rsatadi, ammo ular nanofluidning kesish zonasiga yetib borish samaradorligini belgilaydi. Ushbu bog'liqlik 6-rasmda ko'rsatilgan.

Nanopartikula konsentratsiyasi va havo bosimi parametrlarining kesish kuchiga birgalikdagi ta'siri kontur diagrammasi yordamida tahlil qilindi. Diagramma natijalari nanopartikula konsentratsiyasi oshishi bilan kesish kuchining kamayishini ko'rsatadi. Biroq nanopartikula konsentratsiyasining juda yuqori qiymatlarida kesish kuchining ortishi kuzatiladi, bu esa nanopartikullar aglomeratsiyasi va tribologik muhitning barqaror emasligi bilan izohlanadi.



5-rasm. Ishlov berish jarayonidagi kirish omillarining natijaviy kesish kuchi Fr ga ta'sirini ko'rsatuvchi Pareto diagrammasi (A – NC: nanozarrachalar konsentratsiyasi, B – P: havo bosimi, C – Q: havo oqim tezligi)



6-rasm. Ishlov berish jarayonidagi kirish omillarining natijaviy kesish kuchi Fr ning o'rtacha qiymatlariga ta'siri

5-jadval

Natijaviy kesish kuchi Fr uchun ANOVA tahlili natijalari

Manba	DF	Tuzatilgan SS	Tuzatilgan MS	F-qiymat	p-qiymat
Model	9	516,799	57,422	11.69	0.007
Chiziqli	3	166,178	55,393	11.27	0.012
NC (og'.%)	1	165,441	165,441	33.67	0.002
P (bar)	1	701	701	0.14	0.721
Q (L/min)	1	36	36	0.01	0.935
Kvadratik	3	342,414	114,138	23.23	0.002
NC (og'.%) × NC (og'.%)	1	329,613	329,613	67.09	0.000
P (bar) × P (bar)	1	2047	2047	0.42	0.547

$Q \text{ (L/min)} \times Q \text{ (L/min)}$	1	11,319	11,319	2.30	0.190
Ikki omilli o'zaro ta'sir	3	8207	2736	0.56	0.666
$NC \text{ (og' \%)} \times P \text{ (bar)}$	1	6698	6698	1.36	0.296
$NC \text{ (og' \%)} \times Q \text{ (L/min)}$	1	1055	1055	0.21	0.663
$P \text{ (bar)} \times Q \text{ (L/min)}$	1	454	454	0.09	0.773
Xatolik	5	24,566	4913	—	—
Mos kelmaslik	3	24,363	8121	80.04	0.012
Sof xatolik	2	203	101	—	—
Jami	14	541,365	—	—	—

Ekspirimental natijalar asosida texnologik parametrlarning optimal qiymatlarini aniqlash maqsadida optimallashtirish jarayoni amalga oshirildi. Birinchi bosqichda kesish kuchini minimal qiymatga keltirish maqsadida yagona maqsadli optimallashtirish o'tkazildi. Natijalar kesish kuchining eng kichik qiymati nanopartikula konsentratsiyasi taxminan 0.4%, havo bosimi 4 bar va havo oqimi sarfi 192 L/min atrofida bo'lganda kuzatilishini ko'rsatdi.

Keyingi bosqichda sirt g'adir-budurligi va kesish kuchini bir vaqtning o'zida minimallashtirish maqsadida ko'p maqsadli optimallashtirish amalga oshirildi. Natijalar nanopartikula konsentratsiyasi 0.42%, havo bosimi 4.14 bar va havo oqimi sarfi 211 L/min qiymatlarida kesish kuchi va sirt g'adir-budurligining eng maqbul qiymatlari kuzatilishini ko'rsatdi. Ushbu optimal sharoitlarda kesish kuchi $Fr \approx 113.67 \text{ N}$ va sirt g'adir-budurligi $Rz \approx 1.158 \text{ }\mu\text{m}$ qiymatlarda aniqlangan.

MUHOKAMA

Olingan natijalar MoS_2 nanofluidli MQL tizimi qattiq kesish jarayonidagi tribologik sharoitlarni tubdan yaxshilashini tasdiqladi. Sirt g'adir-budurligi va kesish kuchining o'zgarishida nanopartikula konsentratsiyasi eng asosiy boshqaruvchi omil bo'lib xizmat qiladi. Statistik tahlillar va Pareto diagrammalari ushbu parametrning dominant rolini ko'rsatib, sirt sifati bevosita konsentratsiya miqdoriga bog'liqligini isbotladi.

MoS_2 nanopartikullarining qatlamli tuzilishi kesish zonasida metallar kontaktini kamaytiruvchi himoya qatlami hosil qiladi. Bu esa ishqalanishni pasaytirib, mexanik yuklanishlarni kamaytiradi. Biroq konsentratsiya me'yordan oshib ketganda zarrachalar klasterlarga aylanib, sirt sifatini yomonlashtirishi mumkin. Asosiy effektlar grafigi ham konsentratsiya oshishi bilan sirt g'adir-budurligi avval kamayib, so'ngra ortishini ko'rsatdi.

Havo bosimi va oqimi esa nanofluidning kesish zonasiga aerazol shaklida yetib borishini ta'minlaydi. Optimal bosim barqaror tribologik plyonka hosil qilish uchun muhim, chunki haddan tashqari yuqori bosim moylash muhitini zonadan tez chiqarib yuboradi. Kontur diagrammalari orqali nanopartikula konsentratsiyasi va havo bosimining birgalikdagi ta'siri sirt sifatini belgilashi aniqlandi.

Kesish kuchining o'zgarishi ham shunday tendensiyaga ega bo'lib, MoS₂ zarrachalari qirindi hosil bo'lishidagi deformatsiya qarshiligini kamaytiradi. Optimallashtirish natijalari shuni ko'rsatdiki, nanopartikula konsentratsiyasi taxminan 0.4% bo'lganda kesish kuchi minimal qiymatga erishadi. Ko'p maqsadli optimallashtirish esa ham kesish kuchini, ham sirt g'adir-budurligini bir vaqtda minimallashtiruvchi eng samarali texnologik sharoitlarni aniqlash imkonini berdi.

XULOSA

Ushbu tadqiqot natijalari MoS₂ nanopartikullari asosidagi nanofluidli MQL tizimi qattiqashtirilgan 90CrSi po'latni kesishda yuqori texnologik samaradorlikka ega ekanligini tasdiqladi. Tajribalar davomida olingan natijalar sirt g'adir-budurligi va kesish kuchiga nanofluid parametrlarining ta'siri yuqori ekanligini ko'rsatdi.

Statistik tahlil orqali sirt g'adir-budurligi uchun ishlab chiqilgan regressiya modelining aniqlik koeffitsienti $R^2 = 94.90\%$ ni tashkil etdi, bu esa matematik modelning amaliy natijalar bilan yuqori mosligini tasdiqlaydi. Pareto diagrammasiga ko'ra, sirt sifatiga ta'sir qiluvchi eng asosiy va dominant omil nanopartikula konsentratsiyasi bo'lib chiqdi. MoS₂ nanopartikullari kesish zonasida tribologik plyonka hosil qilib, ishqalanishni va deformatsiya qarshiligini kamaytiradi, natijada kesish kuchi pasayib, sirt sifati yaxshilanadi. Biroq konsentratsiyaning me'yordan ortishi zarrachalar aglomeratsiyasiga sabab bo'lib, jarayon barqarorligini pasaytiradi.

Optimallashtirish natijalari kesish jarayoni uchun eng qulay sharoitlarni aniqlab berdi. Yagona maqsadli tahlilda kesish kuchining eng kichik qiymati 0.4% konsentratsiya, 4 bar havo bosimi va 192 L/min havo oqimi sarfida qayd etildi. Ko'p maqsadli optimallashtirish esa kesish kuchi va sirt g'adir-budurligini bir vaqtda minimallashtirish uchun nanopartikula konsentratsiyasi 0.42%, havo bosimi 4.14 bar va havo oqimi sarfi 211 L/min bo'lishi zarurligini ko'rsatdi. Bunday optimal sharoitda kesish kuchi 113.67 N, sirt g'adir-budurligi esa 1.158 μm darajasida bo'lishi aniqlandi.

ADABIYOTLAR

1. Oxunjonov, F. F. O. G. L. (2021). DETALLARNING TASHQI SILINDRIK YUZALARI VA ULARGA ISHLOV BERISH USULLARI. Scientific progress, 2(2), 1132-1135.
2. Oxunjonov, F. F., Sh, R. S., & Umarov, S. A. (2025). Metall kesish jarayonida tribologik juftlikning ishqalanish koeffitsientini modellashtirish va eksperimental natijalar bilan solishtirish. Строительство и образование, 4(5), 285-294.

3. Oxunjonov, F. F., & Rahmonov, S. S. (2025). Avtomatlashtirilgan yig'uv liniyalarida robotlashtirilgan manipulyatorlar qo'llanilishi: samaradorlik va innovatsion yechimlar. *Строительство и образование*, 4(3), 230-235.

4. Oxunjonov, F. F., & Rahmonov, S. S. (2025). Tuproqqa ishlov beruvchi mashinalarning ishchi qismlariga karbid-volfram qotishmalaridan qayta ishlab olingan kukun asosida yeyilishga chidamli qoplamalar qoplash texnologiyasini ishlab chiqish. *Строительство и образование*, 4(3), 128-134.

5. Jalolova, M. M., & Oxunjonov, F. F. (2025). Muqobil energiya manbalarini fazoviy tahlil qilishning nazariy asoslari: gis va masofadan zondlash texnologiyalarining imkoniyatlari. *Строительство и образование*, (3), 226-238.

6. Ismatov, J. F., and J. A. Asqarov. "Transport vositasida muqobil yonilg'ilardan foydalanish hamda vodorod yonilg'isini an'anaviy yonilg'ilarga qo'shib ishlatish istiqbollari." *Строительство и образование* 3 (2025): 289-294.

7. Asqarov, Javohir. "Achievements and future prospects for the use of hydrogen fuel in automobiles." *Academic Journal of Science, Technology and Education* 1.4 (2025): 7-8.

8. Khusanjonov, A., B. Siddiqov, and J. Asqarov. "CALCULATION-EXPERIMENTAL METHOD OF RESEARCH OF EFFICIENCYADORLIK INDICATORS IN ITS MANAGEMENT BY CHANGING THE WORKING CAPACITY OF THE ENGINE USING SALSAL CHARACTERISTICS." *Экономика и социум* 4-1 (2021): 161-164.