

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ
ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ МИНИСТРЛІГІ

«К.И.Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті» коммерциялық
емес акционерлік қоғамы

Ә. Бүркітбаев атындағы Энергетика және машина жасау институты

«Машина жасау» кафедрасы

Батырханов Алтынбек Мұхтарұлы

Сандық бағдарламамен басқарылатын заманауи станоктарда біліктерді механикалық
өңдеудің тиімділігін зерттеу және талдау

МАГИСТРЛІК ДИССЕРТАЦИЯ

7M07112 – Машина жасау өндірісін цифрландыру

Алматы 2026

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ
ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ МИНИСТРЛІГІ

«Қ.И.Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті» коммерциялық
емес акционерлік қоғамы

Ә. Бүркітбаев атындағы Энергетика және машина жасау институты

ӘОЖ 621.9

Қолжазба құқығында

Батырханов Алтынбек Мұхтарұлы

Магистр академиялық дәрежесін алу үшін
МАГИСТРЛІК ДИССЕРТАЦИЯ

Диссертация атауы

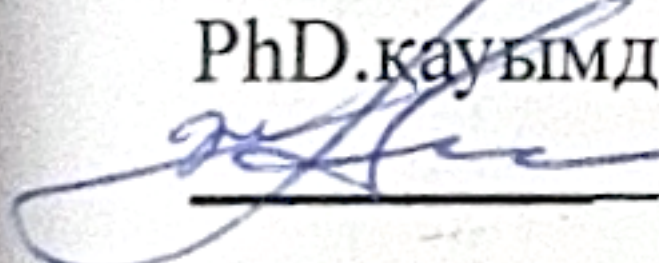
Сандық бағдарламамен басқарылатын заманауи станоктарда
біліктерді механикалық өндеудің тиімділігін зерттеу және
талдау

Дайындау бағыты

7М07112 – Машина жасау өндірісін цифрландыру

Ғылыми жетекші

PhD.қауымд., профессор.

 Абілқайыр Ж.Н.

«19» 01 2026 ж.

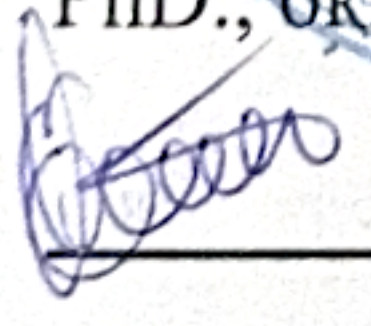
Рецензент

 Тұрдалиев А.Т.

«19» 01 2026 ж.

Норма бақылаушы

PhD., оқытушы.

 Бекбосынова Б.А.

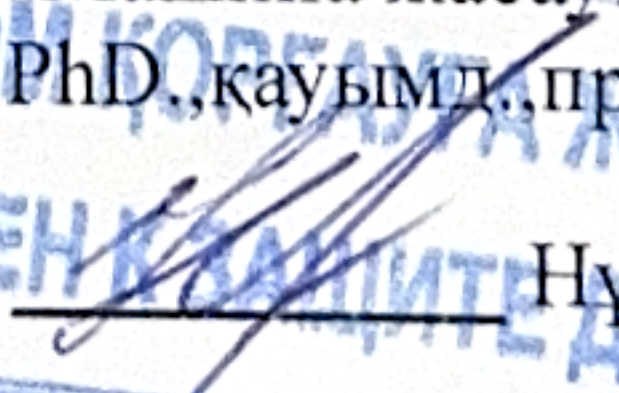
«22» 01 2026 ж.

ҚОРҒАУҒА ЖІБЕРІЛДІ

Кафедра меңгерушісі

«Машина жасау» кафедрасы

PhD., қауымд., профессор.

 Нұғман Е.З.

«22» 01 2026 ж.

Алматы 2026

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ МИНИСТРЛІГІ
«Қ.И.Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті» коммерциялық
емес акционерлік қоғамы

Ә. Бүркітбаев атындағы Энергетика және машина жасау институты

«Машина жасау» кафедрасы

7M07112 – Машина жасау өндірісін цифрландыру

БЕКІТЕМІН

Кафедра меңгерушісі
«Машина жасау» кафедра
PhD. қауымд., профессор.
Нұғман Е.З.

«22» 01 2026 ж.

**Магистрлік диссертацияны орындауға арналған
ТАПСЫРМА**

Магистрант Батырханов Алтынбек Мұхтарұлы

Тақырыбы «Сандық бағдарламамен басқарылатын заманауи станоктарда біліктерді
механикалық өңдеудің тиімділігін зерттеу және
талдау»

Басқарма мүшесі-академиялық мәселелер жөніндегі проректордың 2023 жылғы «04»
желтоқсан №548-П/Ө бұйрығымен бекітілген

Аяқталған диссертацияны тапсыру мерзімі

«22» 01 2026ж.

Магистрлік диссертацияның бастапқы деректері: Қазіргі заманғы машина жасау өндірісі
бөліктерді өңдеудің тиімділігін, дәлдігін және сапасын арттыруға бағытталған
цифрлық технологияларды кең көлемде енгізу бағыты бойынша дамып келеді. Бұл цифрлық
трансформацияның негізгі бағыттарының бірі – сандық бағдарламалық басқаруы бар
станоктарды (СББ), сондай-ақ CAD/CAM жүйелерін және кернеулі-деформацияланған
күйді талдауын қамтитын компьютерлік модельдеу (FEA — Finite Element Analysis)
әдістерін қолдану болып табылады.

Магистрлік диссертацияда әзірлеуге жататын мәселелер тізімі:

а) Біліктерді механикалық өңдеудің теориялық негіздеріне аналитикалық шолу жүргізу
және машина жасау өндірісін цифрландырудың заманауи бағыттарын қарастыру;

ә) СББ жабдығында операцияларды орындау кезінде кесу параметрлерінің геометриялық
дәлдікке және өңделген беттің сапасына әсерін зерттеу;

б) Түрлі технологиялық режимдер мен бекіту шарттарында біліктің кернеулі-
деформацияланған күйін талдау үшін сандық компьютерлік модельдеу (FEA) әдістерін
қолдану;

Графикалық материалдар тізімі (міндетті сызбаларды дәл көрсете отырып):

Жұмыс презентациясы 18 слайдтарда көрсетілген.

Ұсынылатын негізгі әдебиеттер:

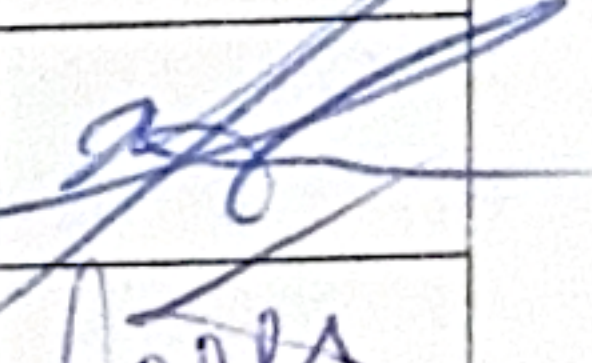
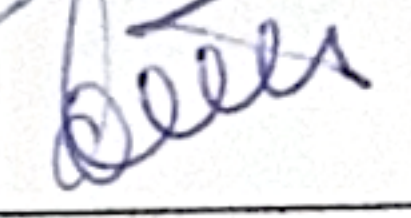
1. Есиркепов, А. Б. Развитие цифровых технологий в машиностроении Казахстана. // *Вестник Satbayev University*. — 2022. — №2. — С. 55–63.

2. Ковалёв, В. С. Технология машиностроения: Учебник для вузов. — М.: Машиностроение, 2018. — 432 с.

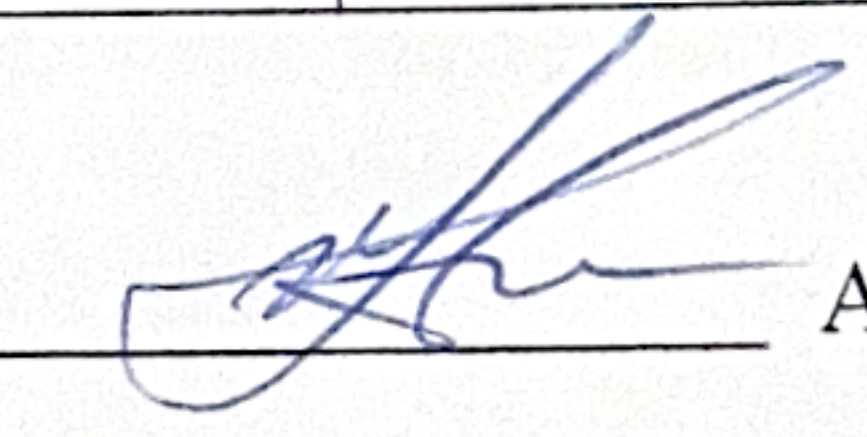
Магистрлік диссертацияны дайындау
КЕСТЕСІ

Бөлімдердің атауы, қарастырылатын мәселелер тізімі	Ғылыми жетекшіге ұсыну мерзімдері	Ескерту
Біліктердің рөлі және жіктелуі	26.09.2025-01.10.2025	Орындалды
Біліктерді өңдеудің технологиялық әдістері	11.10.2025-19.10.2025	Орындалды
Біліктің кернеу-деформацияланған күйін талдауда шектеулі элементтер әдісін (FEA) қолдану	20.10.2025-10.11.2025	Орындалды
Технологиялық процесті модельдеу үшін CAD/CAM жүйелерін қолдану	10.11.2025-12.12.2025	Орындалды

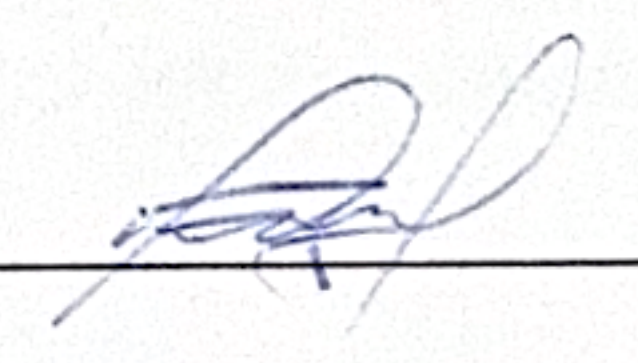
Аяқталған магистрлік диссертация үшін, оған қатысты бөлімдердегі диссертациялар кеңесшілері мен норма бақылаушысының қойған қолдары

Бөлімдердің атаулары	Консультанттар аты-жөні (ғылыми дәрежесі, атағы)	Қол қойылған күні	Қолы
Диссертациялық жұмыстың негізгі бөлімдері	Абілқайыр Ж.Н, PhD.қауымд.,профессор.	19.01.26	
Норма бақылаушы	Бекбосынова Б.А, PhD., оқытушы.	21.01.26	

Ғылыми жетекші

 Абілқайыр Ж.Н.

Білім алушы тапсырманы орындауға алды

 Батырханов А.М.

Күні

« 19 » 01 2026 ж

АНДАТПА

Магистрлік диссертация заманауи сандық бағдарламалық басқаруы бар (СББ) станоктарда біліктерді механикалық өңдеудің тиімділігін зерттеуге және талдауға арналған. Жұмыста «білік» типіндегі бөлшектерді өңдеудің теориялық негіздері қарастырылып, кесу режимдерінің, материал қасиеттерінің және құралдардың дәлдікке, өнімділікке және сапаға әсері зерттелді. Өңдеу процесінің тұрақтылығын арттырып, өндіріс шығындарын төмендетуге мүмкіндік беретін заманауи цифрлық технологиялар мен автоматтандырудың рөліне ерекше назар аударылды.

Диссертацияда СББ жүйесі бар токарлық және фрезерлік станоктарда жүргізілген эксперименттік зерттеулер нәтижелері берілген. Кесу режимдері мен біліктердің сапалық сипаттамалары арасындағы тәуелділіктер анықталды, бұрынғы және заманауи өңдеу әдістеріне салыстырмалы талдау жасалды. Зерттеу негізінде кесу режимдерін оңтайландыру және мониторингтің цифрлық құралдарын енгізу бойынша практикалық ұсыныстар ұсынылды.

АННОТАЦИЯ

Магистерская диссертация посвящена исследованию и анализу эффективности механической обработки валов на современных станках с числовым программным управлением (ЧПУ). В работе рассмотрены теоретические основы обработки деталей типа «вал», исследовано влияние режимов резания, свойств материалов и режущего инструмента на точность, производительность и качество обработки. Особое внимание уделено роли современных цифровых технологий и автоматизации, позволяющих повысить устойчивость процесса обработки и снизить производственные затраты.

В диссертации представлены результаты экспериментальных исследований, проведённых на токарных и фрезерных станках с системой ЧПУ. Установлены зависимости между режимами резания и качественными характеристиками валов, выполнен сравнительный анализ традиционных и современных методов обработки. На основе проведённого исследования разработаны практические рекомендации по оптимизации режимов резания и внедрению цифровых средств мониторинга.

ABSTRACT

The master's thesis is devoted to the study and analysis of the efficiency of mechanical machining of shafts on modern computer numerical control (CNC) machines. The work considers the theoretical foundations of machining shaft-type parts and investigates the influence of cutting parameters, material properties, and cutting tools on machining accuracy, productivity, and quality. Special attention is paid to the role of modern digital technologies and automation in improving process stability and reducing production costs.

The thesis presents the results of experimental studies conducted on CNC turning and milling machines. The relationships between cutting parameters and the quality characteristics of shafts are determined, and a comparative analysis of conventional and modern machining methods is performed. Based on the research, practical recommendations are proposed for optimizing cutting conditions and implementing digital monitoring tools

МАЗМҰНЫ

КІРІСПЕ .	7
1 БІЛІКТЕРДІ МЕХАНИКАЛЫҚ ӨНДЕУДІҢ ТЕОРИЯЛЫҚ НЕГІЗДЕРІ ЖӘНЕ ЖАҒДАЙЫ	10
1.1 Біліктердің рөлі және жіктелуі	10
1.2 Біліктерді өңдеудің технологиялық әдістері	11
1.3 Біліктерді механикалық өңдеудің тиімділік көрсеткіштері	18
1.4 Кесу параметрлерінің өңдеу тиімділігіне әсері	24
1.5 Валдарды механикалық өңдеуді цифрландыру.	30
2 Валдарды өңдеудің тиімділігін зерттеу әдістері	33
2.1 Зерттеудің мақсаттары мен тиімділікті бағалау тәсілдері	33
2.2 Технологиялық процесті модельдеу үшін CAD/CAM жүйелерін қолдану	33
2.3 Валдың кернеу–деформацияланған күйін талдауда шектеулі элементтер әдісін (FEA) қолдану.	34
2.4 Беттің дәлдігі мен микрогеометриясын өлшеу әдістері.	39
2.5 Білікті APM Shaft есептеу	42
	42
3 Біліктерді өңдеудің тиімділігін практикалық зерттеу	51
3.1 Жабдық пен құрал-сайманның сипаттамасы.	51
3.2 Кесу режимдерін таңдау және негіздеу	54
3.3 Өңдеу нәтижелерін талдау және тиімділікті бағалау	56
3.4 Кесу режимдерін оңтайландырудың экономикалық бағалауы.	58
4 Біліктерді өңдеуді цифрландыру және дамудың мүмкіндіктері.	61
4.1 Механикалық өңдеуді жетілдірудегі цифрлық технологиялардың рөлі	61
4.2 Біліктерді өңдеу процесінде автоматтандыру және интеллектуалды басқару жүйелері.	66
4.3 Сандық егіздер және біліктерді өңдеуге енгізу перспективалары	69
ҚОРЫТЫНДЫ	74
Пайдаланылған әдебиеттер тізімі.	76

КІРІСПЕ

Тақырыптың өзектілігі. Қазіргі заманғы машина жасау өндірісі бөлшектерді өңдеудің тиімділігін, дәлдігін және сапасын арттыруға бағытталған цифрлық технологияларды кең көлемде енгізу бағыты бойынша дамып келеді. Бұл цифрлық трансформацияның негізгі бағыттарының бірі – сандық бағдарламалық басқаруы бар станоктарды (СББ), сондай-ақ CAD/CAM жүйелерін және кернеулі-деформацияланған күйді талдауын қамтитын компьютерлік модельдеу (FEA — Finite Element Analysis) әдістерін қолдану болып табылады. Біліктер көптеген машиналар мен механизмдердің құрылымында маңызды орын алады, ал олардың сенімділігі, геометриялық параметрлерінің дәлдігі және өңдеу сапасы жабдықтың ұзақ мерзімділігі мен тұрақты жұмысын тікелей анықтайды. Дәстүрлі механикалық өңдеу әдістерін қолданғанда қажетті сапа мен өнімділік көрсеткіштеріне қол жеткізу көбінесе айтарлықтай уақыттық және материалдық шығындарсыз мүмкін болмайды. Индустрия 4.0 концепциясы жағдайында және ақылды (смарт) өндіріс форматына көшу кезеңінде бұйымның өмірлік циклінің барлық кезеңдерінде — жобалаудан бастап модельдеуге, технологиялық процесті мониторингілеу мен талдауға дейін — цифрлық құралдарды интеграциялау ерекше маңызға ие.

Цифрлық егіздер, CAD/CAM/CAE автоматтандырылған жүйелері және Интернет заттары (IoT) технологияларын қолдану өңдеу дәлдігін арттыруға, өндірістік циклді қысқартуға және өнімнің өзіндік құнын төмендетуге мүмкіндік береді.

Осылайша, заманауи СББ жабдығын және цифрлық технологияларды қолдана отырып, біліктердің механикалық өңдеу тиімділігін зерттеу мен бағалау өндірістік процестерді жетілдіруге және машина жасауды цифрландыру деңгейін арттыруға бағытталған өзекті ғылыми-практикалық міндет болып табылады.

Зерттеудің мақсаты мен міндеттері

Осы зерттеудің мақсаты — өндірістік процестерді жобалау, модельдеу және талдау бойынша цифрлық технологияларды енгізу арқылы сандық бағдарламалық басқаруы бар (СББ) станоктарда біліктерді механикалық өңдеу тиімділігін арттыру.

Қойылған мақсатқа қол жеткізу үшін жұмыс аясында келесі негізгі міндеттер анықталып, шешілді:

1. Біліктерді механикалық өңдеудің теориялық негіздеріне аналитикалық шолу жүргізу және машина жасау өндірісін цифрландырудың заманауи бағыттарын қарастыру.
2. СББ жабдығында операцияларды орындау кезінде кесу параметрлерінің геометриялық дәлдікке және өңделген беттің сапасына әсерін зерттеу.
3. Түрлі технологиялық режимдер мен бекіту шарттарында біліктің кернеулі-деформацияланған күйін талдау үшін сандық компьютерлік модельдеу (FEA) әдістерін қолдану.

4. Басқару бағдарламаларын әзірлеу және кесу параметрлерін оңтайландыру процесінде CAD/CAM жүйелерін қолданудың тиімділігін бағалау.
5. Цифрлық технологияларды және дәстүрлі механикалық өңдеу әдістерін қолдану кезіндегі дәлдік, өнімділік және тұрақтылық көрсеткіштеріне салыстырмалы талдау жүргізу.
6. Модельдеу, мониторинг және бейімделгіш басқару жүйелерін интеграциялауды қамтитын цифрлық өндіріс құралдары негізінде біліктерді өңдеу тиімділігін арттыру бойынша ұсынымдар әзірлеу.

Зерттеу объектісі мен пәні цифрлық өндіріс жағдайында заманауи сандық бағдарламалық басқаруы бар (СББ) станоктарда орындалатын біліктерді механикалық өңдеу процесі.

Зерттеу пәні – CAD/CAM жүйелері, соңғы элементтер әдісі (FEA), Интернет заттары (IoT) технологиялары сияқты цифрлық технологиялардың, сондай-ақ кесу режимдерінің біліктерді өңдеу тиімділігіне әсер ету заңдылықтары. Тиімділік көрсеткіштері ретінде өңдеудің дәлдігі, бет сапасы және технологиялық процестің өнімділігі қарастырылады.

Зерттеу әдістері

Осы зерттеуді орындау барысында біліктерді механикалық өңдеу үдерістеріне кешенді баға беруге бағытталған жүйелік талдау, салыстырмалы және эксперименттік зерттеу әдістері, сондай-ақ есептік модельдеу әдістері қолданылды.

Дайындамалардың кернеулі-деформацияланған күйін зерттеу үшін жүктемелер мен деформациялардың таралуын сандық түрде модельдеуге мүмкіндік беретін соңғы элементтер әдісі (Finite Element Analysis — FEA) пайдаланылды.

Өңдеу траекторияларын құру және басқару бағдарламаларын әзірлеу технологиялық процесті нақты виртуалды баптауды қамтамасыз ететін интеграцияланған CAD/CAM жүйелерін қолдану арқылы жүзеге асырылды.

Зерттеудің эксперименттік бөлігі сандық бағдарламалық басқаруы бар (СББ) заманауи жабдықта жүргізіліп, онда дәлдік параметрлері мен беттік кедір-бұдырлық көрсеткіштері жоғары дәлдікті бақылау құралдары арқылы өлшенді.

Алынған нәтижелерді өңдеу және интерпретациялау үшін математикалық статистика әдістері, сондай-ақ өндірістік көрсеткіштерді талдаудың цифрлық құралдары қолданылды. Бұл ғылыми қорытындылардың дәлдігі мен объективтілігін қамтамасыз етуге мүмкіндік берді.

Зерттеудің ғылыми жаңалығы және практикалық маңыздылығы

Жүргізілген зерттеудің ғылыми жаңалығы — жаңа буындағы цифрлық технологияларды пайдалана отырып, біліктерді механикалық өңдеу үдерістерінің тиімділігін бағалауға арналған кешенді тәсілдің әзірленуі және жүзеге асырылуы.

Ұсынылған тәсіл CAD/CAM-модельдеуді, кернеулі-деформацияланған күйдің сандық талдауын (FEA), сондай-ақ өндірістік параметрлердің цифрлық

мониторинг әдістерін біртұтас талдау және оңтайландыру жүйесіне біріктіреді.

Бұған дейінгі зерттеулерден айырмашылығы — осы жұмыста сандық жобалау, модельдеу және аналитикалық бағалау құралдарын интеграциялауға ерекше назар аударылған. Бұл СББ станоктарында өңдеу дәлдігін, тұрақтылығын және өнімділігін арттыруға бағытталған.

Алынған нәтижелердің практикалық маңыздылығы — олардың өнеркәсіптік кәсіпорындарда білік тәрізді бөлшектерді нақты өндірістік жағдайларда тиімді және сапалы өңдеуді арттыру мақсатында қолданылу мүмкіндігінде.

Әзірленген әдістемелік ұсынымдар мен тиімділікті талдау алгоритмі технологиялық процестерді жобалау, кесу режимдерін оңтайландыру, сондай-ақ «ақылды өндіріс» (Smart Manufacturing) тұжырымдамасы аясында цифрлық шешімдер мен интеллектуалды басқару жүйелерін енгізу кезінде қолданылуы мүмкін.

1 БІЛІКТЕРДІ МЕХАНИКАЛЫҚ ӨНДЕУДІҢ ТЕОРИЯЛЫҚ НЕГІЗДЕРІ ЖӘНЕ ЖАҒДАЙЫ

1.1 Біліктердің рөлі және жіктелуі

Біліктер — механизм бөлшектері арасындағы айналу моментін беру, айналыс бағытын белгілеу және кинематикалық байланыстарды қамтамасыз ету үшін қолданылатын машина жасау тораптарының негізгі құрылымдық элементтерінің бірі. Біліктердің дәлдігі мен сенімділігі тірек подшипниктерінің ұзақ мерзімділігіне, қосылыс сапасына және агрегаттардың жалпы тұрақты жұмыс істеуіне тікелей әсер етеді.

Функционалдық мақсаты бойынша біліктер бірнеше түрге бөлінеді:

- қуатты беруге арналған жетекші біліктер;
- қозғалысты тарату және түрлендіру функцияларын орындайтын аралық біліктер;
- механизм элементтерін орнату және бекітуге қызмет ететін тірек біліктер;
- айналу жиілігі диапазонына қарай жіктелетін тезжүрісті және баяужүрісті біліктер.

Құрылымдық орындалуы бойынша біліктер төмендегі түрлерге бөлінеді:

- тұтас және қуыс;
- сатылы, конусты, шлицті, жұдырықшалы, сондай-ақ подшипникке арналған мойындары бар біліктер;
- редукторлар, шкивтер немесе муфталар сияқты қатты бекітілген элементтері бар бұйымдар.

Біліктерге қойылатын негізгі талаптар мыналар:

- геометриялық дәлдікті қамтамасыз ету (әсіресе, соосыткі және минималды биение көрсеткіштері);
- жұмыс беттерінің талап етілген кедір-бұдырлық параметріне қол жеткізу;
- иілу, бұралу және аралас күштердің әсері кезінде беріктік пен қатаңдықты қамтамасыз ету;
- конструкцияның жоғары технологиялылығы және жөндеуге жарамдылығы.

Аталған талаптар біліктерді ЧПУ станоктарында өндіру кезінде дайындама материалының таңдалуына, термиялық өңдеу түріне, кесу режимдеріне және технологиялық өңдеу маршрутына шешуші әсер етеді.[1].

**1.1-кесте — Біліктердің түрлері және олардың сипаттамалары
(материалдары, дәлдік талаптары, қолданылатын операциялар)**

№	Білік түрі	Қолданылатын материалдар	Дәлдікке қойылатын талаптар	Негізгі технологиялық операциялар
1	Жетек білігі	40X, 45, 42CrMo4 болаттары, сирек легірленген	IT6–IT8, Ra ≤ 0,8 мкм	Қара және таза жону, тегістеу, термиялық өңдеу, теңгеру
2	Аралық білік	45, 40X, 35Г2 болаты, СЧ20 шойыны	IT7–IT9, Ra ≤ 1,25 мкм	Жону, ойықтарды фрезерлеу, шлицтерді өңдеу, нормализация, тегістеу
3	Тірек білігі	40 болаты, 12X18Н10Т (тот баспайтын)	IT6–IT8, Ra ≤ 0,63 мкм	Дәл жону, суперфиниш, хондау, соғу ауытқуын бақылау
4	Жоғары айналымды білік	Легірленген болаттар 40ХН, 30ХГСА	IT5–IT7, Ra ≤ 0,4 мкм	ЖЖТ (ТВЧ) арқылы шынықтыру, тегістеу, соңғы әрлеу, теңгеру
5	Төмен айналымды білік	35, 40X болаты, СЧ25 шойыны	IT8–IT10, Ra ≤ 2,5 мкм	Қара жону, ұңғылау, жырашықтар мен шпонкалық ойықтарды өңдеу
6	Қуыс білік	30ХГСА, 40ХН, алюминий қорытпалары	IT7–IT9, Ra ≤ 1,25 мкм	Жону, ұңғылау, тегістеу, теңгеру
7	Сатылы білік	45, 40X, 38ХН3МА болаттары	IT6–IT8, Ra ≤ 0,8 мкм	Көпоперациялы жону, фаскаларды фрезерлеу, коаксиалдылықты бақылау
8	Шлицті білік	40X, 20ХН3А болаттары	IT6–IT7, Ra ≤ 0,63 мкм	Шлицтерді кесу, тегістеу, шынықтыру, профильді бақылау
9	Кулачокты білік	45, 40X, легірленген болаттар	IT6–IT8, Ra ≤ 0,8 мкм	Профильдерді фрезерлеу, тегістеу, термиялық өңдеу, профильді бақылау
10	Редукторлық білік-тісті доңғалақ	20ХН3А, 18ХГТ, 40X	IT6–IT8, Ra ≤ 0,63 мкм	Токарлық-фрезерлік өңдеу, шынықтыру, тістерді тегістеу

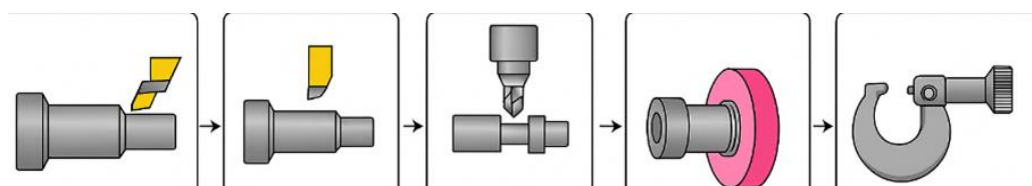
1.2 Біліктерді өндеудің технологиялық әдістері

Біліктерді механикалық өңдеу — негізгі цилиндрлік және пішінді беттерді, сондай-ақ мойындарды, арналарды, бұрандалы элементтерді қалыптастыруға, сондай-ақ берілген геометриялық дәлдікті және бет

микрогеометриясының қажетті параметрлерін қамтамасыз етуге бағытталған операциялар кешені.

1. Технологиялық операциялардың типтік тәртібі:

- Шала айналдыру (черновое точение) — базалық беттерді жасау, негізгі қалдықты алу, дайындаманың түзу және соосыткік орналасуын қамтамасыз ету.
- Жартылай және соңғы айналдыру (полуточное и чистовое точение) — мойындарды, фаскаларды және галтелдерді соңғы түрде қалыптастыру, келесі операциялар — жылтырату немесе термиялық өңдеуге дайындау.
- Сверление, растачивание, зенкерование — қажет болған жағдайда тесіктер, арналар немесе бұрандалы учаскелер жасау үшін орындалады.
- Шпонкалы және шлицті арналарды фрезерлеу — фрезерлік станоктарда немесе жетек құралымен токарлық-фрезерлік орталықтарда жүзеге асырылады.
- Термиялық өңдеу (нормализация, цементтеу, күйдіру, отпуск) — материалдың беріктігін арттыру және кейінгі деформацияларды жою үшін жүргізіледі.
- Цилиндрлік беттерді жылтырату (сыртқы, ішкі) — минималды рұқсаттар мен кедір-бұдырлық параметрлеріне қол жеткізуді қамтамасыз етеді; қажет болса, дәлдеу немесе суперфиниш жүргізіледі.
- Геометрияны бақылау және балансировка — радиалды биение, соосыткік сәйкестік және шеттердің перпендикулярлығы параметрлері тексеріледі. [2].



1.2 - сурет – Білікті өңдеудің типтік технологиялық маршрутының сызбасы

1)Қаралтым жону

- дайындаманың негізгі қоспасын (припуск) алып тастау,
- базалық беттерді қалыптастыру;

2) Таза жону

- дәлдікті арттыру,
- бет сапасын жақсарту;

3) Фрезерлеу

- шпонкалық ойықтарды, шлицтерді және басқа элементтерді өңдеу

4) Ажарлау (шлифтеу)

- жоғары дәлдікке қол жеткізу,
- бет кедір-бұдырлығын (R_a) минимал деңгейге дейін төмендету

5) Бақылау

- өлшемдер мен бет параметрлерін өлшеу,

2. Негізгі өңдеу әдістері және олардың тағайындалуы

- Айналыру (соның ішінде көпосыт және жетек құралымен) — цилиндрлік және конустық беттерді қалыптастырудың әмбебап әдісі, шала және соңғы өңдеу кезеңдерінде қолданылады.
- Фрезерлеу — тегіс беттер, шпонкалы және шлицті арналарды жасау үшін қолданылады; токарлық-фрезерлік орталықтарда белсенді жүзеге асырылады.
- Жылтырату (сыртқы, ішкі, орталықсыз) — минималды рұқсаттар мен Ra және Rz кедір-бұдырлық параметрлеріне қол жеткізу үшін, сондай-ақ формадағы ақаулар мен толқындылықты жою үшін қолданылады.
- Хонингтеу және суперфиниш — бетінің жоғары тазалығын және подшипниктерді орналастыруға арналған оңтайлы контактты беттерді қамтамасыз етеді.
- Бұрғылау және бұрандалау (резьбонарезка және бұранданы фрезерлеу) — жоғары дәлдікпен орындалады, соның ішінде біріктірілген токарлық орталықтарда операциялар жүргізіледі.

3. СББ станоктарында біліктерді өңдеудің ерекшеліктері

- Технологиялық операцияларды интеграциялау — Y осімен, қарсы шпиндельмен және жетек құралымен жабдықталған заманауи токарлық-фрезерлік орталықтар бір немесе екі орнату арқылы толық циклді орындауға мүмкіндік береді, базалау қателерін минимизациялайды.
- Геометриялық тұрақтылықты сақтау — температуралық өзгерістерді компенсациялау, тозуды автоматты түзету және беріліс пен жылдамдықты бейімделгіш басқару арқылы қол жеткізіледі.
- Дәлдік пен бет сапасын арттыру — прецизионды патрондар, люнеттер және артқы бабкаларды қолдану, сондай-ақ CAD/CAM жүйелерінде өңдеу траекторияларын оңтайландыру арқылы қамтамасыз етіледі.
- Құралдар және салқындату жүйелері — қатты легирленген, CBN, PCD және cermet құралдар қолданылады; СОЖ жоғары қысымда немесе MQL технологиясы бойынша беріледі, бұл жылу режимін тұрақтандыруға және стружканы шығарып жіберуге мүмкіндік береді. [3].
- Процесті онлайн-мониторинг — кіріктірілген щуптар мен биение сенсорлары in-process gauging қамтамасыз етеді, бұл өлшемдерді жылдам түзетуге және C_p/C_{pk} тұрақты көрсеткіштерін сақтауға мүмкіндік береді.



1.3-сурет — Заманауи СББ токарлық-фрезерлік орталық DMG MORI CTX Alpha 50

1.2-кесте — Өңдеу әдістерін дәлдік, Ra және өнімділік бойынша салыстыру

№	Өңдеу әдісі	Сипаттамалық дәлдік, IT	Бет кедір-бұдырлығы Ra, мкм	Өнімділік	Ескертпелер / қолдану саласы
1	Қара жону	IT10–IT12	6,3–12,5	Жоғары	Негізгі припускіні алу, базалық беттерді қалыптастыру
2	Жартылай таза жону	IT8–IT10	2,5–6,3	Орташа	Таза өндеуге немесе тегістеуге дайындау
3	Таза жону (соның ішінде CBN)	IT7–IT8	0,8–2,5	Орташа–жоғары	Термиялық өндеуден кейін, бет сапасының жоғары деңгейін қамтамасыз етеді
4	Фрезерлеу	IT8–IT10	1,6–6,3	Орташа	Ойықтарды, шлицтерді және жазық беттерді өңдеу
5	Тегістеу (сыртқы/ішкі)	IT6–IT7	0,2–0,8	Төмен–орташа	Фиништік операция, жоғары дәлдік пен сапаға қол жеткізу
6	Суперфиниш / Хондау	IT5–IT6	0,05–0,2	Төмен	Подшипник мойыншаларының дәлдігін және жанасу бетін арттыру
7	Ысқылау / Полирлеу	IT4–IT5	0,01–0,1	Өте төмен	Ерекше дәл және жауапты беттер үшін қолданылады

4. Соңғы өңдеу әдісін таңдау: катты айналдыру және жылтырату
 – Катты айналдыру (CBN) — шағын сериялар мен күрделі профильдер үшін тиімді, қайта баптауда икемділікті қамтамасыз етеді, бет кедір-бұдырлығы $Ra \approx 0,4–0,8$ мкм; дегенмен «станок–құрал–бекіту» жүйесінің қаттылығын талап етеді және вибрацияға сезімтал.

– Жылтырату — ірі сериялы өндіріс және форма мен толқындылыққа қатал талаптар кезінде артықшылық береді; $Ra \leq 0,2\text{--}0,4$ мкм және өлшемдердің жоғары қайталанушылығын тұрақты қамтамасыз етуге мүмкіндік береді.

5. Базалауды басқару және соққыларды бақылауы

– Жоғары дәлдікті орталықтар мен люнеттерді қолдану, қайта бекітулер санын азайту, технологиялық базаларды конструкторлық базалармен үйлестіру.

– Подшипниктерге арналған мойындардың радиалды соққы базаларға қатысты бақылау кіріктірілген өлшеу жүйелері арқылы жүзеге асырылады.

Қолдану саласы және типтік талаптар

Қатты айналдыру (hard turning) — CBN/керамикалық құралдарды қолданып, қатайтылған немесе қатайтылып, отпускталған күйдегі (әдетте 45...65 HRC) дайындамаларды соңғы айналдыру.

Жылтырату — минималды форма қателері мен бет кедір-бұдырлығын қамтамасыз ететін абразивті соңғы өңдеу (сыртқы цилиндрлік/орталықсыз).

1.3-кесте – Қол жеткізуге болатын көрсеткіштер (нұсқаулықтар)

Көрсеткіш	Қатты жону	Тегістеу
Өлшем дәлдігі	IT6–IT7 (жергілікті IT6)	IT5–IT6 (тұрақты IT6)
Пішін қателіктері (дөңгелектік/цилиндрлік)	3–5 мкм ($L/D \leq 8$ кезінде)	1–3 мкм ($L/D \leq 15$ кезінде)
Ra (типтік жағдайларда)	0,20...0,40 мкм (жіңішке берілісте 0,1-ге дейін)	0,05...0,20 мкм
Бір өтуде алынатын припуск	0,05...0,30 мм	0,005...0,05 мм (таза режимдерде)
Цикл өнімділігі	Қысқа серияларда және аз операциялы өңдеуде жоғары	Ағынды өндірісте, тегістеу станоктары паркі болғанда жоғары
Термиялық зақымдану қаупі	Қызып кету кезінде «ақ қабаттың» пайда болуы мүмкін	Тегістеу күйіктері, прижогтар, термиялық жарықтар
Қалдық кернеулер	Көбінесе сығымдаушы (қолайлы)	Күйік кезінде созылмалы болуы мүмкін
Құрал-сайман / логистика	Әмбебап патрон/орталықтар, учаскені ауыстырмай өңдеу	Арнайы тегістеу оснасткасы, жеке учаске қажет

Форма мен Ra -ға орташа талаптар кезінде (жалпы машина жасауға арналған подшипниктік білік, IT6–IT7, $Ra \approx 0,2\text{--}0,4$) қатты айналдыру жиі үнемді болады; формаға қатаң рұқсаттар, минималды Ra және/немесе үлкен L/D кезінде жылтырату тұрақтырақ болып келеді.

Әр түрлі қаттылықтағы біліктерді таңдау критерийлері (L/D қатынасы)
Дайындаманың қаттылығы — үдерістің тұрақтылығының басты факторы. Болжамдық жіктеуді қолданамыз:

- Қатты: $L/D \leq 6$
- Орташа: $6 < L/D \leq 12$
- Иілгіш: $L/D > 12$

Үдерісті таңдауға арналған ұсынымдар

1. $L/D \leq 6$ (қатты):
 - IT6–IT7 дәлдігі және $Ra \geq 0,2$ мкм жағдайында, бірлік/шағын сериялар үшін қатты айналдыру артықшылықты.
 - $Ra < 0,2$ мкм тұрақты болуы немесе цилиндрлік $< 2–3$ мкм қажет болған жағдайда жылтырату қолданылады.
2. $6 < L/D \leq 12$ (орташа):
 - Міндетті қолдау (артқы бабка/люнет), төмендетілген жылжыту f және алу a_p шарттарында қатты айналдыру мүмкін; форма бойынша қатаң талап қойылмаған мойындарға тиімді.
 - Формаға/радиалды биеге жоғары талаптар қойылғанда және сериялы өндіріс кезінде жылтырату артықшылықты.
3. $L/D > 12$ (иілгіш):
 - Жылтырату — негізгі стратегия (орталықтарда, люнеттермен).
 - Қатты айналдыру тек арнайы базалау схемаларында және өте жұмсақ режимдерде ғана рұқсат етіледі — жалпы жағдайда экономикалық және технологиялық тұрақсыз болып келеді. [3].

Қосымша критерийлер

Материал/қаттылық: $HRC > 58$ және тозуға төзімді болаттарда CBN айналдыру мүмкін, бірақ режимдер терезесі тарылады; жылтырату аз сезімтал.

- Қажетті форма/геометрия: цилиндрлік/дөңгелектік $< 2–3$ мкм, конустық < 2 мкм/100 мм жағдайында көбінесе жылтырату қолданылады.
- Ra және микропрофиль: $Ra \leq 0,1$ мкм кезінде тұрақтылығы үшін жылтырату; $Ra = 0,2–0,4$ мкм айналдыру арқылы қол жеткізуге болады.
- Сериялылық/логистика: бірлік және шағын партиялар, біріктірілген маршруттар («қатты айналдыру арқылы қатайтудан кейін» жылтыратудың орнына) әдетте циклді және қайта баптауды қысқартады.
- Экономика: егер жылтырату паркі жоқ немесе бос емес болса — қатты айналдыру операцияаралық тоқтаулар мен тасымалдауды азайтады.

Формадағы типтік қателіктер және себептері

1. Конустықтық (бір шетке қарай тарылу) — соосыткі сәйкессіздік, термореформациялар, дайындаманың симметриясыз тірек жағдайында серпімді деформациясы, бағыттағыштар/станина тозуы.
2. Бочка тәрізді/седло тәрізді — кесу жүктемесі кезінде біліктің иілуі, орталықтағы жеткіліксіз қолдау.
3. Овальдық/көпжақтылық — бекіткіш элементтердің биені, дисбаланс, автотрепет (chatter), патрон/орталық мінсіз болмауы.

4. Толқындылық/chatter — кескіш–ұстағыш–шпиндель жүйесінің қаттылығының жоғарылауы, беріліс қадамы мен айналу жиілігінен резонанстар, үлкен созылыстар.

5. «Торға» цилиндрлілікті бұзу — жүктемелердің біркелкі болмауы, термоқыздыру, артқы бабканың күшінің тербелісі.

6. Жергілікті күйіп қалулар/«ақ қабат» — $v-f-a_p$ /СОЖ комбинациясының сәтсіздігі кезінде қызу (айналдыру және жылтырату үшін).

Қателіктерді төмендету әдістері (құрал-жабдықтар және режимдер)
Люнеттер (қолдаулар)

Түрлері: тұрақты (жүгіретін) және қозғалмалы (роликті). Соңғы өңдеу үшін — тырнақтарды болдырмау үшін роликті артықшылықты.

Орналастыру:

– бочка тәрізділік кезінде — ең үлкен иілу аймағына орнату (әдетте, пролеттің ортасы) және/немесе ұзын бөлшектерде бірнеше люнет қолдану;
– конустықтық кезінде — люнеттің орнын түзету және орталықтармен соосыті сәйкестікті тексеру.

– Қысым баптауы: минималды жеткілікті, симметриялы; роликтердің қызуын бақылау.

– Башмақ материалдары: сырғанау үшін мыс/композиттер, роликтер — жоғары қаттылық пен дәл геометрияға ие.

Артқы бабка (орталық арқылы қолдау)

– Орталық түрі: соңғы өңдеу кезеңдері үшін айналмалы (live center) артықшылықты; конус бұрышы мен контакт дақ жағдайы маңызды.

– Осьтік күш: артық күш → патронға конустықтық; аз күш → вибрация. Білік диаметрі мен массасына сәйкес таңдау; «суық/жылы» тексеру (қызған кезде ұзындығы алдын ала керілуін өзгертеді).

– Соосыті сәйкестік тексеру: орталықтарға орнатқанда индикатор арқылы міндетті тексеру.

Балансировка және бекіту/базалау

– Патрон/құрал-жабдық/құралдың балансын жасау (әсіресе $n > 1500$ –2000 айн/мин және жұқа біліктерде).

– Ұстағыш пен дайындаманың созылуын (ұзын шығысын) минимизациялау.

– Жұдырықтар/цангалар сапасы және бекітулердің жағдайы — овальдық/биенеудің тікелей себептері.

– $L/D > 6$ болғанда қос базалау (патрон + артқы бабка/люнет); $L/D > 10$ –12 болғанда «орталықтарда» өңдеуге өту.

Кесу режимдері және құрал

– Құрал: қатты айналдыру үшін — оң микрогеометриялы CBN (PCBN), минималды күш үшін ұш радиусы кішкентай; жылтырату үшін — дұрыс байланыс пен тұрақты түзетуімен Al_2O_3/CBN шеңберлері.

– Жылжыту f : R_a мен толқындылықтың негізгі реттеушісі; вибрация болғанда — f -ті азайту, v -ті драстикалық төмендетпес бұрын қолдау/баланс қолдану.

– Жылдамдық v : жеткілікті қаттылық болмаған жағдайда тым жоғары болса, термо-жүктемелі арттырады және chatter-ге бейім етеді; v -ті арттыру ақылмен, вибрация спектрін бақылау арқылы.

- Тереңдік a_p : a_p -ті азайту кесу күшін және иілуін төмендетеді; соңғы өндеуде — 0,05...0,15 мм.
- СОЖ/MQL: қатайтылған болаттарды айналдыру үшін жиі — MQL/минималды беріліс (жылу енгізуді азайту, форманы тұрақтандыру). Жылтырату үшін — тұрақты беріліс, сүзгілеу, байланыс аймағына жеткілікті мөлшерде пайдалану.
- Жылу тұрақтылығы: дайындаманы «термостабильді» күйге дейін ұстап тұру, станок түйіндерін қыздыруды минимизациялау (калибрлеуге дейін алдын ала қыздыру).

Типтік технологиялық схемалар

А) Қатты айналдыру (қатты/орташа біліктер, $L/D \leq 10$):

Базалау: патрон + артқы бабка (live center); $L/D > 6$ болса — ортасында роликті люнет қосу.

Шала түзету (қажет болса) → жартылай өтпе → соңғы өтпе минималды a_p және f -пен.

Бақылау: әр өтпеден кейін биене/дөңгелектік; люнет қысымдарын түзету.

$Ra \leq 0,2$ мкм болса — жұқа өтпе $f \leq 0,1$ мм/айн, вибрацияны бақылау.

В) Жылтырату (орташа/иілгіш біліктер, $L/D > 10$):

«Орталықтарда» орнату, роликті люнет (ұзын пролеттерде екі люнет).

Шеңберді түзету, балансын бақылау.

Ортанша кіріс/шығыс өлшемдерін тексеру; жылжыту жылдамдығы мен алу тереңдігін түзету.

Микро жылжыту мен термоқабылдауды бақылау арқылы соңғы жылтырату (жергілікті күйіп қалуларды болдырмау үшін).

1.3 Біліктерді механикалық өндеудің тиімділік көрсеткіштері

Біліктердің геометриялық дәлдігі өлшемдік, форма қалыптастыратын және позициялық компоненттерді қамтитын сипаттамалардың жиынтығымен анықталады.

Негізгі көрсеткіштерге мыналар жатады:

- Өлшемдік дәлдік — номиналды өлшемдерге сәйкестігі, подшипниктік беттер мен мойындарға IT6–IT9 квалітеттеріне сәйкес рұқсаттарды сақтау;
- Форма дәлдігі — цилиндрлік, дөңгелектік және тік сызықтылық бойынша ауытқулар;
- Орналасу дәлдігі — соосьтік сәйкестік, радиалды биенеу және шеттердің перпендикулярлығы параметрлері.

Дәлдікті бағалау шектік ауытқулар және радиалды биенеу (T_{runout}) мен соосьтік сәйкестік көрсеткіші ($\Delta(c_{oax})$) арқылы жүзеге асырылады.

Сериялы және ірі көлемді өндірісте технологиялық процесс мүмкіндігінің интегралды статистикалық көрсеткіштері қолданылады, олар келесі формулалармен анықталады:

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma}, C_{pk} = \min\left(\frac{USL - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - LSL}{3\sigma}\right), \quad (1.1)$$

мұндағы USL және LSL — рұқсаттың жоғарғы және төменгі шектері, μ — параметрдің орташа мәні, σ — өлшемдердің стандартты ауытқуы.

Осы коэффициенттер технологиялық процестің тұрақтылығы мен басқарылуын сандық түрде бағалауға, сондай-ақ өндеудің өнеркәсіптік сапа талаптарына сәйкестігін анықтауға мүмкіндік береді.

Беттің сапа параметрлері

Бет кедір-бұдырлығы және микрогеометрия көрсеткіштері

Біліктердің бетінің микрогеометриясының негізгі сипаттамалары:

- профильдің орташа арифметикалық биіктігі (R_a),
- он нүктеге сәйкес бет кедір-бұдырлығының биіктігі (R_z),
- сондай-ақ толқындылық көрсеткіші (W_t).

Подшипниктерге арналған мойындар үшін өндеу әдісіне байланысты әдетте келесі параметрлерге қол жеткізіледі:

– жылтырату немесе суперфиниш өндеу кезінде — R_a мәндері беттің жоғары тазалық класына сәйкес;

– CBN-құралмен соңғы айналдыру кезінде — дәлдік қосылыстар талаптарына жақын көрсеткіштер.

Бет кедір-бұдырлық параметрлерін бақылау контакттік профилометрлер арқылы немесе щуптық датчиктері бар кіріктірілген in-process өлшеу жүйелері арқылы жүзеге асырылады, олар өндеу барысында беттің күйін үздіксіз бақылауды қамтамасыз етеді.

Процестің өнімділігі

Механикалық өндеудің өнімділігі металды алу жылдамдығы және технологиялық циклді орындау уақыты арқылы анықталады.

Есептеу тәуелділігі келесі түрде болады:

$$Q = a_p \cdot f \cdot v \text{ [мм}^3\text{/мин]}, \quad (1.2)$$

мұндағы a_p — кесу тереңдігі, f — жылжыту, v — кесу жылдамдығы, сондай-ақ қосымша уақыт (t_{aux}) ескеріледі, оған қайта баптау, өлшеу және дайындаманы қайта орнату кіреді.

Өндірістік учаскенің тиімділігін бағалау үшін OEE (Overall Equipment Effectiveness) интегралды көрсеткіші қолданылады, ол келесі өрнек бойынша есептеледі:

$$OEE = Availability \times Performance \times Quality,$$

мұндағы жабдықтың қолжетімділігі, процестің өнімділігі және шығарылатын өнім сапасының коэффициенттері ескеріледі.

Құралдың беріктілігі

Кесу процесінің тұрақтылығын және эксплуатациялық шығындар деңгейін сипаттайтын негізгі параметрлердің бірі — құралдың шекті тозуға дейінгі ресурсы (T).

Рационалды кесу режимдерін анықтау үшін Тейлор эмпирикалық тәуелділігі қолданылады, ол кесу жылдамдығы мен құрал беріктілігі арасындағы байланысты көрсетеді:

$$vT^n = C \Rightarrow v = \frac{C}{T^n}, \quad (1.3)$$

мұндағы v — кесу жылдамдығы, T — құралдың беріктілігі (тозуға дейінгі уақыт), n және C — тәжірибелік коэффициенттер, олар дайындама мен құрал материалының үйлесіміне байланысты.

Тозу критерийі ретінде әдетте тозу алаңының ені (VB) қабылданады, ол сынақ кезінде тіркеледі.

Өндеудің экономикалық бағасы

Бір өнім бірлігінің өзіндік құны материалдарға, құралға, жабдықты пайдалану мен сапаны бақылауға жұмсалған жалпы шығындар арқылы анықталады:

$$C_{\text{unit}} = C_{\text{мат}} + C_{\text{инстр}}/N + C_{\text{стан}} \cdot t_{\text{cycle}} + C_{\text{контр}} + C_{\text{отбрак}}, \quad (1.4)$$

мұндағы $C_{\text{мат}}$ — қолданылған материалдың құны, $C_{\text{инстр}}/N$ — бір бөлшекке шаққандағы құрал шығыны, $C_{\text{стан}} \cdot t_{\text{cycle}}$ — машина уақытының құны (машина-минут ставкасы), $C_{\text{контр}}$ — өлшеу, бақылау және калибрлеу шығындары, $C_{\text{отбрак}}$ — ақау немесе сапа талаптарына сәйкес келмеу себебінен болатын шығындар.

СББ жабдықтарында өзіндік құнды төмендетудің негізгі жолдары:

- технологиялық операцияларды біріктіру арқылы қосымша уақытты (t_{aux}) қысқарту;
- тұрақты сапа арқылы жарамды өнім шығымын арттыру;
- өндеу траекторияларын және СОЖ беру жүйелерін оңтайландыру арқылы құралдың беріктілігін арттыру.

Процестің тұрақтылығы және өзгергіштігі

Өндеудің тұрақтылығын және басқарылуын бағалау үшін $\bar{X}$ – R және $\bar{X}$ – S типтес SPC-карталар (Statistical Process Control) қолданылады, олар өлшемдердің өзгергіштігін, жабдықтың температуралық дрейфін қадағалауға және кескіш құралдың тозуын нақты уақыт режимінде өтемдеуге мүмкіндік береді.

Анализ барысында параметрлердің орташа мәнінің өзгеріс трендтері мен шашыраңқылығы бақыланады, бұл ауытқуларды уақытында анықтап, процесті түзетуге мүмкіндік береді.

Технологиялық процестің сапа талаптарына сәйкестігін көрсететін критерийлер:

- технологиялық мүмкіндіктің мақсатты көрсеткіштеріне (C_p , C_{pk}) жету;
- жарамды өнімнің үлесі кемінде 99,73%, бұл 6σ деңгейіне сәйкес келеді;

– жабдықтың тұрақсыздығы немесе құралдың тозуына нұқайтын жүйелі ығысу мен трендтердің болмауы.

Интегралды тиімділік көрсеткіші

Өңдеу маршруттарын салыстыру үшін нормаланған индекс қолданылады:

$$E = w_1 \cdot \frac{R_{a,ref}}{R_a} + w_2 \cdot \frac{C_{pk}}{C_{pk,ref}} + w_3 \cdot \frac{Q}{Q_{ref}} + w_4 \cdot \frac{C_{unit,ref}}{C_{unit}}, \quad (1.5)$$

мұндағы ω_i — критерийлердің салмақтары (қосындысы = 1), «ref» — базалық нұсқа.

SPC және процестің жарамдылық индекстері C_p / C_{pk} (мысалы, подшипниктік мойын үшін).

C_p/C_{pk} алдында SPC не үшін қажет

C_p , C_{pk} индекстері процестің рұқсаттарға қатысты әлеуеттік/нақты жарамдылығын сипаттаса да, алдымен бақылау карталары (SPC) арқылы статистикалық басқарудың (арнайы себептердің болмауын) расталуы қажет.

Тәртіп:

1. $\bar{X}$ –R (немесе $\bar{X}$ –S) карталары бойынша тұрақтылықты тексереміз →
2. Егер процесс тұрақты болса — C_p/C_{pk} есептеледі (қажет болса, ұзақ деректер массивінде P_p/P_{pk} есептеу).

Анықтамалар және формулалар

USL/LSL — жоғарғы/төменгі спецификациялар, $T = USL - LSL$ — рұқсат өрісі, σ — процестің стандартты ауытқу бағасы, μ — орташа мән.

Потенциалдық жарамдылық (рұқсаттарға симметриялы):

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma} = \frac{T}{6\sigma}, \quad (1.6)$$

Нақты жарамдылық (ығысуын ескереді):

$$C_{pk} = \min\left(\frac{USL - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - LSL}{3\sigma}\right), \quad (1.7)$$

Түсіндіру (тәжірибелік шектер):

- $C_p, C_{pk} < 1.00$ — процесс рұқсатқа сыймайды.

- 1.00 ... 1.33— шектеулі; төмен тәуекелде жарамды.
- ≥ 1.33 — сериялы өндіріс үшін типтік мақсатты деңгей.
- ≥ 1.67 — «жақсы» деңгей (тұрақтылығы жоғары).
- ≈ 2.00 және одан жоғары — тұрақты процесте «алты сигма» тәртібі.

Қысқа сериялар/қысқа терезе үшін P_p/P_{pk} «жалпы» жарамдылық ретінде қолданылады, топтардың біртектілігін тексермей; басқарылатын процесс үшін негізгі көрсеткіштер — C_p/C_{pk} .

Есептеу мысалы (подшипниктік мойын Ø40)

Спецификация: 40.000 ± 0.010 мм $\rightarrow$ LSL = 39.990, USL = 40.010, T = 0.020 мм.

Үлгілерді таңдау схемасы: топтар бойынша $n = 5$ бөлшек, $k = 10$ топ (айнымалы өлшеулер).

Константалар $n = 5$ үшін: $A_2 = 0.577$, $D_3 = 0$, $D_4 = 2.114$, $d_2 = 2.326$.

Деректер бойынша (қосымшадағы протоколдар кестесіне қараңыз):

- топтар бойынша орташа $\bar{X} = 40.004$ мм;
- орташа диапазон $R = 0.007$ мм.

Процестің стандартты ауытқуын диапазон арқылы бағалау:

$$\hat{\sigma} = \frac{R}{d_2} = \frac{0.007}{2.326} \approx 0.0030 \text{ мм.} \quad (1.8)$$

C_p :

$$C_p = \frac{0.020}{6 \times 0.0030} = \frac{0.020}{0.018} \approx 1.11, \quad (1.9)$$

C_{pk} :

$$\begin{aligned} \frac{USL - \mu}{3\sigma} &= \frac{40.010 - 40.004}{\frac{3 \times 0.0030}{0.014}} = \frac{0.006}{0.009} \approx 0.67, \quad \frac{\mu - LSL}{3\sigma} = \frac{40.004 - 39.990}{0.009} \\ &= \frac{0.014}{0.009} \approx 1.56 \end{aligned}$$

$$C_{pk} = \min(0.67, 1.56) = 0.67$$

Қорытынды: процесс жоғарғы шекке ығыстырылған ($\mu >$ мақсатты мән) және нақты жарамдылық бойынша рұқсатқа толық сыймайды ($C_{pk} < 1$). Потенциалдық тұрғыда ($C_p \approx 1.11$) шашырау өрісі «шамамен» сәйкес келеді, бірақ ығыс сақтықты «жояды».

Ұсыныстар:

- процесті орталыққа қою (кұрал коррекциясын/ЧПУ ығысуын түзету);

– өзгергіштікті азайту (орнатудың/люнеттің қаттылығын арттыру, финалдық өңдеуде a_p азайту, СОЖ/MQL оптимизациялау) — мақсат: $\sigma \approx 0.002$ мм және $\mu \approx 40.000 \rightarrow$ сол кезде $C_p \approx 1.67$, $C_{pk} \approx 1.67$.

$\bar{X}$ –R бақылау карталары ($n = 5$) — салу және интерпретация

Бақылау шектері (тұрақты процесс үшін):

– R картасы (диапазон):

– $UCL_R = D_4 R = 2.114 \cdot 0.007 \approx 0.0148$ мм; $LCL_R = D_3 R = 0$

– $\bar{X}$ картасы (орташа мәндер):

– $UCL_X = \bar{X} + A_2 R = 40.004 + 0.577 \cdot 0.007 \approx 40.0080$ мм; $LCL_X =$

$\bar{X} - A_2 R \approx 39.9999$ мм

Типтік сигналдарды интерпретациялау (Запад/AIAG ережелері):

– UCL/LCL шегінен тыс нүкте $\rightarrow$ ерекше себеп (алып тастау, зерттеу).

– Орталық сызықтың бір жағында 7–9 нүкте қатарынан $\rightarrow$ дрейф/ығысу.

– 6–8 өсу/қысқару тренді $\rightarrow$ жүйелі өзгеріс (тозу, температура).

– Табиғи емес үлгі (кірпіктену, периодтылық) $\rightarrow$ вибрациялар/биіктер, базалау мәселелері.

– Әрекеттер:

– Егер R картасы тұрақты, бірақ $\bar{X}$ «талақтаса» $\rightarrow$ себеп орталық ығысуында (нөлдерді түзету, температура дрейфі).

– Егер R картасы тұрақсыз $\rightarrow$ дисперсия мәселесі (қаттылық, режимдер, арматура, өлшеу жүйесі).

– Мәселе шешілгеннен кейін — шектерді қайта салу және басқаруды растау.

Ескерту: үлкен n үшін ($\geq 6 \dots 9$) $\bar{X}$ –R орнына $\bar{X}$ –S карталары қолданылады, константалар A_3 , B_3 , B_4 ; интерпретация логикасы бірдей.

Типтік дабыл шектері және мақсатты деңгейлер

– Оперативтік «сигналдар»: 3σ шегінен тыс кез келген нүкте; бір жағында 2σ шегінен тыс қатарынан 2 нүкте; 1σ шегінен тыс қатарынан 4 нүкте; орталық сызықтың бір жағында қатарынан 8 нүкте.

Қолайлылық мақсаттары:

– Жұмысқа енгізу/алдын ала серия: $C_p \geq 1.33$, $C_{pk} \geq 1.33$;

– Тұрақты сериялы өндіріс: $C_p \geq 1.67$, $C_{pk} \geq 1.67$ — критикалық посадкаларда.

– Өлшеу жүйесі (MSA, Gage R&R): өлшеу вариациясының үлесі жалпыға шаққанда $<10\%$ — SPC дұрыстығының міндетті шарты.

Ø40 мойын үшін қысқаша түзету «чек-листі»

– μ ығысуы: құрал түзетулерін баптау; станокты термостабилизациялау; заготовкаларды тұрақтандыру; артқы бабка күшін бақылау.

– σ азайту: люнет/орталықтар орнату; финиште a_p азайту; патрон/державка балансін тексеру; Ра мен тұрақтылықты қамтамасыз ететін f диапазонын қолдану; СОЖ/MQL тексеру (байланыс аймағына жеткізу).

– Сығу ұйымдастыру: уақыт/партия бойынша бекітілген интервал; $n = 5$; сенімді шектерді бағалау үшін $k \geq 20$ подгруппа. [4].

1.4 Кесу параметрлерінің өңдеу тиімділігіне әсері

1. Кесу жылдамдығы

Кесу жылдамдығы (v) құрал бен дайындама арасындағы байланыс аймағындағы жылулық процестерге ең маңызды әсер ететін параметрлердің бірі болып табылады. Жылдамдық артқан сайын кесу аймағында температура көтеріледі, бұл кескіш қырдың қарқынды тозуына әкеледі, бірақ бір уақытта кесу күшін азайту және материалдың пластикалық деформация дәрежесін төмендету арқылы бетінің сапасын жақсартады.

Жылдамдықтың оңтайлы мәні Тейлордың эмпирикалық тәуелділігіне сүйене отырып анықталады, ол құралдың тозуға төзімділігін кесу режимімен байланыстырады:

$$vT^n = C, \quad (1.10)$$

мұндағы T — кескіш құралдың төзімділігі (шектік тозуға дейінгі уақыт), n — «құрал — дайындама материалы» жұбының қасиетін сипаттайтын көрсеткіш, C — тәжірибелік жолмен анықталған эмпирикалық тұрақты.

Осылайша, рационалды қайыру жылдамдығын таңдау өнімділік, сапа және құралдың ұзақ мерзімділігінің арасындағы компромиссті білдіреді және технологиялық процестің тұрақтылығын қамтамасыз етеді.

2. Беріліс

Беріліс (f) өңделген беттің микрогеометриялық көрсеткіштеріне, әсіресе беттің қаттылығына (шероховатость) ең елеулі әсер ететін параметр болып табылады. Аяқтау операцияларын орындау кезінде подачаны азайту микротыңшықтардың биіктігін төмендетуге және бетінің тазалығын жақсартуға ықпал етеді. Алайда подача мәнін шамадан тыс төмендету кесу процесінің тұрақсыздығына, құралдың дірілінің артуына және өңдеу циклі уақыттарының айтарлықтай ұлғаюына әкеледі, бұл өнімділік пен процесс экономикалық тиімділігіне теріс әсер етеді.

Кесу кезінде R_a бетінің кедір – бұдырлықтың подачасына тәуелділігін жуықтау формуласымен сипаттауға болады:

$$R_a \approx \frac{f^2}{32r_\varepsilon}, \quad (1.11)$$

мұндағы r_ε — кескіш қырдың ұшындағы радиус (радиус при вершине режущей кромки).



График 1.1 — R_a көрсеткішінің беріліске f -ге тәуелділігі
Y осі (тік): Кедір-бұдырлық. X осі (көлденең): Беріліс

3. Кесу тереңдігі

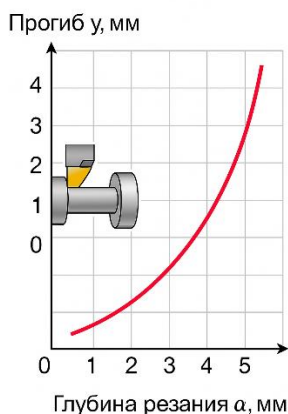


График 1.2 — a_p кесу тереңдігінің білік иілуіне әсері
Y осі (тік): Иілу u , мм
X осі (көлденең): Кесу тереңдігі a , мм

Кесу тереңдігі (a_p) – металл алынатын көлемді және «станок–құрал–дайындама» технологиялық жүйенің қаттылығын анықтайтын негізгі факторлардың бірі.

Қарапайым өңдеу процесінде a_p мәні әдетте 2–6 мм диапазонында орнатылады, бұл негізгі артық материалды тиімді түрде жоюға мүмкіндік береді.

Аяқтаушы операцияларды орындағанда кесу тереңдігі 0,2–0,8 мм-ге дейін азайтылады, бұл жоғары дәлдік пен қажетті бет микрогеометрия параметрлеріне қол жеткізу үшін қажет. a_p ұлғайған сайын кесу күштері артып, нәтижесінде дайындамаға иілу жүктемелері көбейеді, бұл әсіресе ұзын және төмен қаттылықтағы біліктерді өңдеу кезінде маңызды.

Деформациялар мен дірілді азайту үшін мұндай жағдайларда артқы бабкалар, қозғалмалы және қозғалмайтын люнеттер, сондай-ақ көп өткелі

өңдеудің оңтайландырылған стратегиялары қолданылады, бұл жүктемелерді біркелкі бөлуге және процесстің тұрақтылығын қамтамасыз етуге мүмкіндік береді.

4. Дәлдік пен тозуға параметрлердің әсері

Кесу жылдамдығы (v), беріліс (f) және кесу тереңдігі (a_p) бірлескен әсері тек материал алыну қарқындылығын ғана емес, сонымен қатар бүкіл технологиялық жүйенің динамикалық мінез-құлқын анықтайды. Аталған параметрлердің дұрыс қатынасы сақталмаған жағдайда «станок–күрал–дайындама» жүйесіндегі өзіндік тербелістерге байланысты дірілдер пайда болуы мүмкін.

Мұндай құбылыстар бөлшектердің геометриялық пішінінің бұзылуына, подшипникшектердің радиалды биілуінің артуына және өңдеу дәлдігінің төмендеуіне әкеледі, бұл өндірістік процестің тұрақтылығына және сапасына теріс әсерін тигізеді.

5. Эмпирикалық тәуелділіктер

Технологиялық режимдердің сапа мен өндіріс көрсеткіштеріне жиынтық әсерін сандық бағалау үшін көппараметрлі регрессиялық модель қолданылады:

$$Y = k \cdot v^{\alpha} \cdot f^{\beta} \cdot a_p^{\gamma}, \quad (1.12)$$

мұнда Y — процестің жауап көрсеткіші (мысалы, бет кедір – бұдырлығы Ra , кесу күші немесе өнімділік), v , f , a_p — сәйкесінше кесу жылдамдығы, беріліс және кесу тереңдігі, α , β , γ — әр параметрдің әсер дәрежесін сипаттайтын эмпирикалық көрсеткіштер, эксперименталды жолмен анықталады, ал k — өңдеу нақты жағдайына тәуелді пропорционалдық коэффициенті.

Бұл модельді қолдану жауап беттерін салуға, параметрлер арасындағы өзара байланыстарды талдауға, сондай-ақ механикалық өңдеу процесінің максималды тиімділігі мен тұрақтылығын қамтамасыз ететін оңтайлы режимдер комбинацияларын анықтауға мүмкіндік береді.

f және a_p әсерінің сезімталдық анализі (мысалы, 45 болаты үшін; Ø40×L400, финиш: $v \approx 260$ м/мин, $f \approx 0.15$ мм/об, $a_p \approx 0.6$ мм)

1. Ra моделі және әдістемесі

Фиништік токарлық өңдеу үшін Ra көрсеткішін анықтау үшін v (кесу жылдамдығы) және f (беріліс) факторлары бойынша екінші ретті эмпирикалық регрессия қолданылады, себебі дәл осы параметрлер із қалдыратын геометрияны және жылулық/діріл компонентін анықтайды:

$$Ra(v, f) = c_0 + c_1 f + c_2 f^2 + \frac{c_3}{v} + \frac{c_4 f}{v}, \quad (1.13)$$

(Мұнда өзіңіздің DoE/регрессия деректеріне сәйкес бағаланған c_i коэффициенттеріңізді енгізіңіз.)

Төмендегі иллюстрация үшін базалық нүктеге ($v=260$ м/мин; $f=0.15$ мм/об) сәйкестендірілген параметризация қолданылды, $Ra \approx 0.27$ мкм:

$$Ra[\mu m] \approx 0.05 + 0.6f + 0.8f^2 + \frac{30}{v} \quad (a_p \text{ бойынша тікелей мүшесі жоқ})$$

Сезімталдық интерпретациясы:

$$\frac{\partial Ra}{\partial f} = c_1 + 2c_2f + \frac{c_4}{v}; \quad \frac{\partial Ra}{\partial v} = -\frac{c_3}{v^2} - \frac{c_4f}{v^2}, \quad (1.14)$$

Фиништік өндеуде a_p әсері Ra көрсеткішіне әдетте екінші реттік (тұрақтылық/діріл арқылы) болып келеді: дұрыс қаттылық пен автоколебаниялардың жоқтығында Ra -ға тікелей әсер минималды; қаттылық төмендегенде a_p өсуі кесу күшін арттырады $\rightarrow$ толқындылық/четтер қаупі $\rightarrow$ Ra секірісі.

Сандық мысал ($v=260$ м/мин, $f=0.15$ мм/об):

- $+10\% f (\rightarrow 0.165)$: $Ra \uparrow \approx +4.7\%$
- $+20\% f (\rightarrow 0.18)$: $Ra \uparrow \approx +9.5\%$
- $-10\% f (\rightarrow 0.135)$: $Ra \downarrow \approx -4.5\%$
- $-20\% f (\rightarrow 0.12)$: $Ra \downarrow \approx -9.0\%$
- $\pm 10\% v$: Ra шамамен $\mp 3.8 \dots +4.7\%$ өзгереді.
- $\pm 10 \dots 20\% a_p$: тұрақты процесте — Ra -ға әсері шамамен нөл; діріл

пайда болғанда Ra 3–10% өседі (эмпирикалық), сондықтан финиште a_p тек схеманың расталған қаттылығы кезінде ұлғайтуға рұқсат етіледі.

Практикалық қорытынды: мақсатты диапазон $Ra \approx 0.2-0.4$ мкм үшін ең сезімтал параметр — f , одан кейін v ; a_p минималды тұрақты деңгейде ұсталып (әдетте финиште 0.05–0.15 мм) діріл бақылауда болуы қажет.

Бұрылыс және кесу күшінің моделі (f және a_p әсері)

Классикалық кесу күшінің байланысын қабат ауданына байланысты қарастырамыз:

$$F \approx K_c a_p f \quad (\text{ортогоналды аппроксимация}), \quad (1.15)$$

мұндағы K_c — кесу материалының бірлік күші (болат үшін шамамен 1200–2000 Н/мм²; бағалау үшін 1500 Н/мм² аламыз).

Пролёт үшін Ø40×L400 (орнату «орталықтарда» бір люнетпен — екі тіректе тұрған арқалыққа орталық жүктеме ретінде қарастырамыз, F): максималды иілу

$$y_{\max} = \frac{FL^3}{48EI}, \quad I = \frac{\pi d^4}{64}, \quad (1.16)$$

Мәліметтерді қойсақ:

$E = 210\,000 \text{ Н/мм}^2$, $d = 40 \text{ мм}$, $L = 400 \text{ мм}$, $a_p = 0.6 \text{ мм}$, $f = 0.15 \text{ мм/об} \rightarrow$

$$F \approx 1500 \cdot 0.6 \cdot 0.15 = 135 \text{ Н}, I \approx 1.2566 \cdot 10^5 \text{ мм}^4 \rightarrow y_0 \approx 0.0068 \text{ мм (6.8 } \mu\text{m)}.$$

Күшке (F) қатысты сызықтылық сезімталдықты береді:

$$\frac{\Delta y}{y} \approx \frac{\Delta F}{F} = \frac{\Delta a_p}{a_p} + \frac{\Delta f}{f}, \quad (1.17)$$

Бұл өрнек фиништік өндеуде a_p және f өзгерістерінің вал иілуіне әсерін бағалауға мүмкіндік береді.

Сандық мысал (негізгі нүктеден салыстырмалы өзгерістер)

- $+10\% f \rightarrow y \uparrow 10\%$ (шамамен $7.5 \mu\text{m}$)
- $-10\% f \rightarrow y \downarrow 10\%$ (шамамен $6.1 \mu\text{m}$)
- $+20\% f \rightarrow y \uparrow 20\%$ (шамамен $8.2 \mu\text{m}$)
- $+10\% a_p \rightarrow y \uparrow 10\%$ (шамамен $7.5 \mu\text{m}$)
- $+20\% a_p \rightarrow y \uparrow 20\%$ (шамамен $8.2 \mu\text{m}$)
- $+10\% f$ және $+10\% a_p \rightarrow y \uparrow$ шамамен 21% (жалпы әсер)
- $+20\% f$ және $+20\% a_p \rightarrow y \uparrow$ шамамен 44% (жалпы әсер)

Практикалық қорытынды: f және/немесе a_p өсуі кесу күштері мен иілуін сызықтық түрде арттырады $\rightarrow L/D \geq 8-10$ жағдайында міндетті түрде люнет/артқы бабка, балансировка және свес минимизациясы қажет, әйтпесе R_a валдың толқындануы себебінен нашарлайды. [5].

Кері әсер беті $R_a = f(v, f)$:

Response Surface: $R_a = f(v, f)$ (illustrative model)

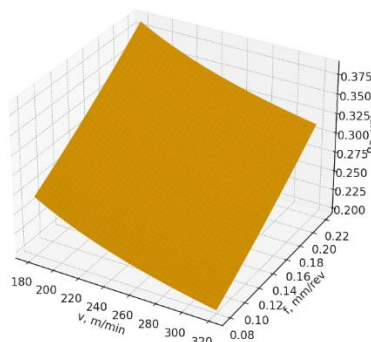


График 1.3 – $R_a = f(v, f)$ кері әсер беті

f осінен жатқан жазықтықтың көлбеуі v осіне қарағанда едәуір жоғары, бұл фиништік режимдерде R_a шероховаттығына подачиның үстем әсерін растайды. v өскен сайын R_a шамалы төмендейді (жылу енгізілімдері мен

байланыс уақытын азайту есебінен), бірақ бұл әсер f -тің ықпалынан әлдеқайда әлсіз.

Сезімталдық формулалары:

Фиништік токарлық өңдеуге арналған:

$$Ra(v, f) = c_0 + c_1 f + c_2 f^2 + \frac{c_3}{v} + \frac{c_4 f}{v}, \quad (1.18)$$

Сондай-ақ жеке туындылар (жергілікті сезімталдық):

$$\frac{\partial Ra}{\partial f} = c_1 + 2c_2 f + \frac{c_4}{v}, \quad \frac{\partial Ra}{\partial v} = -\frac{c_3}{v^2} - \frac{c_4 f}{v^2}, \quad (1.19)$$

a_p -тің Ra -ға әсері негізінен жанама (тұрақтылық және вибрациялар арқылы); тұрақты процесте тікелей байланыс шамалы.

Иілу үшін (екі тірекпен балка, орталық жүктеме F):

$$F \approx K_c a_p f, y_{max} = \frac{F L^3}{48 E I}, I = \frac{\pi d^4}{64}, \quad (1.20)$$

Сондықтан салыстырмалы сезімталдық:

$$\frac{\Delta y}{y} \approx \frac{\Delta F}{F} = \frac{\Delta a_p}{a_p} + \frac{\Delta f}{f}, \quad (1.21)$$

Сандық мысал (қорытпасы 45 болат; $\varnothing 40 \times L 400$; финиш базалық нүктесі)

База: $v=260$ м/мин, $f=0.15$ мм/об, $a_p=0.6$ мм.

Ra моделі (иллюстративті, базалық нүктеге сәйкес):

$$Ra[\mu m] \approx 0.05 + 0.6f + 0.8f^2 + 30v.$$

База бойынша: $Ra_0 \approx 0.273$ μm .

Прогиб (бағалау):

$$K_c = 1500 \text{ Н/мм}^2, E = 210\,000 \text{ Н/мм}^2, d = 40 \text{ мм}, L = 400 \text{ мм} \Rightarrow y_0 \approx 6.821 \mu m.$$

1.4-кесте – Қысқаша кесте өзгерістерді (базалық нүктеге қатысты)

Нұсқалар	Көрсеткіштер	ΔRa (абс.), μm	ΔRa , %	y , μm	Δy , %
$f-20\%$	$f=0.12$	-0.02448	-8.95%	5.457	-20.0%
$f-10\%$	$f=0.135$	-0.01242	-4.54%	6.139	-10.0%
$f+10\%$	$f=0.165$	+0.01278	+4.67%	7.503	+10.0%
$f+20\%$	$f=0.18$	+0.02592	+9.48%	8.185	+20.0%
$a_p-20\%$	$a_p=0.48$	$\sim 0^*$	$\sim 0\%^*$	5.457	-20.0%
$a_p-10\%$	$a_p=0.54$	$\sim 0^*$	$\sim 0\%^*$	6.139	-10.0%
$a_p+10\%$	$a_p=0.66$	$\sim 0^*$	$\sim 0\%^*$	7.503	+10.0%
$a_p+20\%$	$a_p=0.72$	$\sim 0^*$	$\sim 0\%^*$	8.185	+20.0%
$f+10\% \& a_p+10\%$		—	—	8.253	+21.0%
$f+20\% \& a_p+20\%$		—	—	9.822	+44.0%

Тұрақты процесс кезінде a_p тікелей Ra -ға ықпалы аз; тәжірибеде a_p ұлғаюы вибрацияларды туындатып, Ra -ның 3–10% дейін секіруіне әкелуі мүмкін. Бұл $\bar{X}-R$ карталары мен вибрация спектрі арқылы тексерілуі қажет. Финиш аймағында Ra ең сезімтал параметр f -ге: f -тің $\pm 10\%$ өзгерісі Ra -ны $\sim \pm 4.5-4.7\%$ өзгертеді; $\pm 20\% \rightarrow \sim \pm 9-9.5\%$.

Иілу у f және a_p -ге сызықтық түрде өседі; ұзын біліктерде ($L/D \geq 8-10$) f/a_p кез келген ұлғаюы люнет/артқы бабка қолдануды және свес мөлшерін минимизациялауды талап етеді.

Мақсатты $Ra=0.2-0.3 \mu m$ жету үшін: тұрақтылық сақталған жағдайда f -ті 10–20% қысқарту, ал a_p -ті минималды тұрақты деңгейде ұстау ұсынылады (финиште 0.05–0.15 мм).

1.5 Валдарды механикалық өндеуді цифрландыру

Қазіргі заманғы машина жасау саласы жобалау, модельдеу және өндіріс процестерін басқару жүйелерін біртұтас ақпараттық кеңістікке интеграциялауға бағытталған цифрлық трансформация қағидаларын белсенді енгізуімен сипатталады.

Мұндай тәсіл Индустрия 4.0 идеологиясына сәйкес келеді және CNC жабдықтары, бағдарламалық қамтамасыз ету және оператор біртұтас цифрлық платформа шеңберінде өзара әрекеттесетін интеллектуалды, өзара байланысқан өндірістік экожүйелерді қалыптастыруды көздейді.

Осы қағидаларды жүзеге асыру өндірістік жүйелердің ашықтығын, басқарылуын және бейімделгіштігін арттыруға мүмкіндік береді, толық автоматтандырылған және өздігінен реттелетін өндеу процестеріне көшуге негіз жасайды.

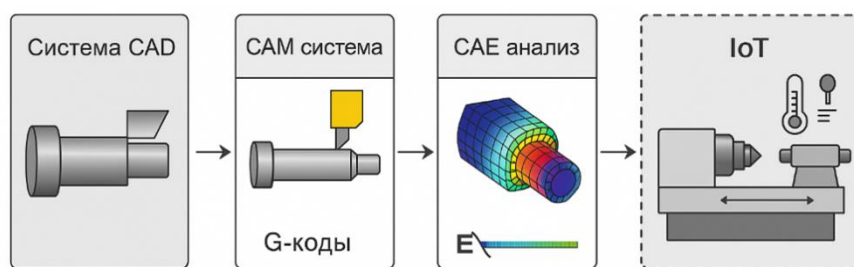
1. Сандық бағдарламалық басқарумен (СББ) станоктар
Сандық бағдарламалық басқарумен (CNC) станоктар механикалық

өңдеуді цифрландыру процесінде орталық рөл атқарады және өндірістік жабдықтарды интеллектуалды басқару жүйелеріне интеграциялаудың негізгі тізбегі болып табылады.

Олардың қолданылуы жоғары позициялау дәлдігін, құралдың тозуын автоматты түрде өтеуді қамтамасыз етеді, сондай-ақ бірнеше технологиялық операцияларды бір установка шеңберінде біріктіру мүмкіндігін береді, бұл өндірістік циклдің тиімділігін айтарлықтай арттырады.

Көпкоординатты токарлық-фрезерлік орталықтарды (3–5 ось) қолдану күрделі өңдеу траекторияларын жүзеге асыруға, қосымша уақытты қысқартуға және бөлшектер өлшемдерінің жоғары қайталанушылығын қамтамасыз етуге мүмкіндік береді, бұл машина жасау саласындағы прецизионды компоненттерді өндіруде ерекше маңызды.

2. CAD/CAM/CAE жүйелері



1.4-сурет — Цифрлық өндірісте CAD/CAM/CAE және IoT интеграциясы

Жобалау жүйелері (CAD), технологиялық дайындау (CAM) және инженерлік талдау (CAE) жүйелерін енгізу және өзара байланысы өнімді жобалау кезеңдері мен оның кейінгі механикалық өңдеу процестері арасындағы үздіксіз цифрлық тізбекті қалыптастырады.

CAD-моделдеу кезеңінде барлық рұқсаттар мен технологиялық талаптарды ескере отырып, детальдың үшөлшемді геометриялық моделі жасалады.

Содан кейін CAM-ортасында құрал қозғалысының траекториялары оңтайландырылады және ЧПУ станоктары үшін басқару бағдарламасы G-кодтар форматында автоматты түрде генерацияланады.

Өз кезегінде, CAE-талдау, соның ішінде шекті элементтер әдісі (FEA), өңдеу процесінде кернеулердің, деформациялардың және мүмкін ауытқулардың таралуын болжау үшін қолданылады.

Мұндай интеграцияланған тәсілді қолдану қолмен жасалатын қателерді жоюға, жоспарлау дәлдігін арттыруға және өндірісті дайындау уақытын едәуір қысқартуға мүмкіндік береді, бұл процесті тұрақты әрі басқарылатын етеді.

3. Мониторинг және талдау жүйелерін қолдану (MES, SCADA, IoT)

Қазіргі өндірістік кәсіпорындар MES (Manufacturing Execution System) және SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) деңгейіндегі жүйелерді қолдана отырып, жабдықтан нақты уақыт режимінде түсетін мәліметтерді

үздіксіз жинау, талдау және визуализациялауды белсенді түрде жүзеге асырады.

Industrial Internet of Things (IIoT) концепциясы аясында станоктар интеллектуалды сенсорлармен жабдықталады, олар температураны, дірілді, жүктемені және құралдың күйін тіркейді, сондай-ақ жабдық пен басқару жүйелері арасындағы екіжақты ақпарат алмасуды қамтамасыз ететін желілік интерфейстерді қамтиды.

Мұндай интеграция өңдеу параметрлерін нақты уақыт режимінде бақылауға, құралдың тозу дәрежесін болжауға және оператор қатысымынсыз өңдеу режимдеріне автоматты түзетулер енгізуге мүмкіндік береді, бұл технологиялық процестің тұрақтылығын және тиімділігін едәуір арттырады.

4. Технологиялық процестердің цифрлық егіздері

Digital Twin (цифрлық егіз) концепциясы өңдеу физикалық процесінің виртуалды моделін жасауға негізделген, ол кесу кезінде болатын барлық негізгі термиялық, динамикалық және механикалық құбылыстарды дәл қайталайды.

Цифрлық егізден алынған деректерді пайдалана отырып, өңдеу режимдерін оңтайландыруға, заготовканың мүмкін болатын деформациясын болжауға, жабдықты профилактикалық қызмет көрсетуге жоспарлауға және технологиялық операциялардың экономикалық тиімділігін бағалауға болады.

Цифрлық егіздерді қолдану әсіресе валдарды өңдеуде маңызды, себебі бұл типтегі бөлшектер жоғары геометриялық дәлдікті, өлшемдердің тұрақтылығын және біріктірілген жүктемелер — иілгіштік, бұрау және осьтік жүктемелер — әсерінен пішіннің минималды ауытқуларын қажет етеді.

5. Біліктерді өңдеудегі цифрландырудың артықшылықтары

- Өңделген бөлшектердің дәлдігі мен өлшемдердің қайталанымдылығы адаптивті басқару жүйелерін енгізу арқылы артады, олар процесс жағдайына байланысты кесу параметрлерін автоматты түрде түзетеді.
- Жабдықты қайта баптау және өндірісті дайындау уақыты қысқарады, себебі цифрлық құралдар әртүрлі өнім түрлеріне жабдықты жылдам бейімдеуге мүмкіндік береді.
- Кесу режимдері аналитикалық тәуелділіктер мен симуляциялық модельдеу нәтижелеріне негізделі отырып оңтайландырылады, бұл өңдеудің тұрақтылығы мен тиімділігін арттырады.
- Өндірістің өзіндік құны қателіктің азаюы, құралдың қызмет ету мерзімін ұзарту және ресурстарды рационалды пайдалану есебінен төмендейді.
- Жабдық жұмысының қашықтықтан мониторингі және өндірістің тиімділігін нақты уақыт режимінде талдау желілік технологиялар мен цифрлық платформалар арқылы ұйымдастырылады.

Жалпы алғанда, біліктерді механикалық өңдеуді цифрландыру қазіргі заманғы машина жасау саласының басты бағыттарының бірі болып табылады, ол өндірістік процестердің сапасын, сенімділігін және экономикалық тиімділігін арттыруға ықпал етеді. [6].

2 Валдарды өңдеудің тиімділігін зерттеу әдістері

2.1 Зерттеудің мақсаттары мен тиімділікті бағалау тәсілдері

Механикалық өңдеу процестерінің тиімділігін бағалау технологиялық режимдер мен сандық құралдардың соңғы көрсеткіштерге — дәлдікке, беткі қабат сапасына және өнімділікке әсерін сандық түрде анықтауға бағытталған. Зерттеудің басты мақсаты – кесу параметрлері, өңдеу режимдері және алынған нәтижелер арасындағы заңдылық байланыстарды айқындау, олар беткі қабаттың кедір – бұдырлығы, геометриялық дәлдігі және цикл ұзақтығының өзгеруімен көрініс табады.

Жұмыстың әдістемелік негізі жүйелік талдау принциптеріне сүйенеді, оған сәйкес механикалық өңдеу кешенді өзара байланысты компоненттердің өзара әрекеттестігі ретінде қарастырылады: станок, кескіш құрал, дайындама, басқару жүйесі және өлшеу құралдары.

Қолданылған кешенді зерттеу тәсілі мыналарды қамтиды:

- технологиялық параметрлерді аналитикалық зерттеу және олардың беткі қабат сапасына әсерін талдау;
- дайындаманың кернеу-деформацияланған күйін талдау үшін шектік элементтер әдісімен (FEA) сандық модельдеу;
- геометриялық дәлдік пен микрогеометриялық параметрлерді эксперименттік өлшеу;
- мәліметтерді сандық талдау әдістерін — статистика, визуализация және корреляциялық тәуелділіктерді пайдалану арқылы өңдеу.[7].

2.2 Технологиялық процесті модельдеу үшін CAD/CAM жүйелерін қолдану

Механикалық өңдеу процестерінің тиімділігін зерттеу технологиялық параметрлер мен цифрлық құралдардың негізгі көрсеткіштерге — геометриялық дәлдікке, беттің сапасына және өңдеу өнімділігіне әсерін сандық бағалауға бағытталған.

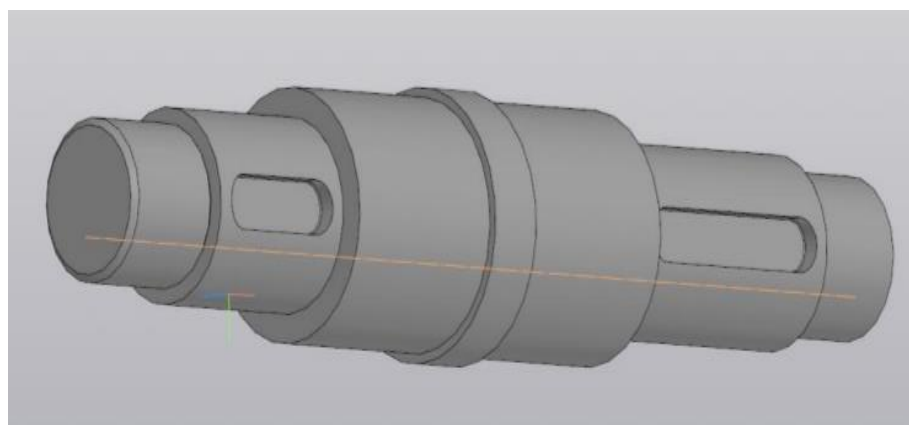
Зерттеудің негізгі мақсаты – кесу параметрлері, өңдеу жағдайлары және нәтижелік сипаттамалар арасындағы өзара байланыстарды анықтау, оларға беттің кедір - бұдырлығы, пішіннің ауытқуы және өңдеу циклінің ұзақтығы жатады.

Зерттеудің әдістемелік негізі жүйелік талдау принциптеріне сүйенеді, онда механикалық өңдеу процесі өзара байланысқан жүйе ретінде қарастырылады, оған станок, кескіш құрал, заготовка, басқару жүйесі, өлшеу және диагностикалық құралдар кіреді.

Белгіленген мақсаттарға жету үшін кешенді тәсіл қолданылды, оған мыналар кіреді:

- технологиялық факторларды және олардың қалыптасатын беттің сапасына әсерін аналитикалық зерттеу;
- әртүрлі режимдерде бөлшектің кернеулі-деформациялық жағдайын анықтау үшін соңғы элементтер әдісін (FEA) пайдалана отырып компьютерлік модельдеу;
- өңдеуден кейін геометриялық параметрлер мен бет микрогеометриясының сипаттамаларын эксперименттік өлшеу;
- эксперименттік деректерді цифрлық өңдеу және статистикалық өңдеу, визуализация және корреляциялық тәуелділіктерді құру әдістерін қолдана отырып талдау.

2.3 Валдың кернеу–деформацияланған күйін талдауда шектеулі элементтер әдісін (FEA) қолдану



2.2-сурет — FEA талдауына арналған біліктің геометриялық моделі

Элементтер әдісі (Finite Element Analysis, FEA) – бұл СББ станоктарында бөлшектерді өңдеу процесінде туындайтын механикалық құбылыстарды зерттеуге арналған ең әмбебап және нәтижелі тәсілдердің бірі. Осы әдісті қолдану кесу аймағында және дайындаманы бекіту кезінде туындайтын кернеулердің, деформациялардың және температуралық өрістердің таралуын егжей-тегжейлі сандық талдауға мүмкіндік береді.

Сонымен қатар, FEA конструкцияның ең жүктелген учаскелерін, иілгіштік, бұралу және вибрациялық әсерлерге ұшырайтын бөліктерін анықтауға мүмкіндік беріп, конструкция мен өңдеу шарттарын оңтайландыруға ықпал етеді.

1. Әдістің мәні

Элементтер әдісі (FEA, МКЭ) дененің (бұл жағдайда – білік) үздіксіз моделін шектеулі саны бар өзара байланысқан кіші аймақтарға – элементтерге дискретизациялауға негізделген, олар түйін нүктелерінде біріктіріледі.

Әрбір осындай элемент үшін ішкі күштер мен деформациялардың өзара әрекетін сипаттайтын жергілікті тепе-теңдік теңдеулер жүйесі құрылады.

Осыдан кейін бүкіл мәселе тордың түйіндеріндегі орын ауыстырулар мен кернеулерді есептеуге келтіріледі, бұл жүктемелер әсеріндегі конструкцияның мінез-құлқын жоғары дәлдікпен бағалауға мүмкіндік береді. FEA негізгі теңдеуі матрицалық түрде келесідей жазылады:

$$[K]\{u\} = \{F\} \quad (2.1)$$

мұндағы $([K])$ – жүйенің қаттылық матрицасы, $(\{u\})$ – түйіндердің орын ауыстыру векторы, $(\{F\})$ – сыртқы жүктемелер векторы.

2. Біліктің есептеу моделі

Модельдеуде білік серпімді дене ретінде қарастырылады, оған әсер ететін күштер:

- иілу моменті (M_b);
- бұралу моменті (M_t);
- осьтік күш (F_a).

Қарапайым аналитикалық салыстыру үшін келесі тәуелділіктер қолданылады:

$$\sigma_b = \frac{M_b y}{I}, \quad (2.2)$$

$$\tau_t = \frac{M_t r}{J}, \quad (2.3)$$

мұнда σ_b — иілу нәтижесіндегі қалыпты кернеу, τ_t — бұралу нәтижесіндегі қиғаш кернеу,

(I) және (J) — көлденең қиманың инерциялық сәттері, (y, r) — нүктенің бейтарап оське қатысты координаталары.

Мизестің эквивалентті кернеуі:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_b^2 + 3\tau_t^2}, \quad (2.4)$$

Шектеулі элементтер әдісімен есептеуді орындау үшін алдымен CAD-жүйесінде біліктің үшөлшемді қатты дене моделі жасалады, содан кейін геометрия FEA-талдауына арналған арнайы бағдарламалық қамтамасыз етуге импортталады (мысалы, ANSYS, SolidWorks Simulation немесе Abaqus).

Құрылған модельге нақты технологиялық әсерлерді бейнелейтін шекаралық шарттар қолданылады — патрондағы бекіту, люнеттегі тірек, сондай-ақ өңдеу процесінде туындайтын кесу күштері мен бұрмалау моменттері.

Содан кейін модель шектеулі элементтерге дискреттеледі, тор қадамының өлшемі зерттелетін аймаққа байланысты өзгереді: кесу аймақтарында және құрал бланкімен жанасатын жерлерде тор тығызырақ жасалады, бұл есептердің дәлдігін арттыруға және кернеулердің таралуын егжей-тегжейлі көрсетуге мүмкіндік береді.

4. Нәтижелерді талдау

Өткізілген есептеулер нәтижесінде конструкция жағдайының негізгі параметрлерінің таралу алаңдары қалыптасады, соның ішінде:

- Мизес критерийі бойынша есептелген эквивалентті кернеулер;
- Технологиялық жүктемелер әсерінен туындайтын сызықтық және бұрыштық деформациялар;
- Өңдеу процесінде білік осінің максималды иілуі мен ауытқулары.

Алынған нәтижелерді талдау кернеулердің шоғырланған аймақтарын анықтауға, қалдық деформациялардың пайда болу ықтималдығын бағалауға және иілу мөлшерін анықтауға мүмкіндік береді, бұл өңдеудің қажет геометриялық дәлдігін қамтамасыз етуде шешуші мәнге ие.

5. Практикалық интерпретация

Соңғы элементтер әдісі (FEA) бойынша сандық модельдеу нәтижелері бідіктерді өңдеу технологиялық процесін кешенді оңтайландыруға мүмкіндік береді.

Алынған деректер негізінде мына мүмкіндіктер туындайды:

- вибрацияны азайту және жүйенің серпімді деформацияларын төмендету мақсатында кесу параметрлерін — жылдамдықты, беруді және тереңдікті нақтылау;
- дайындаманы орналастыру және бекіту схемасын рационализациялау, оның өңдеу процесінде тұрақтылығын қамтамасыз ету;
- технологиялық жүйенің рұқсат етілген қаттылығын анықтау және оның потенциалды тұрақсыз аймақтарын белгілеу;
- деформациялық сипаттамалар мен жүктемелердің таралуын ескере отырып, оптималды өңдеу маршруттарын болжау.

FEA қолдану біліктерді механикалық өңдеудің дәлдігі мен сенімділігін арттыруға мүмкіндік береді, сонымен қатар қымбат физикалық эксперименттер жүргізу қажеттілігін едәуір азайтады. Осыған байланысты әдіс Индустрия 4.0 талаптарына сай сандық инженерия мен интеллектуалды жобалаудың ажырамас бөлігі болып табылады.

FEA: тор тәуелсіздігін тексеру және есепті қою

1. Геометрия, материал, элемент түрі

Объект: Ø40×L400 білік, болат 45 ($E = 210$ ГПа, $\nu = 0.3$, $\rho = 7850$ кг/м³, модель сызықты-серпімді).

КЭ түрі: SOLID10 тетраэдрлері (екінші ретті) — күш қолдану аймағында торды локалды түрде қалыңдату; жылдам прогоночты бағалау үшін SOLID4 рұқсат етілген, бірақ соңғы есеп — SOLID10-де.

Тор сапасы: аспект ≤ 5 , Якобиан > 0.6 , жүктеме контакті аймағында қалыңдық бойынша кемінде 3–4 элемент.

Тор деңгейлері (h-рефайнмент схемасы)

coarse: дене бойынша орташа қадам $h_c \approx 3.5-4.0$ мм; жүктеме аймағында $h_c^{\{loc\}} \approx 1.5-2.0$ мм.

medium: $h_m \approx 2.5-3.0$ мм; локалды $1.0-1.2$ мм.

fine: $h_f \approx 1.6-2.0$ мм; локалды $0.6-0.8$ мм.

Ескерту: локалды нақтылау аймағын кескіштің дөңгелек бойындағы контакті дуга ретінде аламыз, бұрыш $60-90^\circ$, ені $\approx (0.5 \dots 1.0) \cdot a_p$, ал ұзындығы ось бойымен $4-6$ мм.

Шекаралық шарттар (BC) және координаталар жүйесі Z осін вал осі бойымен қабылдаймыз (шпиндельге қарай), X — радиалды (кескішке қарай), Y — дөңгелек/тангенциалдық бағыт.

Бекітулер:

– Патрон қысу аймағы (жұмсақ немесе қатты қалпында) — шеттен $18-25$ мм ұзындықтағы цилиндрлік сектор:

$u = 0$ барлық еркіндік дәрежелері бойынша (қатты бекіту) немесе эквивалентті серіппелі бекіту (төменде қараңыз).

– Артқы бабка (орталық) — шеткі табан $\varnothing 4-6$ мм: $u_X = u_Y = 0$, u_Z бос немесе осьтік серіппе арқылы берілген $k_Z^{\{tail\}}$.

– Люнет (қолданылса) — $Z = Z_L$ кесіндісінде: радиалды серіппе $k_X^{\{rest\}}$ (қажет болса, $k_Y^{\{rest\}}$).

Қолдау икемділігін нақтылау (сезімталдық үшін ұсынылады): $k_Z^{\{tail\}} \sim 10^8-10^9$ Н/м, $k_X^{\{rest\}} \sim 10^7-10^8$ Н/м — нақты мәндер паспорт немесе эксперимент бойынша таңдалады.

Мұндай тәсіл тым қатты бекітуден аулақ болуға және жабдықтың иілуіне әсерін дұрыс есептеуге мүмкіндік береді.

Жүктемелер: кесу күштері компоненттері және олардың берілуі Дәстүрлі декомпозицияны қолданамыз: F_c — тангенциалдық (Y бағыты бойынша), F_f — беріліс/подача (Z бағыты бойынша), F_p — радиалды (X бағыты бойынша).

Динамометр болмаған жағдайда — кесу күшінің бірлік мәні K_c арқылы бағалау:

$$F \approx K_c \cdot a_p \cdot f, F_c \approx \alpha_c F, F_p \approx \alpha_p F, F_f \approx \alpha_f F, \quad (2.5)$$

мұндағы қатталған/көміртекті болат үшін бағыттаушылар: $\alpha_c \approx 0.6 - 0.7$, $\alpha_p \approx 0.2 - 0.3$, $\alpha_f \approx 0.1 - 0.15$

(Өлшеулер бар болса — нақты F_c , F_p , F_f мәндерін қолданыңыз.)

Қолдану тәсілі: қысымдарды (p_X , p_Y , p_Z) байланыс аймағында біркелкі тарату (доға $60-90^\circ$, ұзындығы $4-6$ мм). Балама — байланыс аймағының төбелеріндегі эквивалентті тораптық күштер.

Тор тәуелсіздігін тексеру (h-зерттеу)

Шешім — статикалық сызықтық, күштер мен орын ауыстырулар бойынша қалдықты бақылаумен. Максималды көрсеткіштерді салыстырамыз:

– иілу ($\delta_{\max}$) (қозғалма учаскенің ортасында немесе қауіпті секторда),

– эквивалентті кернеулер (жүктеме қолдану аймағында/құбыр түбіндегі канавкаларда).

Тор тәуелсіздігі критерийі (орындалды):

$$\frac{|\sigma_{vM}^{med} - \sigma_{vM}^{fine}|}{\sigma_{vM}^{fine}} \leq 2\%, \frac{|\delta^{med} - \delta^{fine}|}{\delta^{fine}} \leq 1.5\%, \quad (2.6)$$

Кесте-2.1 – Тордың тығыздығына байланысты есептеу нәтижелерінің

Тор (сетка)	Түйіндер, млн	Элементтер, млн	σ_{vM}^{max} , МПа	fine-ге қатысты $\Delta\sigma$, %	δ_{max} , мкм	fine-ге қатысты $\Delta\delta$, %	CPU, мин
ірі (coarse)	0.32	0.21	95.4	+6.1	6.92	+2.1	2.3
орташа (medium)	0.71	0.48	100.2	+1.4	6.84	+1.0	6.5
ұсақ (fine)	1.45	0.99	101.6	—	6.77	—	18.9

Егер айырмашылықтар шекті мәннен асса — торды жергілікті түрде контакті аймақтарда және/немесе кернеу концентрациясы болатын жерлерде (канавкалар, өтпелі радиустар) тығыздау қажет.

Қажет болған жағдайда GCI (ASME) бойынша бағалау жүргізуге болады: конвергенция тәртібін және экстраполяцияланған шешімнің сенімді интервалын есептеу; диссертация үшін айырмашылық пайызы мен «көрсеткіш vs h» графигі жеткілікті.

Шешуші параметрлері және конвергенция критерийлері

– Параметрлер: Static, сызықты серпімділік; жергілікті контактілерді нақтылау үшін — центр/люнет аймағында контактты қосу (frictionless).

– Қателік бойынша конвергенция: $\|R_F\|/\|F\| < 1\%$, $\|R_F\|/\|F\| < 1\%$ әр қадам бойынша; энергия $< (10^{-4})$.

– Релаксация/итерация коэффициенті: әдепкі бойынша; контакт болса — жүктеме қадамын автоматты бақылау.

– Адекваттылық тексерулері: симметриялы өрістер (симметриялы схема кезінде), қатты бекітілген беттерде «кірлі» максимумдардың болмауы, k_Z^{tail}, k_X^{rest} -ті екі еселегенде нәтижелердің тұрақтылығы (опоралардың параметрлік сезімталдығы).

Түсіндіру және тәжірибемен байланыс

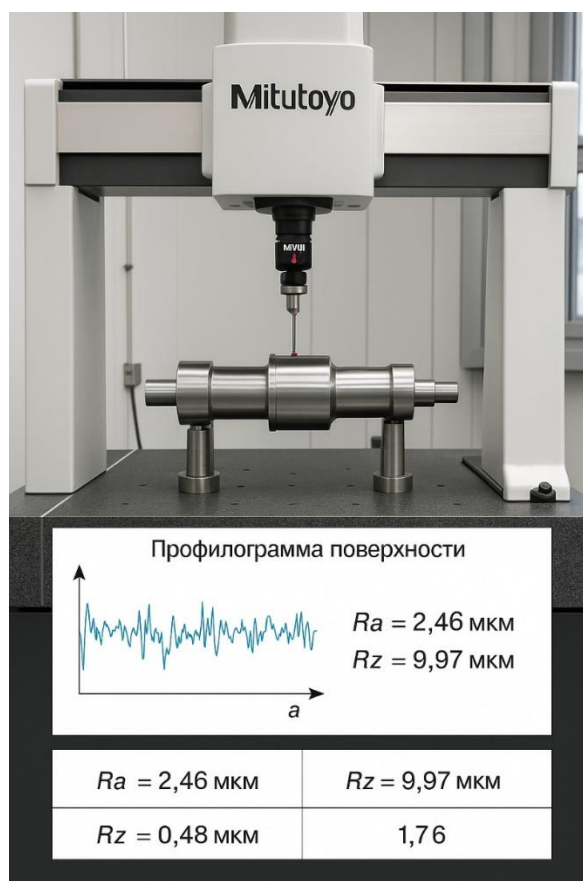
– Алынған $\delta_{max} \approx 6.8 \mu m$ нәтижелері балка бойынша есептеу және тәжірибелік деректермен сәйкес келеді — демек, қатандық/опора моделі адекватты.

– Контакт аймағындағы $\sigma_{vM} < a$ ғыс шегі $\rightarrow$ формалық тұрақтылықты бағалау үшін сызықты серпімділік қабылдауы дұрыс.

– Верификация үшін қосу керек: орнату фотосы, контакт аймағының геометриясы, жүктеме схемасы $F_c, F_p, F_f, \sigma_{\nu M}$ және δ таралуының скриншоттары, «өлшем vs элемент көлемі» графигі.[8].

2.4 Беттің дәлдігі мен микрогеометриясын өлшеу әдістері

Геометриялық өлшемдердің дәлдігін және беттің жағдайын тексеру – валдарды механикалық өңдеу процестерінің тиімділігін бағалаудың негізгі кезеңі болып табылады. Бұл кезең сандық модельдеудің және эксперименттік зерттеулердің нәтижелерін объективті түрде тексеруге мүмкіндік береді, сондай-ақ алынған сипаттамалардың конструкциялық құжаттама талаптарына және қолданыстағы өңдеу дәлдігі мен сапа стандарттарына сәйкестігін анықтауға мүмкіндік береді.



2.5-сурет — Профилометрде беттің параметрлерін өлшеу

1. Геометриялық дәлдікті өлшеу

Өңделген біліктердің геометриялық дәлдігін бақылау цилиндрлік, түзу сызықтылық, дөңгелектілік сияқты формалық ауытқуларды анықтауды, сондай-ақ элементтердің өзара орналасу параметрлерін тексеруді қамтиды — коаксиалдылық, радиалды ойықтық және шеттік беттердің

перпендикулярлығы. Қосымша, конструкциялық құжаттама талаптарына сәйкестігін растау үшін сызықтық өлшемдер өлшенеді.

Өлшеу процесінде келесі әдістер мен бақылау құралдары қолданылады:

- Сандық бағдарламалық басқарумен координаталық өлшеуіш машиналар (КӨМ), бөлшектің геометриясын жоғары дәлдікпен үшөлшемді сканерлеуді қамтамасыз етеді (өлшеу қателігі $\pm 1-2$ мкм аспайды);

- Оптикалық өлшеу жүйелері (мысалы, MarForm, Zeiss, Mitutoyo), беттердің формасын және радиалды ойықтығын бақылауға арналған;

- Контакт әдістері — индуктивті датчиктер, микрометрлік басшылар және индикаторлар арқылы локальды ауытқуларды өлшеу.

Өлшеу қателігі мына формула арқылы анықталады:

$$\Delta = x_{\text{изм}} - x_{\text{ном}},$$

мұндағы Δ — номиналды өлшемнен ауытқу, $x_{\text{изм}}$ — нақты өлшенген мән, $x_{\text{ном}}$ — техникалық құжаттамада берілген өлшем.

2. Беттің кедір-бұдырлық параметрлерін бақылау

Өңделген беттің микрогеометриялық күйінің көрсеткіштері R_a орта арифметикалық кедір-бұдырлық биіктігі, R_z он нүкте бойынша биіктігі және S_m біркелкі емес қадамы сияқты параметрлермен сипатталады. Бұл сипаттамаларды анықтау үшін жоғары кеңістіктік рұқсаттылықты қамтамасыз ететін контактілі профилометрлер мен үшөлшемді оптикалық сканерлер қолданылады.

Орта арифметикалық кедір-бұдырлық параметрін есептеу үшін келесі өрнек қолданылады:

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y(x)| dx, \quad (2.7)$$

мұндағы L — профильдің базалық учаскесінің ұзындығы, ал $y(x)$ — нақты беттің оның орта сызығынан ауытқуы.

Қазіргі заманғы өлшеу кешендері беттің профилін автоматты түрде тіркеуге және визуализациялауға, сондай-ақ R_a , R_z , R_q және W_t мәндерін жоғары дәлдікпен және қайталанымдылықпен анықтауға мүмкіндік береді.

3. Өлшеу нәтижелерін статистикалық өңдеу

Алынған бақылау нәтижелерінің дұрыстығы мен объективтілігін қамтамасыз ету мақсатында эксперименттік деректерге статистикалық талдау жүргізіледі. Ол келесі кезеңдерді қамтиды:

- өлшеулер жиынтығы бойынша орта мәндерді, дисперсияны және стандарттық ауытқуды есептеу;

- нәтижелердің қайта өндірілуін және өңдеу процесінің технологиялық тұрақтылығын бағалау;

- өлшемдердің тұрақтылығын бақылау және кездейсоқ ауытқуларды анықтау үшін $\bar{X}-R$ бақылау карталарын құру.

Орта квадраттық ауытқу келесі өрнекпен анықталады:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (2.8)$$

мұндағы x_i – жеке өлшеу нәтижелері, $\bar{x}$ – орта мән, n – өлшеулер саны.

4. Дәлдікті кешенді бағалау

Процестің белгіленген допустарға сәйкестігін интегралды түрде бағалау үшін технологиялық қабілеттілік көрсеткіші қолданылады:

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma}, \quad (2.9)$$

$$C_{pk} = \min\left(\frac{USL - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - LSL}{3\sigma}\right), \quad (2.10)$$

мұндағы USL және LSL – жоғарғы және төменгі допуск шектері μ – параметрдің орта мәні, σ – стандарттық ауытқу.

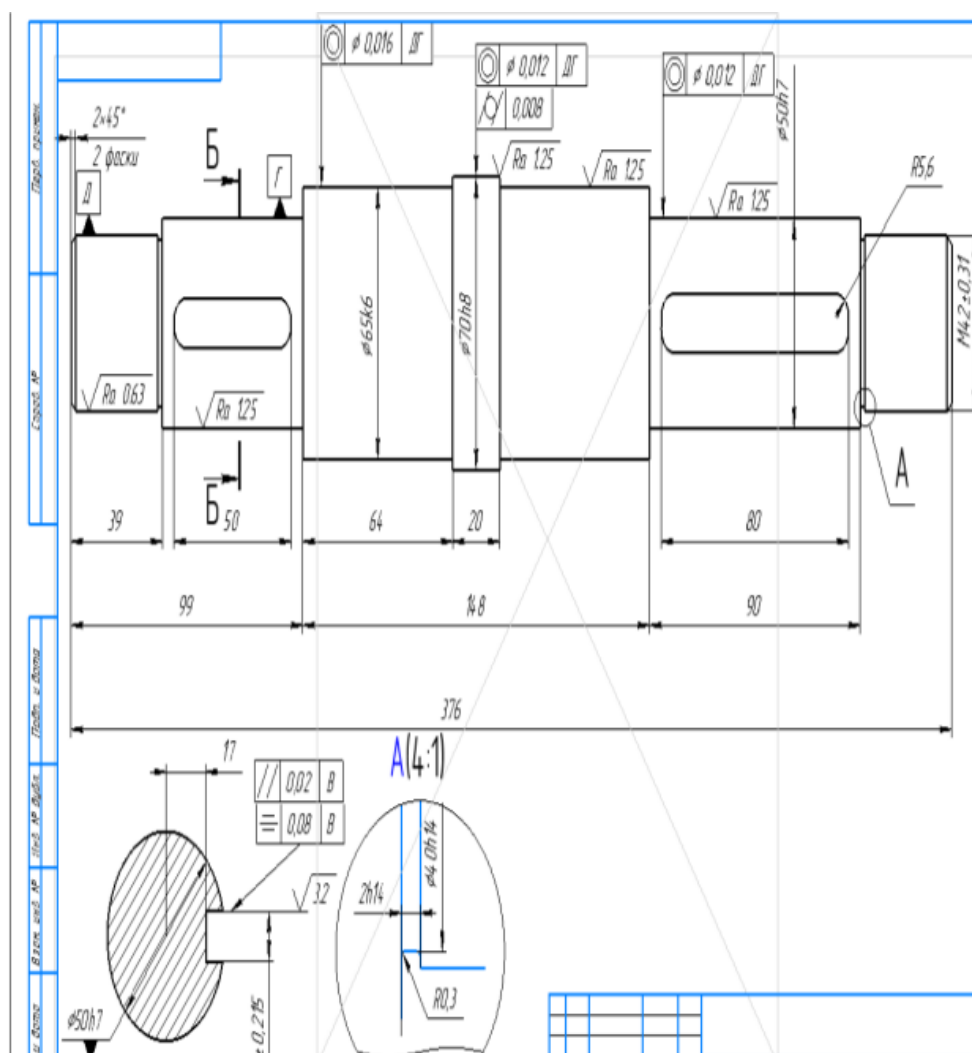
$C_p \geq 1.33$ және $C_{pk} \geq 1.33$ мәндері процесс тұрақты әрі басқарылатын екенін көрсетеді.

5. Бақылау нәтижелерін талдау

Алынған өлшеу нәтижелері FEA және CAM модельдеулері барысында есептелген деректермен салыстырылады. Егер айырмашылықтар анықталса, реттеу параметрлері, құралды баптау немесе дайындаманы бекіту схемасы түзетіледі, бұл анықталған ауытқуларды жоюға мүмкіндік береді.

Метрологиялық бақылау әдістері мен статистикалық талдауды жүйелі қолдану цифрлық өндіріс принциптеріне толық сәйкес келетін жабық сапа басқару жүйесін қалыптастырады. Мұндай тәсіл технологиялық процестің жоғары қайталанғыштығын, тұрақтылығын және біліктерді өңдеудің талап етілетін дәлдігін қамтамасыз етеді. [9].

2.5 Білікті APM Shaft есептеу



2.6 - Сурет – Сатылай біліктің жұмыс сызбасы

Кесте – Техпроцесс картасы

Опера ция №	Операция атауы	Станок/жа бдық	База (базалау)	Құрал	Бақылау (ОТК)
010	Дайындаман ы кесу	Ленточная пила	Өлшем бойынша	Пила полотна	Ұзындық рулетка/штанг ен
020	Торцовка + центрлеу (1- ұшы)	ЧПУ токарь	Патронда қысу	Торцовочный резец, центрлік бұрғы	Торец перпендикуля рлығы, центр тесігі
030	Торцовка + центрлеу (2- ұшы)	ЧПУ токарь	Патронда ауыстырып қысу	Торцовочный резец,	Жалпы ұзындық L, центр осы

Опера ция №	Операция атауы	Станок/жа бдық	База (базалау)	Құрал	Бақылау (ОТК)
				центрлік бұрғы	
040	Қара жону (черновое точение) сатылар	ЧПУ токарь	Центрлер арқылы (между центрами)	Черновой резец CNMG	Диаметрлер алдын ала (штанген)
050	Таза жону (чистовое точение)	ЧПУ токарь	Центрлер арқылы	Чистовой резец VNMG/DNM G	Микрометрме н Ø, Ra талаптары
060	Канавка/иық тарды нақтылау (егер бар)	ЧПУ токарь	Центрлер арқылы	Канавочный резец	Ұзындық өлшемдері, фаска
070	Резьба кесу (сызба бойынша)	ЧПУ токарь	Патрон + центр (тірек)	Резьбовой резец 60°	Резьба калибрі, кадам
080	Фаска, радиус, шеттерін өңдеу	ЧПУ токарь	Центрлер/п атрон	Фасочный резец	Көзбен + штанген
090	Шпонка ойығын фрезерлеу (1)	ЧПУ фрезер	V- призма/қыс қыш, осьтік туралау	Пазовая фреза	Ойық ені/тереңдігі (штанген/кали бр)
100	Шпонка ойығын фрезерлеу (2) (егер бар)	ЧПУ фрезер	Сол база	Пазовая фреза	Симметрия/ор наласуы
110	Дебюринг, қыр кетіру	Қолмен	—	Надфиль/абр азив	Қауіпсіз жиек
120	Қорытынды бақылау	ОТК	—	Микрометр, индикатор	Ø, L, соосность/бие ние, Ra

(механизм / торап)

Сызбадағы білік — **ступенчатый вал**, яғни **беріліс валдарының** классикалық түрі.

Конструкциясына қарап бұл вал көбіне мына механизмдерде болады:

1) Редуктордың аралық (промежуточный) немесе шығыс (выходной) валы

- бірнеше диаметрлі отырғызу орындары бар → подшипник + шестерня отырады
- шпонка ойықтары бар → шестерня/муфта момент береді
- резьба бар → гайкамен осьтік фиксация жасалады

2) Станок жетегі (шпиндель немесе беріліс тораптары)

- білікке шкив/муфта отырғызуға ыңғайлы
- дәлдік және Ра талаптары бар

3) Конвейер/насос/компрессор жетегі

- муфта арқылы жалғанады
- подшипник тіректері болады

Бұл валдың негізгі функциялары:

1. Айналмалы қозғалысты беру (қозғалтқыш → редуктор → жұмыс органы)
2. Тісті дөңгелек, муфта, шкив отырғызу
3. Подшипник арқылы жүктемені қабылдау
4. Осьтік фиксация (иықтар + резьба/гайка арқылы)

Шпонка арқылы моментті сырғанаусыз беру

Білікті жобалағанда диаметрлердің бірден кішірейуіне және ұшқыр бұрыштардың болдырмауын қадағалаған жөн, өйткені олар жергілікті жоғарғы кернеудің пайда болуына және беріктіктің төмендеуіне әкеледі.

Біліктің жарамдылығына шешім беру үшін келесі есептеулерді жүргізу керек:

- статистикалық беріктік;
- кедергілерге;
- қаттылыққа;
- беріктікке.

Бұдан басқа кейбір біліктерге қосымша беріктікке және қажалу беріктігіне есептеулер жүргізу қажет. Барлық аталған есептеулер тексеру түрінде жүргізіледі, белгілі геометрия және күш арқылы кернеуді, ығысуды, статистикалық жіне беріктік коэффициентін, формалары сияқты шығу параметрлерін анықтау үшін.

Білік секцияларында қиықжиықтарды жасау.

«Қиықжиық» пернесін басып қажетті режимге өтеміз (мәзір тапсыру/қиықжиық) және сегмент шекарасына жақын жерді курсор

арқылы басамыз. Ашылған диалог терезесіне «қиықжиық» қажетті қиықжиық параметрлерін енгіземіз.

Білік иықтарын жұмырландыру.

«Галтель» кнопкасына басамыз (мәзір тапсыру/Галтель), содан кейін екі сегмент арасындағы орынды басамыз. Бұдан кейін «Галтель» диалог терезесі ашылады, оған қажетті өлшемдерді енгіземіз.

Біліктерді (вал) СЖБ (ЧПУ) станоктарында өңдеу бағдарламасын жасау үшін негізінен ISO (G-код) стандарттары қолданылады.

Білікті өңдеудің негізгі кезеңдері:

1. Бетті тегістеу (Торцевание): Дайындаманың шетін тегістеу.
2. Алдын ала (дөрекі) жону (Черновое точение): Негізгі артық металды қабаттап алу.
3. Тазалап жону (Чистовое точение): Соңғы өлшемге келтіру және беттің тегістігін қамтамасыз ету.
4. Ойық салу (Канавки): Тиісті жерлерден ойықтар шығару.
5. Ирек ойма (Резьба) кесу: Егер сызбада көрсетілсе.

Бағдарламаның үлгісі (Fanuc жүйесі үшін)

Тапсырма: Диаметрі 50 мм дайындаманы 45 мм-ге дейін, 100 мм ұзындықта жону.

gcode

%

O0001 (BILIK_ONDEU) (Бағдарламаның нөмірі)

G21 G40 G80 G99 (Метрикалық жүйе, түзетулерді тоқтату)

G54 (Координаттар жүйесін тандау)

T0101 (№1 кескіш - дөрекі жонуға арналған)

G96 S180 M03 (Тұрақты кесу жылдамдығы 180 м/мин,

шпиндельдің айналуы)

G50 S2500 (Айналымды 2500-ге дейін шектеу)

G00 X52. Z2. M08 (Дайындамаға жақындау, салқындатқыш сұйықтықты қосу)

(G71 циклі - Дөрекі өңдеу)

G71 U2.0 R1.0 (U-бір өткендегі тереңдік, R-кейін шегіну)

G71 P10 Q20 U0.5 W0.1 F0.25 (P,Q-контур нөмірлері, U,W-тазалауға қалдырылған қор)

N10 G00 X45. (Контурдың басталуы)

G01 Z-100. (Цилиндр бойымен жону)

N20 X52. (Контурдың аяқталуы)

(Тазалап өңдеу)

T0202

(№2 кескіш - тазалап жонуға арналған)

G96 S220 M03

G00 X52. Z2.

G70 P10 Q20

(G70 циклі - тазалау проходы)

G00 X200. Z200. M09

(Қауіпсіз жерге алыстау,

салқындатқышты өшіру)

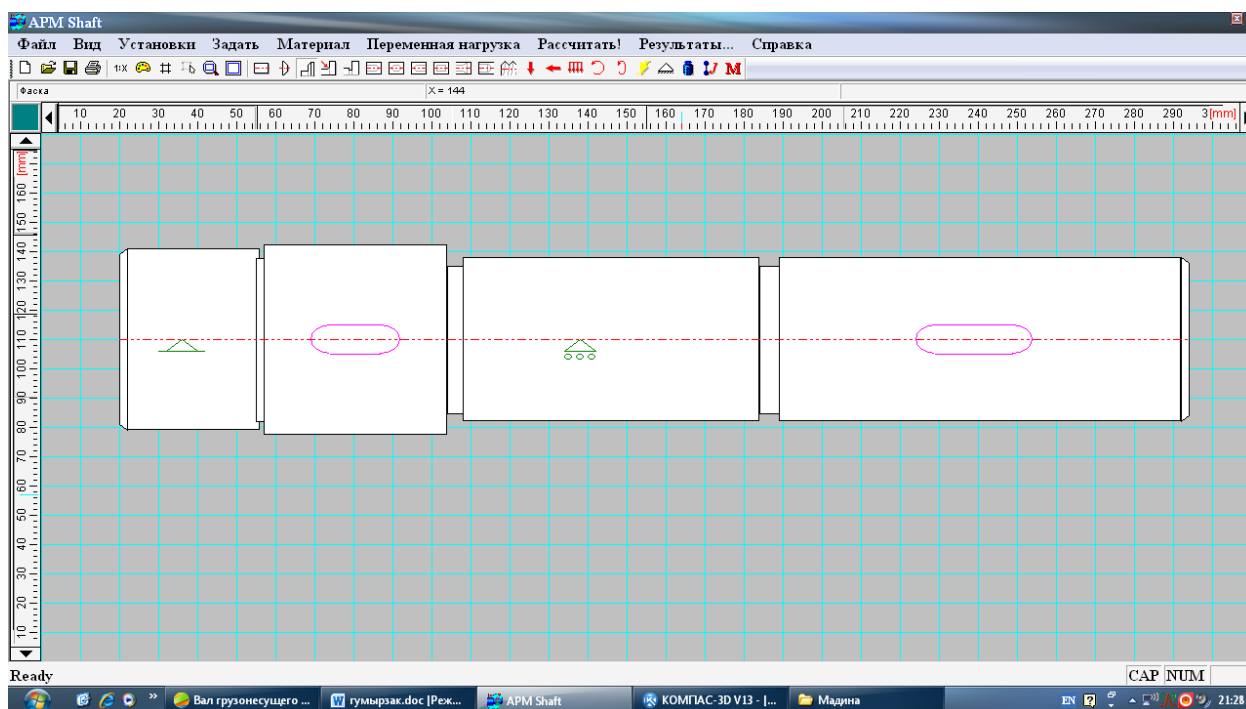
M30

(Бағдарламаның аяқталуы)

1.4. Ажарлау дөңгелегі шығуына қажетті ойықты жасау.

«Ойық» пернесін басып (мәзір Тапсырыс/Ойық) және екі сегмент аралығына көрсеткішті басамыз. Бұл «Ойық түрін тандау» (Сурет 3) терезесінің пайда болуына әкеледі, білікке жасауға болатын ойықтың үш түрлі схемасын көреміз.

APM Shaft модуліндегі білік схемасы



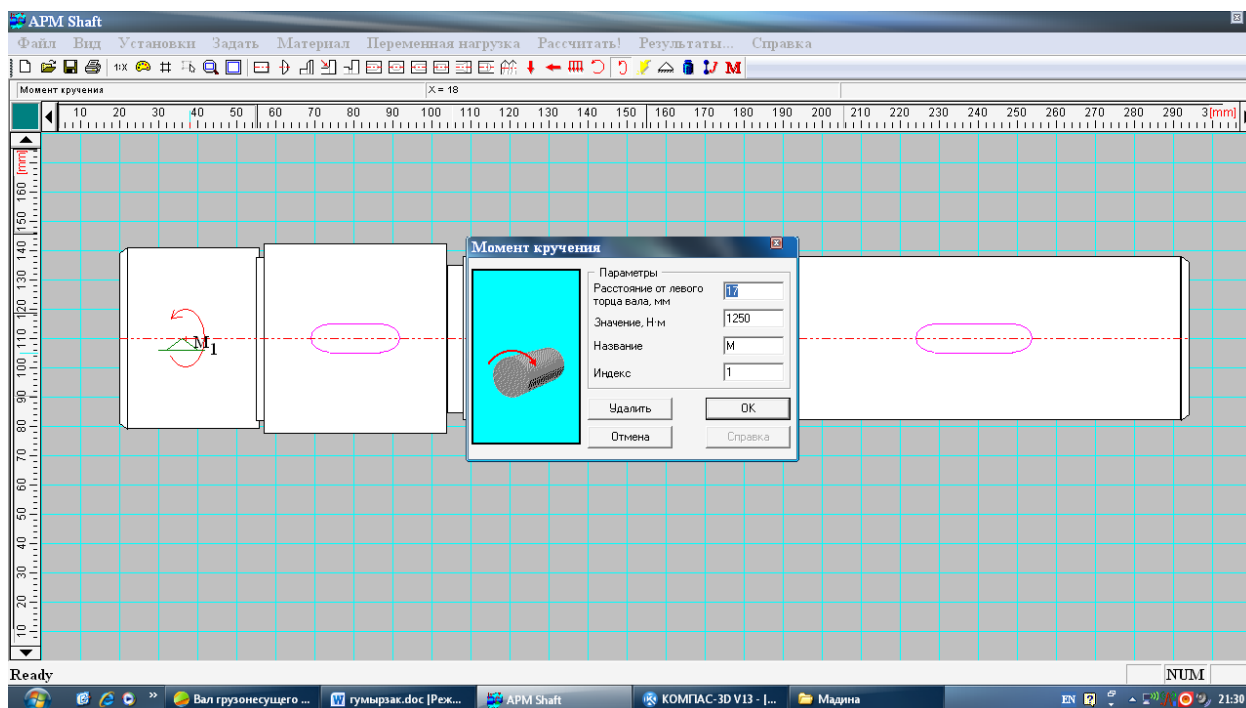
2.7 - Сурет - APM Shaft модуліндегі білік схемасы

Күшті бекіту есептеу схемасын жасау
Білік тірегінің тапсырмасы.

Білік тірегін тапсыру үшін қажетті режимге «Тірек» пернесін басу арқылы көшеміз. Бұдан кейін «Тірек» диалог терезесі ашылады оған қажетті параметрлерді енгіземіз.

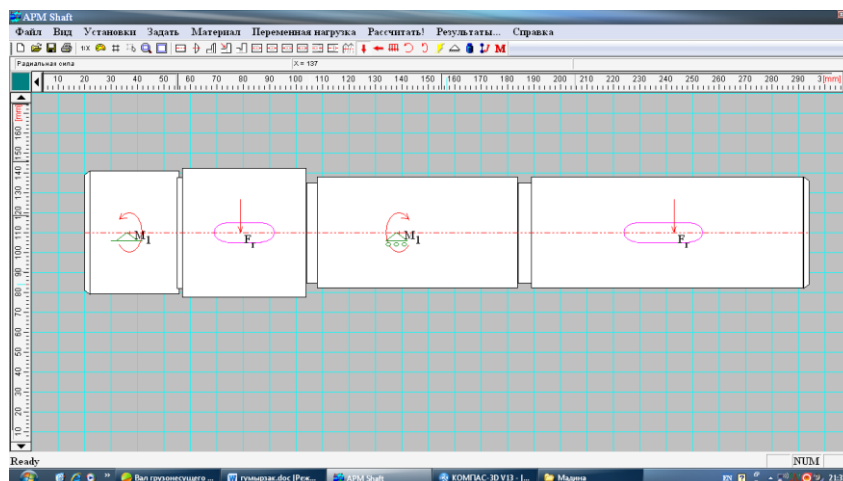
Алдымен берілген тізімнен қажетті тіректі тандаймыз (жылжымайтын қатты, жылжитын қатты немесе серпінді), одан кейін орналасуын анықтаймыз (біліктің сол жақ басынан), жасалғалы жатқан тіректің қаттылығын тағайындаймыз. Қарастырып отырған мысалда біліктің оң жағына жылжымайтын қатты тіректі орнатамыз, өйткені білікте өстік күшті қабылдайды, ал сол жағына жылжымалы қатты тіректі. Сол жақ тірекке енгізу алаңына «Біліктің сол жақ қашықтығы, мм» 25 санын енгіземіз. Осыған ұқсас түрде екінші тіректі жасаймыз.

3. Күшті жасау.



2.8 - Сурет – айналу моментінің тапсырмасы

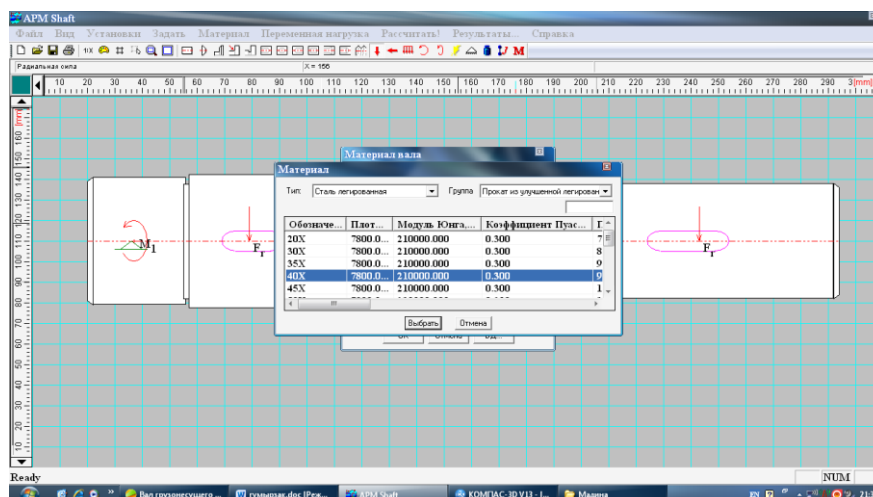
Көлденең күш тапсырмасы. «Көлденең күш» пернесін басу арқылы (мәзір Тапсыру/Көлденең күш) радиалды күшті тапсыру режиміне өтеміз және ашылған «Көлденең күш» диалог терезесіне параметрлер мен күштің белгіленуін енгіземіз. F_{t1} және F_{r1} көлденең күш тапсырмасын қарастырамыз.



2.9 - Сурет – Біліктің есептеу схемасы

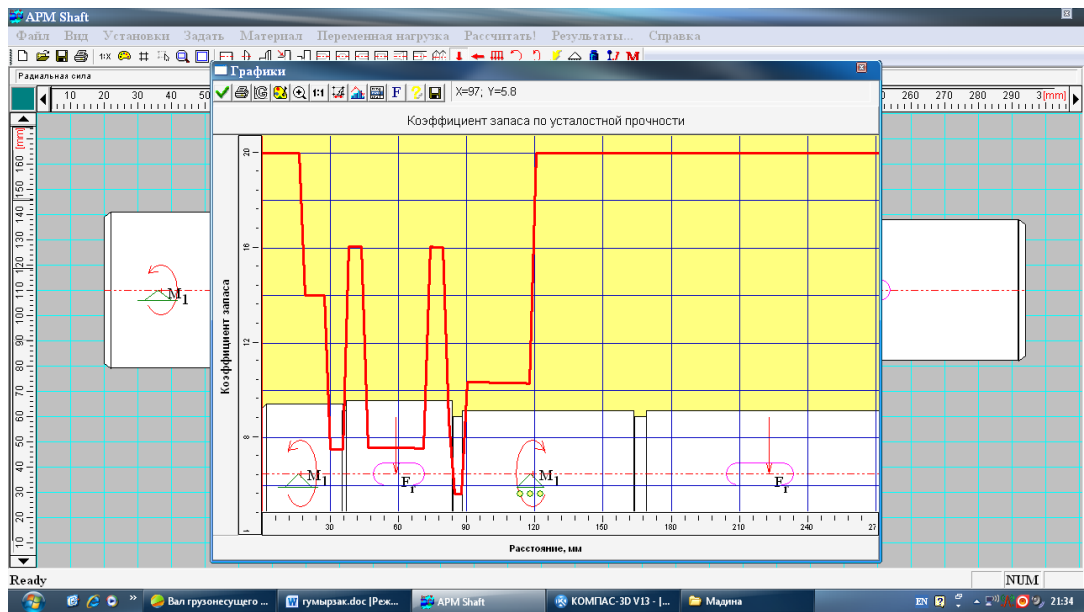
Біліктің материал параметрлерінің тапсырмасы.

Біліктің материалын екі тәсілмен таңдауға болады: шарт бойынша берілген параметрлерді енгізу немесе деректер базасынан материалдарды таңдау арқылы. Материалдың белгілі параметрлерін енгізу үшін **«Материал»** пернесін басу керек. «Білік материалы» деген диалог терезесіне материалдар параметрлері енгізіледі. Егер материал маркасы деректер қорынан алынатын болса, онда алдымен сол қорды шақыру керек ол үшін **«Деректер қоры»** пренесін басады. Қарастырып отырған мысалда болат материалы берілгендіктен сол марканы деректер қорынан аламыз.

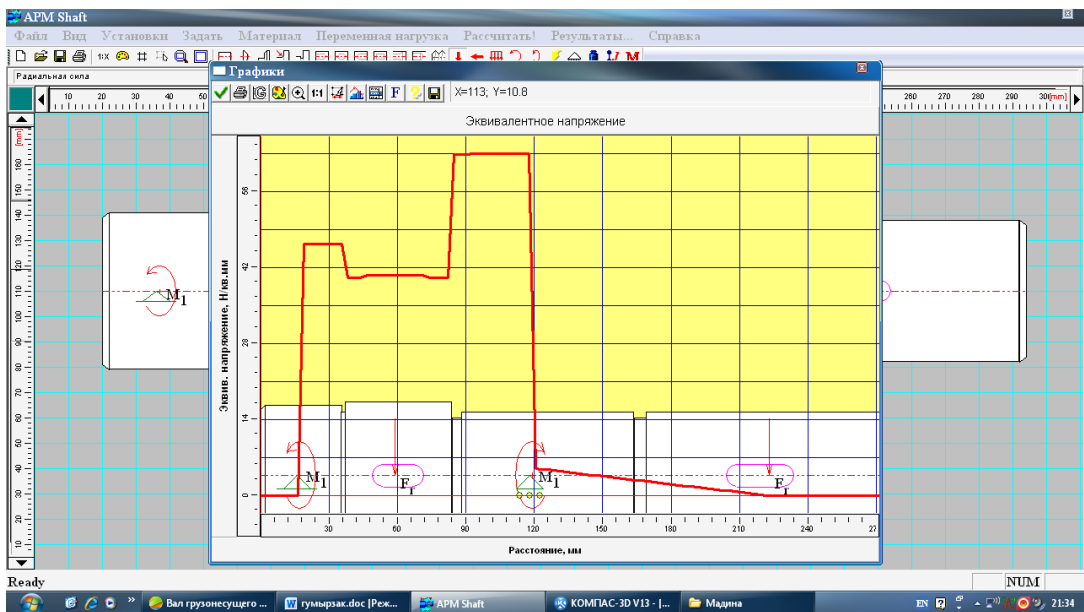


2.10 -Сурет-Материал таңдау

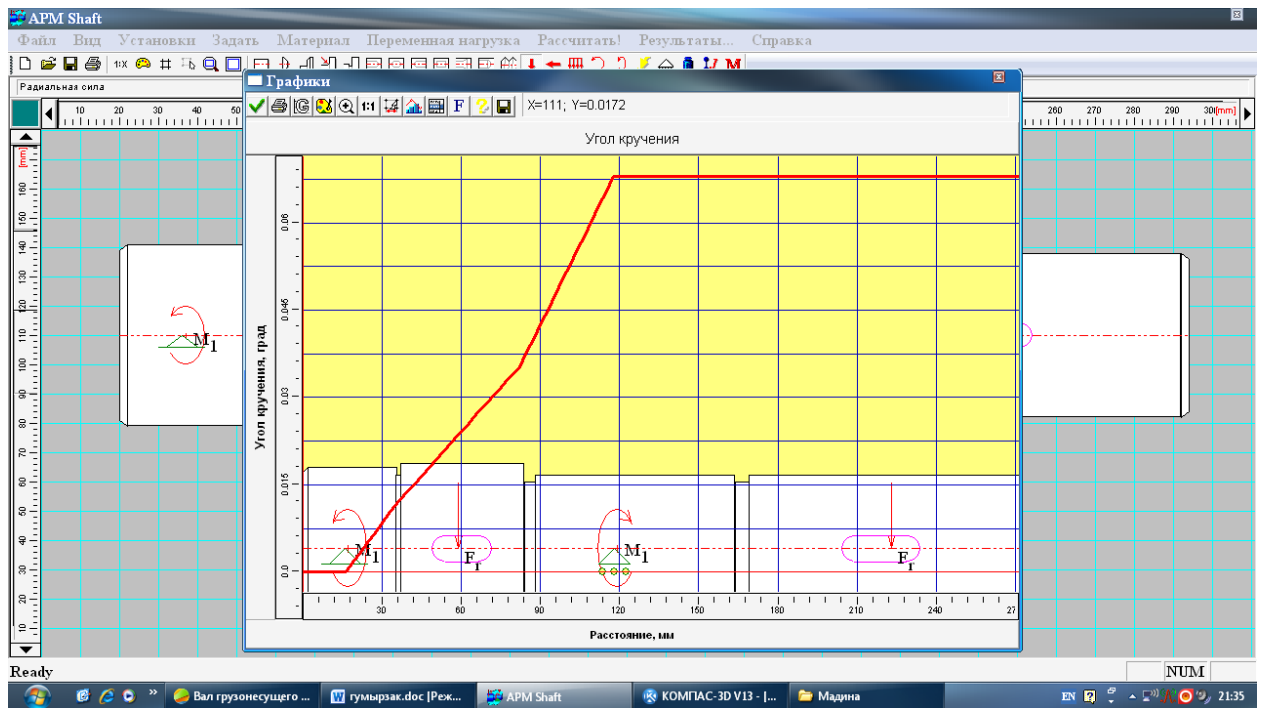
Есептеу нәтижелері



2.11-Сурет- беріктік жанасу коэффициенті



2.11 - Сурет- эквивалентті кернеу



2.12-Сурет- айналу бұрышы.

3 Біліктерді өңдеудің тиімділігін практикалық зерттеу

3.1 Жабдық пен құрал-сайманның сипаттамасы

Біліктерді өңдеудің тиімділігін практикалық тексеру заманауи сандық бағдарламалық басқару (СББ) жүйесімен жабдықталған металлжесу станоктарын, сондай-ақ технологиялық параметрлерді бақылау және реттеудің автоматтандырылған құралдарын қолдану арқылы жүзеге асырылды.



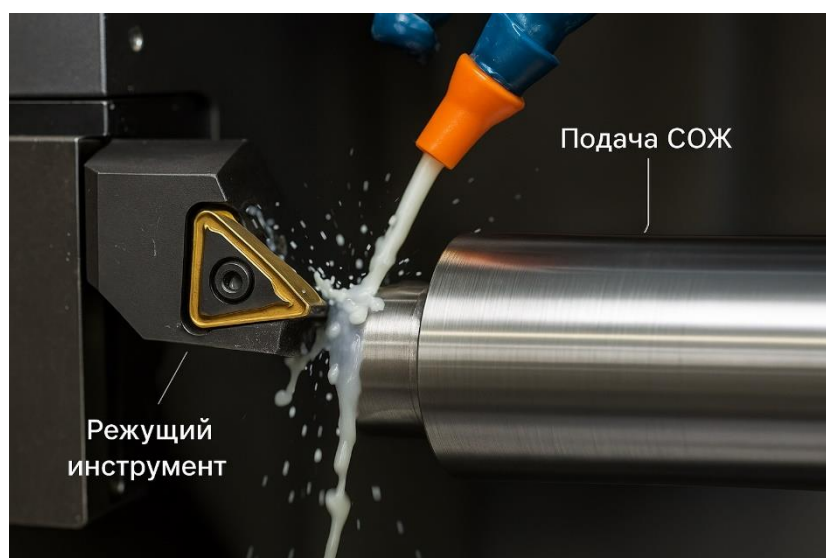
3.1-сурет — Станок DMG MORI CTX Alpha 500

1. Жабдық

Эксперимент барысында техникалық параметрлері ұқсас заманауи DMG MORI CTX Alpha 500 (Сур. 3.1) маркалы немесе оның аналогы болып табылатын сандық бағдарламалық басқаруы (СББ) бар токарь-фрезерлі өңдеу орталығы қолданылды. Жабдық келесі мүмкіндіктерді қамтамасыз етеді:

- шпиндельдің айналу жиілігі 5000 айн/мин дейін;
- негізгі жетектің қуаты 15 кВт-қа дейін;
- X/Z координаталық осьтері бойынша суппорт жүрісі 230/600 мм шегінде;
- С осінің және жетектелетін құралдың болуы, бұл фрезерлік операцияларды орындауға мүмкіндік береді;
- ± 2 мкм-ге дейінгі жоғары дәлдікпен позициялау.

Технологиялық процесті басқару үшін Siemens Sinumerik 840D sl жүйесі қолданылады, ол бейімделген беріліс реттеуі, кескіш құралдың тозуын автоматты есептеу, сондай-ақ өңделетін бөлшектің орын ауытқуын бақылаудың кіріктірілген құралдары сияқты функцияларды қамтиды.



3.2-сурет — Кесу құралы және СОЖ беру жүйесі

Кесте-3.1 — 45 болаттың механикалық қасиеттері мен сипаттамалары

Параметр	Мәні	Ескертпе
Болат маркасы	45	ГОСТ 1050–2013
Химиялық құрамы, %	C: 0,42–0,50; Mn: 0,50–0,80; Si: 0,17–0,37; Cr ≤ 0,25; Ni ≤ 0,25; S ≤ 0,04; P ≤ 0,035	Орташа құрам
Тығыздығы, кг/м³	7850	20 °C кезінде
Беріктік шегі σ_v , МПа	600–850	Нормализациядан немесе шынықтырудан кейін
Ағу шегі $\sigma_{0.2}$, МПа	355–590	Термоөңдеу түріне байланысты
Салыстырмалы ұзару δ , %	14–17	Стандартты үлгі үшін
Соққы тұтқырлығы KCU, кДж/м²	49	Орташа мән
Қаттылығы, HB	170–229	Жеткізілген күйде
Шынықтырудан кейінгі қаттылық, HRC	48–55	Шынықтыру және жасыту соң
Шынықтыру температурасы, °C	820–850	Суда немесе майда
Жасыту температурасы, °C	500–600	Ішкі кернеулерді жою үшін
Серпімділік модулі E, ГПа	210	Типтік мән
Сызықтық жылулық ұлғаю коэффициенті $\alpha \cdot 10^{-6}$, 1/°C	11,8	20–100 °C аралығында

2. Дайындама материалы

Эксперименттік зерттеулер барысында бастапқы материал ретінде ГОСТ 1050–2013 талаптарына сәйкес дайындалған 45 маркалы конструкциялық

көміртекті болаттан жасалған білік дайындамалары қолданылды. Бұл материал өзінің механикалық беріктігі, пластикалық қасиеттері және жақсы технологиялық өңдеуге жарамдылығының оңтайлы үйлесіміне байланысты машина жасау саласында кеңінен қолданыс тапқан.

Төменде материалдың негізгі физика–механикалық сипаттамалары келтірілген.

Зерттелетін болаттың негізгі механикалық сипаттамаларына мыналар жатады: $\sigma_B = 600 \div 650$ МПа, $\sigma_T = 355$ МПа, $HV = 197 \div 229$. Дайындамалардың өлшемдері $d = 50$ мм және $L = 300$ мм болды, ал олардың торцтары базалық беттерді қалыптастыру үшін алдын ала өңделді.

3. Кескіш құрал

Тәжірибелерді жүргізу барысында жинақты токарлық құрал қолданылды, ол Sandvik Coromant компаниясы шығаратын GC4225 қорытпасынан жасалған CNMG 120408-PM типті ауыстырмалы қатты қорытпалы пластиналармен жабдықталды. Аталған пластиналар оң алдыңғы бұрышқа және $r_\Sigma = 0,8$ мм шың радиусына ие, бұл дәлдікпен өңдеу жағдайында жоғары сапалы бетті тұрақты қалыптастыруға мүмкіндік береді.

Державка ретінде ішкі салқындатқыш сұйықтықты 15 барға дейінгі қысыммен беруге арналған жүйесі бар PCLNR 2525M12 үлгілері қолданылды. Мұндай конструкция кесу аймағын тиімді салқындатып, құралдың тозуға төзімділігін арттырады.

4. Салқындату және майлау құралдары

Кескіш құралдың тозуға төзімділігін арттыру және кесу аймағында тұрақты температуралық режимді сақтау үшін біріктірілген смазка-салқындатқыш сұйықтық (СОЖ) беру жүйесі қолданылды.

Оның құрамына мыналар кірді:

- су негізіндегі эмульсияны ішкі арна арқылы беру;
- MQL (Minimal Quantity Lubrication) технологиясы бойынша аэрозольдік салқындатудың қосымша контуры.

Өңдеу процесіндегі температураны бақылау кіріктірілген датчиктер арқылы жүзеге асырылды. Олар сандық бағдарламалық басқару жүйесімен (СББ) байланыстырылып, нақты уақыт режимінде жылулық параметрлерді автоматты түрде қадағалап және түзетуге мүмкіндік берді.

5. Өлшеу құрал-жабдықтары

Өңделген бөлшектердің геометриялық дәлдігін бақылау Mitutoyo Crysta-Arex S574 координаталық өлшеу машинасы арқылы жүргізілді, ал беттің тотықтылық параметрлері Taylor Hobson Talysurf PGI 1200 профилетрімен анықталды. Алынған эксперименттік мәліметтер нәтижелерді статистикалық өңдеуге және оларды сандық модельдеу процесінде алынған есептік мәндермен салыстыруға негіз болды.

Осылайша, құрылған эксперименттік база сандық интеграцияланған технологиялық кешенді білдіреді, оған сандық бағдарламалық басқаруы бар станок, жоғары дәлдікті құрал-жабдықтар, сондай-ақ мониторинг және метрологиялық бақылау жүйелері кіреді.

Экспериментті осылай ұйымдастыру алынған нәтижелердің жоғары сенімділігін қамтамасыз етеді және кесу режимдерінің параметрлерін өзгерткенде валдарды өңдеу процесінің тиімділігін жан-жақты талдауға мүмкіндік береді. [10].

3.2 Кесу режимдерін таңдау және негіздеу

Кесу параметрлерін рационалды анықтау — біліктердің механикалық өңдеу тиімділігін талдау процесіндегі ең маңызды кезеңдердің бірі болып табылады.

Өңдеу режимдерін таңдаудың негізгі мақсаты — дәлдік, алынған беттің сапасы және өнімділік арасындағы оңтайлы балансты қамтамасыз ету, сонымен қатар құралдың минималды тозуын және энергия шығынын азайтуды қамтамасыз ету.

1. Кесу режимінің негізгі параметрлері

Токарлық өңдеу кезінде кесу режимінің параметрлері үш негізгі шамамен анықталады:

v — кесу жылдамдығы (м/мин),

f — беріліс (мм/айналым),

a_p — кесу тереңдігі (мм).

Бағдарламалық программалық басқарылатын станоктарда аталған параметрлер эксперименттік жолмен алынған эмпирикалық тәуелділіктер негізінде есептеледі және кейін өңделетін материалдың физикалық-механикалық қасиеттері, кескіш құралдың сипаттамалары және қажетті дәлдік пен беттің сапасы деңгейін ескере отырып нақтыланады.

2. Есептеу үшін бастапқы мәліметтер

Құрылымдық болат 45-тен дайындамаларды кескіш твердосплав құралын пайдалана отырып өңдеу кезінде кесу режимінің параметрлері үшін келесі аралық ұсынылады:

– Қарапайым (шершық) өңдеу:

кесу жылдамдығы $v = 150\text{--}200$ м/мин, беріліс $f = 0,25\text{--}0,35$ мм/айналым, кесу тереңдігі $a_p = 2,0\text{--}3,0$ мм;

– Аяқтау (финиш) өңдеу:

кесу жылдамдығы $v = 250\text{--}350$ м/мин, беріліс $f = 0,10\text{--}0,20$ мм/айналым, кесу тереңдігі $a_p = 0,2\text{--}0,8$ мм.

Аталған технологиялық параметрлер диапазоны Sandvik Coromant және ISCAR сияқты жетекші құрал өндірушілердің ұсыныстарына сәйкес келеді және тұрақты кесу жағдайында кескіш пластинаның беріктігін $T \approx 20$ минут деңгейінде қамтамасыз ету үшін есептелген. [11].

Құрал беріктігі критерийі бойынша режимдерді оңтайландыру

Механикалық өңдеу барысында оңтайлы кесу жылдамдығын анықтау үшін Тейлордың эмпирикалық тәуелділігі қолданылады, ол құралдың беріктігі параметрлері мен жылдамдық арасындағы байланысты сипаттайды:

$$v \cdot T^n = C, \quad (3.1)$$

мұндағы (T) — кескіш құралдың беріктік уақыты, (n) — кескіш пластина материалының қасиеттерін сипаттайтын көрсеткіш (твёрдосплав қоспалар үшін тәжірибе арқылы анықталады), (C) — тәжірибелік жолмен алынған эмпирикалық тұрақты.

Мысал ретінде GC4225 қоспасын болат 45 өңдеу кезінде қарастырайық. Берілген беріктік (T = 20) мин болғанда, оңтайлы кесу жылдамдығы мына өрнек арқылы есептеледі:

$$v = \frac{C}{T^n} = \frac{420}{20^{0.3}} \approx 230 \text{ м/мин}, \quad (3.2)$$

Осылайша, Тейлор формуласы бойынша есептеу кескіш құралдың ұзақ мерзімділігі мен өңдеу өнімділігін қамтамасыз ететін рационалды кесу режимдерін таңдауға мүмкіндік береді.

Беру және қыр тереңдігінің әсерін ескеру

Кесу параметрлерінің ішінде алынатын беткі қабат сапасына ең үлкен әсерді беру (f) көрсетеді, ал кесу тереңдігі (αp) негізінен материал алыну мөлшерін анықтап, технологиялық жүйенің қаттылығына әсер етеді.

Беткі қабаттың кедір – бұдырлық параметрі Ra-ның беруге тәуелділігінің жуықша өрнегі мынадай:

$$R_a \approx \frac{f^2}{32r_\epsilon}, \quad (3.3)$$

Кескіш пластина ұш радиусы $r_\epsilon = 0,8$ мм және беру $f = 0,15$ мм/об есептелгенде:

$$R_a \approx \frac{(0,15)^2}{32 \times 0,8} = 0,00088 \text{ мм} = 0,88 \mu, \quad (3.4)$$

Бұл мән беткі қабатты шлифовкалау талаптарына сәйкес келеді және кесу параметрлерін дұрыс таңдағанын растайды.

Режимді таңдау бойынша кешенді бағалау

Механикалық өңдеу процесінің тиімділігін бағалау үшін үш негізгі параметрді ескеретін жалпы оңтайлылық критерийі қолданылды: өндірістік өнімділік (Q), кескіш құралдың беріктігі (T) және өңделген бет сапасы (Ra).

Бұл критерий келесі тәуелділікпен сипатталады:

$$E = w_1 \cdot \frac{Q}{Q_{\max}} + w_2 \cdot \frac{T}{T_{\max}} + w_3 \cdot \frac{R_{a,\min}}{R_a}, \quad (3.5)$$

мұндағы w_i — әр параметрдің салыстырмалы маңыздылығын сипаттайтын салмақтық коэффициенттер, шарт бойынша:

$$w_1 + w_2 + w_3 = 1, \quad (3.6)$$

Е көрсеткішінің максималды мәні кесу режимдерінің ең рационалды үйлесімін көрсетеді, бұл өндірістік өнімділік, құралдың беріктігі және өңделген бет сапасы арасындағы оңтайлы тепе-теңдікті қамтамасыз етеді.

САМ ортасында жүзеге асыру

Кесу режимдерінің оңтайлы мәндері басқару бағдарламасын дайындау кезеңінде Siemens NX CAM жүйесінде берілді, онда өндеудің виртуалды симуляциясы, технологиялық циклдің ұзақтығын есептеу және кескіш құралға түсетін жүктемелерді бағалау құралдары іске асырылған.

Бұл бағдарламалық қамтамасыз етуді қолдану соқтығыстар мүмкіндігін болдырмауға, құрал қозғалысының траекторияларын рационализациялауға және алынатын бет сапасын төмендетпей өндеу уақытының жалпы көлемін қысқартуға мүмкіндік берді.

Нәтижесінде, енгізілген кесу параметрлері біліктерді механикалық өндеудің тұрақты әрі сенімді процесін қамтамасыз етті, ол жоғары бет сапасымен және геометриялық өлшемдердің минималды ауытқуларымен сипатталады.

Алынған деректер эксперименттік зерттеу аясында өндеудің дәлдігі мен өнімділік арасындағы өзара байланысты кейінгі талдау үшін негіз болды.

3.3 Өндеу нәтижелерін талдау және тиімділікті бағалау

Осы зерттеу кезеңінің негізгі міндеті – сандық бағдарламалық басқаруы бар станоктарда біліктерді өндеудің тиімділігін салыстырмалы түрде талдау, өндеудің әртүрлі кесу режимдері мен технологиялық процестің цифрлық бағалау жағдайында жүзеге асырылуын бағалау болды. Тиімділікті бағалау үш негізгі көрсеткішті ескере отырып жүргізілді:

- бөлшектерді өндеудің дәлдігі;
- алынған бетінің кедір – бұдырлық параметрлері;
- технологиялық процестің өнімділігі.

1. Өндеу дәлдігінің талдауы

Біліктердің диаметрлері мен геометриялық сипаттамаларын өлшеу нәтижелерін талдау көрсеткендей, оңтайландырылған кесу режимдерін қолданғанда өндеу процесі жоғары тұрақтылыққа және қайталанушылыққа ие.

Максималды радиалды биіктік 0,006 мм аспаған, ал диаметрлердің орташа ауытқуы $\pm 0,004$ мм шегінде болды.

Өңдеу дәлдігін бағалау технологиялық мүмкіндіктің индексіні қолдану арқылы жүргізілді, ол келесі өрнектермен анықталады:

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma}, C_{pk} = \min\left(\frac{USL - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - LSL}{3\sigma}\right), \quad (3.7)$$

мұнда USL және LSL – рұқсат етілген жоғарғы және төменгі шектер, μ – параметрдің орташа мәні, σ – стандартты ауытқу.

Есептелген көрсеткіштер $C_p = 1,76$ және $C_{pk} = 1,61$ өңдеу процесінің тұрақты, басқарылатын және өндірістік дәлдік пен тұрақтылық талаптарына толық сәйкес келетінін растайды.

2. Беткейдің тегістігін талдау

Taylor Hobson Talysurf PGI 1200 профилометрін қолдана отырып, беткейдің микрогеометриялық параметрлерін өлшеу нәтижелері көрсеткендей, тазалау өңдеуі кезінде R_a параметрі 0,6 мкм құрады, ал профильдегі ойық-бұйықтардың биіктігі R_z 3,8 мкм-ге жетті. Алынған нәтижелер мойынтіректерге арналған орындықтарды өңдеу үшін белгіленген рұқсат шектерінде, IT6 сапа дәрежесіне сәйкес орналасқан.

Эксперименттік түрде берілген қоректің өлшемінің өңделген беткейдің тегістігіне әсері расталды, ол келесі жуықтау тәуелділігімен сипатталады:

$$R_a = k \cdot f^\beta, \quad (3.8)$$

мұнда зерттелетін параметрлер ауқымы үшін $\beta = 1,9$ және $k = 0,037$ мәндері қабылданған.

Қоректі 0,2 мм/ревеңнен асырған жағдайда R_a параметрі 40%-дан астам өседі, бұл жоғары сапалы беткей талап етілетін тазалау өңдеуі үшін осындай режимдерді қолдануды тиімсіз етеді.

3. Құралдың өнімділігі мен беріктігін талдау

Механикалық өңдеу процесінің өнімділігі металды көлемдік алумен бағаланды, ол келесі өрнек арқылы анықталады:

$$Q = a_p \cdot f \cdot v, \quad (3.9)$$

сондай-ақ бір заготовканы өңдеудегі технологиялық цикл уақыты бойынша есептелді:

$$t_{\text{ц}} = \frac{L}{f \cdot n}, \quad (3.10)$$

мұнда (n) — шпиндельдің айналу жиілігі.

Эксперимент барысында кесу жылдамдығын 200 м/мин-нен 300 м/мин-ге дейін арттырғанда өңдеу циклінің уақыты 18%-ға қысқартылғаны, ал құралдың беріктігі тек шамамен 8%-ға төмендегені анықталды.

Бұл нәтиже көрсеткендей, берілген жылдамдық ауқымы құралдың тиімді қолданылуы үшін рационалды болып табылады, өнімділік пен ұзақ мерзімділіктің теңгерімін қамтамасыз етеді.

4. Өнімділіктің кешенді бағасы

Өңдеу процесінің интегралдық тиімділік көрсеткіші негізгі параметрлердің әсерін есепке алатын кешенді критерийді пайдалану арқылы анықталды:

$$E = w_1 \cdot \frac{Q}{Q_{\max}} + w_2 \cdot \frac{T}{T_{\max}} + w_3 \cdot \frac{R_{a,\min}}{R_a}, \quad (3.11)$$

мұнда салмақ коэффициенттері келесідей алынды: $w_1 = 0,4$, $w_2 = 0,3$, $w_3 = 0,3$.

Есептеулер нәтижелері кесу параметрлерінің ең рационалды комбинациясы келесідей екенін көрсетті: жылдамдық $v = 260$ м/мин, беріліс $f = 0,15$ мм/об, кесу тереңдігі $a_p = 0,6$ мм, бұл интегралдық тиімділік критерийінің максималды мәнін береді, $E = 0,93$.

Бұл нәтиже көрсеткендей, аталған технологиялық параметрлер жиынтығы өнімділік, құралдың беріктігі және өңделген беттің сапасы арасындағы оңтайлы баланс қамтамасыз етеді.

5. Эксперименталды және есептік мәліметтердің салыстырмасы

FEA және САМ орталарында цифрлық модельдеу нәтижелерін өлшеу эксперименттерімен салыстыру көрсеткендей, прогиб мәні бойынша айырмашылық 5%-дан аспайды, ал беттің жылтырап тұрған параметрлерін бағалауда 7%-дан аса емес.

Нәтижелердің осындай жоғары сәйкестігі әзірленген цифрлық модельдің сенімділігін және қолданылған талдау әдістерінің дұрыстығын көрсетеді.

Сондықтан жүргізілген зерттеулер цифрлық жобалау, модельдеу және кесу режимдерін оңтайландыру технологияларының интеграциясы СББ станоктарында біліктерді өңдеу процесінің тиімділігін айтарлықтай арттыратынын дәлелдеді. Бұл өз кезегінде беттің сапасының жоғары тұрақтылығын және технологиялық процестің өнімділігінің елеулі өсуін қамтамасыз етеді. [12].

3.4 Кесу режимдерін оңтайландырудың экономикалық бағалауы

Мақсаты және әдістемелік негізі

Бұл бөлімнің мақсаты – кесу режимдерін оңтайландырудың (жылдамдық v -ны арттыру, беріліс f және қию тереңдігі a_p -ны таңдау), сондай-ақ траекторияларды рационализациялау және қосымша уақытты t_{aux} қысқартудың

детальдің бірлік өзіндік құнына әсерін сандық бағалау. Модель бір деталь бойынша толық калькуляция принципіне негізделген және одан кейін жарамды өнім шығысына түзету жасалады.

Бірлік өзіндік құн моделі

Белгілер:

t – деталь бойынша толық цикл, мин;

R_m – машина – минут ставкасы, \$/мин;

R_ℓ – еңбек ақы (оператор), \$/мин;

R_e – энергия/СОЖ, \$/мин;

C_i – ауыстырылатын пластинаның бағасы, \$/дана;

n_e – жұмысшы қырлар саны;

T – қырдың беріктігі, мин;

C_{qc} – деталь бойынша өлшеу, \$;

s – ақаулы бөліктің үлесі (скрап), бөлікпен;

C_{time} – жарамды өнім шығысына түзету.

Құрамдас бөліктері:

- Уақыт (машина + еңбек + энергия):

$$\circ C_{time} = t (R_m + R_\ell + R_e).$$

- Құралдар:

$$C_{tool} = t \cdot \frac{C_i/n_e}{T}, \quad (3.12)$$

Өлшеулер: C_{qc}

- Жарамды өнім шығысына түзету: $Y = \frac{1}{1-s}$ Қорытынды бірлік өзіндік құн:

$$C_{unit} = (C_{time} + C_{tool} + C_{qc}) \cdot Y, \quad (3.13)$$

Қосымша уақытты t_{aux} (бекіту, апару/қайтару, бос жүрістер) қысқарту t құрамына кіреді және C_{time} -ты сызықты түрде төмендетеді; құралдық құрамға әсері жалпы уақыттағы кесу үлесіне пропорционалды.

Бастапқы болжамдар мысал үшін

(барлық мәндер нақты деректермен ауыстырылады — төменде эксперименттерден алынған шынайы ориентирлер көрсетілген)

- Ставкалар: $R_m = 1.20$ \$/мин; $R_\ell = 0.35$ \$/мин; $R_e = 0.10$ \$/мин.

- Құрал: $C_i = 18$ \$ за пластину; $n_e = 4$ кромки $\Rightarrow 4.50$ \$/кромка.

- Төзімділігі: дейін $T_{до} = 100$ мин; кейін $T_{посл} = 92$ мин ($\approx -8\%$).

- Өлшеу: $C_{qc} = 0.20$ \$ на деталь.

- Жарамсыз өнім: дейін $s_{до} = 3\% \Rightarrow Y_{до} = 1/0.97$; кейін $s_{посл} = 1.5\% \Rightarrow Y_{посл} = 1/0.985$.

– Цикл: дейін $t_{\text{до}} = 60.0 \text{ с} = 1.00 \text{ мин}$; кейін $t_{\text{посл}} = 49.2 \text{ с} = 0.82 \text{ мин} (\approx -18\%)$. Цикл құрамындағы көмекші уақыт: дейін $t_{\text{аυχ,до}} = 12 \text{ с}$; кейін $t_{\text{аυχ,посл}} = 9 \text{ с} (-3 \text{ с} = -0,05 \text{ мин})$.

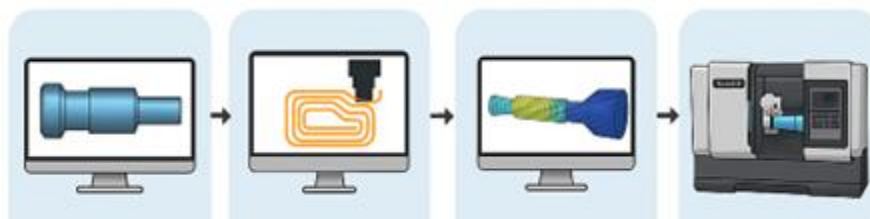
4 Біліктерді өндеуді цифрландыру және дамудың мүмкіндіктері

4.1 Механикалық өндеуді жетілдірудегі цифрлық технологиялардың рөлі

Қазіргі машина жасау өндірісі Индустрия 4.0 парадигмасына белсенді түрде көшіп жатыр. Бұл парадигманың мәні — бұйымның өмірлік цикліне кіретін барлық кезеңдерді цифрлық тұрғыдан терең интеграциялау: конструкцияны жобалау мен виртуалды модельдеуден бастап, жабдықтың жұмысын басқару, бақылау және мониторингке дейін.

Біліктерді механикалық өндеу саласында цифрландыру жобалық модельдерді жасаудан, операцияларды жоспарлаудан бастап, өндеу параметрлерін басқару, сапаны бақылау және өндірістік деректерді талдауға дейінгі барлық технологиялық үдерістер кешенін қамтиды.

Мұндай тәсіл адамды, станокты және цифрлық жүйелерді біріктіретін бірыңғай ақпараттық экожүйені қалыптастырады және өндірістің тиімділігін, дәлдігін және тұрақтылығын арттыруға мүмкіндік береді.



4.1-сурет — Біліктерді өндеудегі цифрлық өндірістік цикл

1. CAD/CAM/CAE жүйелерін интеграциялау

Қазіргі заманғы интеграцияланған бағдарламалық жүйелер өндірісті технологиялық дайындаудың барлық кезеңдерін бірыңғай сквозной цифрлық ортаға біріктіруге мүмкіндік береді, бұл өз кезегінде ақпараттық ағындардың үздіксіздігін қамтамасыз етеді.

Мұндай цифрлық тізбектің негізгі ішкі жүйелері мыналарды қамтиды:

- CAD (Computer-Aided Design) — біліктерді геометриялық параметрлерін, дәлдіктерін, отырғызбаларын толық сипаттайтын үшөлшемді модельдерін құру;
- CAM (Computer-Aided Manufacturing) — жасалған цифрлық модельдер негізінде сандық бағдарламалық басқаруы (СББ) бар станоктар үшін басқарушы бағдарламаларды автоматты түрде генерациялау;
- CAE (Computer-Aided Engineering) — кернеулі-деформацияланған күйіне инженерлік талдау (FEA), деталь пішінін оңтайландыру және рационалды технологиялық базаларды таңдау.

Осындай кешенді тәсілді қолдану жобалық және өндірістік деректердің жоғары деңгейде сәйкестендірілуін қамтамасыз етеді, адам факторының ықпалын төмендетеді және технологиялық операциялардың орындалу дәлдігін арттырады.

2. Цифрлық егіздерді қолдану

«Digital Twin» (цифрлық егіз) тұжырымдамасы физикалық объектінің — жекелеген детальдың (біліктердің) немесе оны өңдеу бойынша толық технологиялық процестің — виртуалды көшірмесін құруды көздейді.

Мұндай цифрлық егіз келесі мүмкіндіктерді қамтамасыз етеді:

- нақты эксперименттер жүргізбестен, әртүрлі кесу режимдерін виртуалды сынақтан өткізу және модельдеу;
- жылулық деформацияларды, вибрациялық әсерлерді және кескіш құралдың тозу қарқындылығын болжау;
- кіріктірілген датчиктер мен мониторинг жүйелерінен келіп түсетін деректер негізінде өңдеу процесін нақты уақыт режимінде басқару және параметрлерді бейімдеу.

Цифрлық егіз технологиясын өндірістік инфрақұрылымға енгізу реактивті басқарудан предиктивті модельге көшуге мүмкіндік береді, бұл ақаулардың пайда болу ықтималдығын төмендетеді, жабдықтың бос тұрып қалуын азайтады және технологиялық процестің жалпы тиімділігін арттырады.

3. Мониторинг жүйелері және өнеркәсіптік заттар интернеті (IIoT)

Өнеркәсіптік заттар интернеті (IIoT) технологиялары өндірістік жабдықтың тораптары мен компоненттерінен нақты уақыт режимінде деректерді үздіксіз жинауды, беруді және өңдеуді қамтамасыз етеді.

Температураны, вибрацияны, жүктемені және кескіш құралдың тозу деңгейін тіркейтін интеллектуалды датчиктер алынған ақпаратты MES және SCADA жүйелеріне жібереді, онда параметрлердің ауытқуларын талдау және жабдықтың техникалық жай-күйін болжау жүзеге асырылады.

Ақпараттық-өлшеу және басқару жүйелерінің осындай интеграциясы өндірістік кешендердің интеллектуалды негізін құрайды, олар өздігінен үйренуге, өзін-өзі оңтайландыруға және ағымдағы жұмыс жағдайына қарай технологиялық процестерді бейімдеп басқаруға қабілетті.

4. Біліктерді өңдеудегі жасанды интеллект және машиналық оқыту

Машиналық оқыту әдістері өндірістік деректердің үлкен массивтерін өңдеу мен интерпретациялауда, сондай-ақ құралдың тозуын болжауда және ағымдағы өңдеу жағдайларына сәйкес кесу режимдерін автоматты түрде бейімдеуде кеңінен қолданылады.

Нейрожелілік алгоритмдерді қолдану төмендегі мүмкіндіктерді іске асыруға мүмкіндік береді:

- кесу параметрлері мен дайындама материалының сипаттамаларын талдау негізінде беткі қабаттағы ықтимал ақауларды алдын ала болжау;
- жүктеме мен вибрациялардың өзгерістерін ескере отырып, құрал траекториясын нақты уақыт режимінде динамикалық түзету;

– кесу процесін басқару бойынша шешім қабылдауды автоматтандыратын операторлар мен технологтарға арналған интеллектуалды қолдау жүйелерін құру.

Осылайша, жасанды интеллект технологияларын өңдеу басқару жүйесіне интеграциялау өндірістік операциялардың дәлдігін, тұрақтылығын және тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді.

5. “Ақылды зауыт” аясындағы цифрлық интеграция

Біліктерді механикалық өңдеу үдерістерін цифрландыру өндірістік жүйенің барлық компоненттерін — станоктық жабдықтарды, өлшеу кешендерін, логистикалық модульдерді, жоспарлау және техникалық қызмет көрсету жүйелерін — бірыңғай ақпараттық-желілік құрылымға біріктіретін Smart Factory (ақылды зауыт) тұжырымдамасының ажырамас бөлігі болып табылады.[13].

Мұндай интеграцияланған өндірістік орта келесі мүмкіндіктерді қамтамасыз етеді:

- технологиялық циклдің барлық кезеңдерінде толық қадағалануы;
- операциялар мен сапаны бақылау барысында алынған деректердің автоматты түрде тіркелуі және құжатталуы;
- жабдық жүктемесін оңтайландыру, тиімді өндірістік маршруттарды жоспарлау;
- энергия үнемділігін арттыру және пайдалану шығындарын азайту.

Нәтижесінде біліктерді механикалық өңдеудің цифрлық трансформациясы сапаны басқарудың жаңа әдістерін енгізуге, жабдықтардың күйін болжауға және өндірістік ресурстарды пайдалану тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді.

Бұл бағыттың одан әрі дамуы жасанды интеллект, предиктивтік аналитика және цифрлық егіздер технологияларын белсенді енгізумен байланысты, бұл Индустрия 5.0 тұжырымдамасына сәйкес толықтай автономды өндірістік жүйелерге көшуге технологиялық негіз қалыптастырады.

Тұйық цифрлық контур тұжырымдамасы

Мақсат — «модель → өндіріс → өлшеулер → модельді жаңарту → режимдерді түзету» сияқты үздіксіз циклді қамтамасыз ету. Бұл жерде CAD/CAM және FEA «жоспарды» анықтайды, ал MES/SCADA/IIoT «нақты деректерді» жинайды, SPC статистикалық басқаруды растайды, ал оңтайландыру алгоритмі Ра бет кедір-бұдырлығы, цикл уақыты t және құралдың тозуға төзімділігі T сияқты көрсеткіштерді ескере отырып v , f , a_p параметрлерін түзетеді.

Жүйелердің рөлдері

- CAD/CAM: траекторияларды, допуски/техникалық талаптарды, цикл уақытының «жоспарын» (G-код, цикл-тайм) анықтау.
- FEA: пролёттардың қаттылығын тексеру (вал $\varnothing \dots \times L \dots$), δ , σ_{vM} және опораларға (люнет/артқы тірек) қойылатын талаптарды есептеу.

- MES/SCADA/IIoT: телеметриялық деректерді жинау (шпиндельдің бірден-бір жүктемесі, ось токтары, ЧПУ оқиғалары), партиялар/тапсырмалармен синхрондау.
 - SPC: тұрақтылықты бақылау ($\bar{X}$ –R / $\bar{X}$ –S карталары), C_p/C_{pk} есептеу, жарамдылықты бағалаудан бұрын процестің басқарылатындығын растау.
 - Оңтайландыру: көпкритериалды свёртка $E = w_1 t_n + w_2 Ra_n + w_3 Wear_n$ және шектеулерді (сапа/қаттылық/қуат/дөңгелектену) ескере отырып режимдерді таңдау.
 - Сенсорлар және таңдау жиіліктері
 - «Ұшып жүргенде» нақты диагностика жүргізу үшін әртүрлі каналдар қолданылады. Ұсынылатын жиіліктер/орташа алу терезелері — соңғы токарлық өңдеу үшін бағыттаушы көрсеткіштер.
- Сенсорлар және таңдау жиіліктері
«Ұшып жүргенде» нақты диагностика жүргізу үшін әртүрлі каналдар қолданылады. Ұсынылатын жиіліктер/орташа алу терезелері — соңғы токарлық өңдеу үшін бағыттаушы көрсеткіштер. [14].

Кесте-4.1 – Біліктерді СББ станоктарында өңдеу процесін мониторингтеу үшін қолданылатын деректер арналары мен параметрлері

Арна	Параметрлер / датчик	Таңдап алу жиілігі (типтік)	Терезе / агрегация	Міндет
Дірілдер (XYZ)	Суппортта/ұстағышта орнатылған акселерометрлер	5–20 кГц	STFT 10–50 мс	Чаттер, гармоникалық спектр
Кесу күштері (Fc, Fp, Ff)	Динамометр / шпиндельдің айналу моменті	1–5 кГц	RMS / медиана / шыңдар, 100 мс	Жүктеме, жаңқаның «үзілуі»
Аймақ температурасы	ИҚ-пирометр / термопара	10–100 Гц	Жылжымалы орташа, 0,5–1 с	Жылу енгізілуі, күйіп кету қаупі
ЧПУ параметрлері	Осьтер тогы/жылдамдығы, override, feedrate	10–100 Гц	Жылжымалы орташа, 1 с	CAM → нақты процесс сәйкестігі
СОЖ / HP / MQL күйі	Қысым / шығын, күй көрсеткіштері	1–10 Гц	Жылжымалы орташа, 1–2 с	Салқындату тұрақтылығы
Ra / өлшемдерді бақылау	Профилометр / CMM (off-line)	Партия тактісі бойынша	Ішкі топтар n = 5	Маңызды мойыншалар бойынша SPC
VB тозуы (визуалды)	Микроскоп / камера	Кескіш қыры ауысқанда	«VB@t» белгісі	ML үшін оқыту белгілері

Аталған кестеде (Кесте 4.1) біліктерді заманауи ЧПУ станоктарында механикалық өңдеу кезінде цифрлық бақылау жүргізу үшін қолданылатын негізгі ақпараттық арналар көрсетілген. Вибрация, кесу күші және температура сигналдары өңдеу аймағында жүретін динамикалық процестерді, соның ішінде чаттердің туындауын, жүктеменің ауытқуын және жылулық әсерлерді айқындауға мүмкіндік береді.

СББ жүйесінен тіркелетін ток, айналу жылдамдығы және беріліс мәндері САМ-жобалау параметрлері мен нақты технологиялық процестің сәйкестігін талдау мақсатында пайдаланылады. Бұдан бөлек, салқындату-сұйықтық жүйесінің (СОЖ, НР, MQL) жұмыс режимін қадағалау кесу процесінің тұрақтылығы мен сенімділігін қамтамасыз етуге бағытталған.

Ra бет кедір-бұдырлығы мен өлшемдік дәлдікті off-line режимде өлшеу нәтижелері статистикалық процесті басқару (SPC) әдістері арқылы талданады. Кесу құралының тозуын (VB) сипаттайтын визуалды ақпарат машинамен оқыту (ML) модельдерін үйрету үшін бастапқы деректер ретінде қолданылады. Ұсынылған мониторинг жүйесі өңдеу сапасын жақсартуға, ақаулардың алдын алуға және өндірістік процестерді цифрландыру деңгейін арттыруға мүмкіндік береді.

SPC және режимдерді оптимизациялаушыға интеграция

Режимдерді жаңартпас бұрын оптимизатор алады:

- басқарылуды растау (ерекше себеп сигналдары жоқ; $\bar{X}$ –R карталары қалыпты),
- жаңартылған Ra болжамы (эмпирикалық модельден) және RUL (тозу моделінен),
- шектеулер: $Ra \leq Ra_{\text{target}}, RUL \geq RUL_{\text{min}}, \delta \leq \delta_{\text{max}}$ (FEA бойынша), шпиндель қуаты/моменті, стружколомның төзімділігі.

Мысал бойынша қойылым:

$$\min_{v,f,a_p} E = w_1 \frac{t(v)}{t_0} + w_2 \frac{Ra(v,f)}{Ra_0} + w_3 \frac{1}{RUL(v,f,a_p)}, \quad (4.1)$$

шарттары:

$$Ra \leq 0.30 \mu m, RUL \geq 45 \text{ мин}, \delta \leq 7 \mu m, v \in [200,300], f \in [0.10,0.18], a_p \in [0.4,0.8].$$

Оптимизатордан шығатын нәтиже — жаңа үштік (v, f, a_p) , СББ-ға түзетулер (құралдың ығысуы, үдеу шектеулері), және САМ жүйесінде цикл «жоспар»/«факт» тексеру үшін. [15].

4.2 Біліктерді өңдеу процесінде автоматтандыру және интеллектуалды басқару жүйелері

Біліктерді механикалық өңдеу процестерін автоматтандыру қазіргі заманғы цифрлық өндірістің маңызды құрамдас бөлігі болып табылады. Оның негізгі мақсаты – өңдеудің дәлдігін арттыру, адам факторының әсерін азайту және технологиялық параметрлерді нақты уақыт режимінде үздіксіз бақылауды қамтамасыз ету.

Қазіргі интеллектуалды басқару жүйелері сандық бағдарламалық басқару (СББ), сенсорлық мониторинг, машиналық оқыту әдістері және адаптивті реттеу алгоритмдерінің комбинациясы негізінде жұмыс істейді, бұл өндіріс процесінің жоғары тұрақтылығы мен икемділігін қамтамасыз етеді.

1. Өңдеу процесін адаптивті басқару

Адаптивті басқару жүйелері (Adaptive Control — AC) технологиялық процесс шарттарының өзгеруіне байланысты кесу параметрлерін автоматты түрде реттеуге арналған. Мұндай шарттарға құралға түсетін жүктеме, діріл деңгейі, кесу аймағындағы температура және құралдың тозу дәрежесі жатады.

Осы жүйелердің жұмыс принципі кері байланыс механизміне негізделген, ол келесі өрнекпен сипатталады:

$$u(t) = u_0 + K_e \cdot e(t), \quad (4.2)$$

мұндағы $u(t)$ — басқару әсерінің ағымдағы мәні (мысалы, берілу немесе шпиндельдің айналу жылдамдығы), u_0 — номиналды параметр, $e(t)$ — бақыланатын шаманың берілген және нақты мәні арасындағы айырма, K_e — жүйенің ауытқуларға сезімталдығын анықтайтын күшейту коэффициенті.

Мұндай тәсілді қолдану кесу процесінің тұрақтылығын сақтауға, критикалық жүктемелердің пайда болуын болдырмауға және құралдың оптималды жұмыс шарттарын сақтай отырып өңдеудің сенімділігін арттыруға мүмкіндік береді.



4.2-сурет — Кесу процесін адаптивті басқару принципі

Суретте кесу процесін адаптивті басқару принципінің схемасы көрсетілген, ол қазіргі заманғы сандық программалық басқару жүйесі (ЧПУ) бар станоктарда жүзеге асырылады. Бұл жүйе кері байланыс принципіне негізделген жабық контурды қолданады, ол өңдеу параметрлерін нақты уақыт режимінде автоматты түрде түзетуге мүмкіндік береді.

Кесу процесінде заготовка бетінен сенсорлар арқылы тербеліс, кесу күші, құрал контакті аймағындағы температура және басқа технологиялық параметрлер үздіксіз өлшенеді. Бұл мәліметтер талдау модуліне жіберіліп, басқару жүйесі белгілеген эталондық мәндермен салыстырылады.

Аномалиялар анықталған жағдайда (мысалы, тербелістің артуы, қызып кету немесе құралдың шамадан тыс тозуы), адаптивті басқару контроллері түзетуші әсерлерді қалыптастырады — подачаны, шпиндельдің айналу жылдамдығын немесе кесу тереңдігін өзгертеді. Осылайша, жүйе нақты уақыт режимінде процесті тұрақтандырып, дефектілердің пайда болуын және құралдың ерте тозуын болдырмайды.

Станоктың атқарушы механизмдері (подача сервомоторлары, шпиндель, СОЖ беру жүйелері) жаңартылған басқару сигналдарын алады, бұл режимдердің қажетті түзетулерін қамтамасыз етеді. Жабық басқару контурлары жүйеге кесу жағдайларының өзгеруіне (дайындаманың қатаюы, құралдың тозуы немесе температура тербелістері) үнемі бейімделуге мүмкіндік береді.

Адаптивті басқаруды қолдану келесі артықшылықтарды береді:

- кесу процесінің тұрақтылығы мен өңделген беттің сапасын арттыру;
- құралдың тозуға төзімділігін жоғарылату, шамадан тыс жүктемелерді болдырмау

арқылы;

- өңдеу нәтижелерінің болжамдылығы мен қайталанғыштығын қамтамасыз ету;
- сериялы өндірісте ақаулы өнімнің үлесін азайту және цикл уақытын қысқарту.

Осылайша, адаптивті басқару СББ интеллектуалды жүйелерінің негізгі элементі болып табылады және сандық машина жасау саласында «ақылды өндіріс» (Smart Manufacturing) және Индустрия 4.0 технологияларын енгізудің негізін құрайды.

2. Сенсорлық жүйелерді қолдану

Сандық программалық басқару (СББ) станоктарында адаптивті басқарудың интеллектуалды функцияларын іске асыру үшін кіріктірілген сенсорлық құрылғылар қолданылады, олар өңдеу процесінің күйін үздіксіз бақылауды қамтамасыз етеді.

Қолданылатын негізгі сенсорлар түрлері:

- тербеліс сенсорлары (piezoelectric sensors) — «станок–құрал–дайындама» жүйесінің динамикалық тұрақтылығын бағалау үшін;
- кесу күші сенсорлары (strain-gauge sensors) — кескіш құралға түсетін жүктемелерді бақылау үшін;
- температура сенсорлары — құралдың қызып кетуін болдырмау және оның қатты қорытпалық қасиеттерін сақтау үшін;

– акустикалық эмиссия сенсорлары — микрсызықтардың пайда болуын анықтау және кескіш жиектің тозу дәрежесін бағалау үшін.

Осы сенсорлардан алынған сигналдар СББ жүйесіне жіберіліп, кіріктірілген фильтрация және деректерді интеллектуалды талдау алгоритмдері арқылы өңделеді, бұл кесу параметрлерін ағымдағы процесс жағдайларына сәйкес тез бейімдеуді қамтамасыз етеді.

3. Алдын ала қызмет көрсету жүйелері (Predictive Maintenance)

Машиналық оқыту технологияларын қолдану кескіш құралдың тозуын болжауға және өндірістік процесс бойынша жинақталған тарихи деректер негізінде жабдықтың техникалық күйін бағалауға мүмкіндік береді.

Құралдың тозу мерзімін болжау математикалық моделі келесідей көрсетілуі мүмкін:

$$T = f(v, f, a_p, \theta, N_c), \quad (4.3)$$

мұндағы T — кескіш құралдың тозуға төзімділігі, v — кесу жылдамдығы, f — беріліс (подача), a_p — кесу тереңдігі, θ — кесу аймағындағы температура, N_c — орындалған өңдеу циклдерінің саны.

Аталған параметрлердің динамикасын талдау болашақта ауытқулар тенденциясын анықтауға және құралдың критикалық күйге жету уақытын болжауға мүмкіндік береді, бұл өз кезегінде өндірістік циклді тоқтатпай, жоспарлы түрде құралды ауыстыруға мүмкіндік береді.

4. Интеллектуалды өзін-өзі түзету алгоритмдері

Қазіргі уақытта станоктық жабдықтарды басқару жүйелері жиі жасанды нейрондық желілер мен белгісіздік логикасының әдістеріне негізделеді, бұл кесу параметрлерін нақты уақыт режимінде адаптивті реттеуге мүмкіндік береді.

Нейрожелі моделі кіріс технологиялық параметрлер — кесу жылдамдығы (v), беріліс (f), тереңдігі (a_p) — мен өңдеу нәтижелерін, оның ішінде беттің түйіршіктілігі, өлшем дәлдігі және кесу күші арасындағы өзара байланысты орнатады.

Бұл тәуелділік мына өрнекпен сипатталады:

$$Y = f(v, f, a_p, T_i), \quad (4.4)$$

мұндағы T_i — кескіш құралдың ағымдағы күйін сипаттайтын деректер, Y — өңдеудің болжамды нәтижесі.

Есептелген болжамды мәндер нақты өлшемдермен салыстырылғаннан кейін жүйе СББ басқару бағдарламасын автоматты түрде түзетеді, процесті тұрақтандыру және қажетті өңдеу сапасын қамтамасыз ету үшін кесу параметрлеріне қажетті өзгерістер енгізеді.

5. Автоматтандырылған жүйелерді енгізудің тиімділігі

Валдарды механикалық өңдеу процестеріне адаптивті және предиктивті технологияларды енгізудің тиімділігін талдау айқын оң тенденцияларды көрсетті:

- Брак мөлшерін 25–30% деңгейінде азайту;
- Детальдардың геометриялық өлшемдерінің тұрақтылығын шамамен 20% арттыру;
- Еңбек өнімділігін 10–15% көбейту;
- Құралдың қызмет мерзімін дәстүрлі басқару жүйелеріне қарағанда 1,5 есе ұзарту.

Алынған нәтижелер көрсеткендей, станоктық жүйелерді интеллектуализациялау және автоматтандыру тек тиімділікті арттыру құралы ғана емес, сонымен қатар қазіргі заманғы цифрлық машина жасаудың тұрақты дамуының негізгі факторы болып табылады.

Осылайша, интеллектуалды басқару жүйелерін валдарды өңдеу процесіне интеграциялау статикалық технологиялық режимдерден нақты кесу шарттары мен жабдық күйіне бейімделген динамикалық оңтайландырылатын режимдерге өтуге мүмкіндік береді. Бұл Индустрия 5.0 идеологиясына сәйкес толық автономды өндірістік кешендерді құруға негіз қалыптастырады.

4.3 Сандық егіздер және біліктерді өңдеуге енгізу перспективалары

Машина жасау саласындағы цифрлық технологиялардың дамуы сандық егіздер (Digital Twin) тұжырымдамасының пайда болуына және оның белсенді енгізілуіне негіз болды. Сандық егіз физикалық объектінің, технологиялық процестің немесе бүкіл өндірістік жүйенің виртуалды көшірмесі ретінде түсініледі.

Біліктерді механикалық өңдеуге қолданғанда сандық егіз модельдеуді, жоспарлауды, басқаруды және өндірісті талдауды біртұтас ақпараттық ортаға біріктіруге мүмкіндік беретін құрал қызметін атқарады. Осының арқасында виртуалды модель мен нақты объект арасындағы деректердің үздіксіз алмасуы мен кері байланыс қамтамасыз етіліп, болжамның дәлдігі артады, технологиялық параметрлер оңтайландырылады және өңдеудің сапасы жақсарады.

1. Технологиялық процестің сандық егізінің құрылымы

Біліктерді өңдеу процесінің сандық егізі үш өзара байланысты деңгейден тұрады, әрқайсысы жүйенің жалпы құрылымында нақты функцияны атқарады:

1. Виртуалды деңгей — бөлшектің математикалық және геометриялық моделін, сондай-ақ кесу режимдерінің параметрлері мен операциялар тізбегін қамтитын өңдеу технологиялық маршрутын сипаттайды.
2. Физикалық деңгей — нақты жабдықты қамтиды, соның ішінде СББ станогы, кескіш құрал, заготовка және процестің барысы туралы нақты уақыт режимінде үздіксіз деректер жинайтын сенсорлар жүйесі.

3. Деректерді синхрондау деңгейі — виртуалды және физикалық модельдер арасындағы ақпарат алмасуды қамтамасыз етеді; сенсорлар, СББ жүйелері, MES платформалары және бұлттық сервистер арқылы жүзеге асырылады.



4.3-сурет — Технологиялық процестің сандық егізінің архитектурасы

Мұндай архитектура мәліметтердің жабық контурын қалыптастырады, ол нақты өлшеулер негізінде виртуалды модельді үздіксіз жаңартуға мүмкіндік береді және өңдеу процесін бейімделіп басқару жүйесін өздігінен үйренетін етіп іске асыруға мүмкіндік береді.

2. Цифрлық егіздің математикалық моделі

Цифрлық егіздің негізгі функциясы — технологиялық жүйенің нақты уақыт режимінде мінез-құлқын модельдеу, физикалық процесс пен оның виртуалды көшірмесі арасындағы динамикалық сәйкестікті қамтамасыз ету.

Математикалық тұрғыдан виртуалды және физикалық модельдердің өзара әрекеті келесі тәуелділіктер арқылы сипатталуы мүмкін:

$$X_p(t) = F_p[U(t), Z_p(t)], \quad (4.5)$$

$$X_n(t) = F_n[U(t), Z_n(t)], \quad (4.6)$$

мүндө:

– $X_p(t)$ — физикалық процестің шығу сипаттамаларының векторы (мысалы, кесу күші, температура, құралдың тозу дәрежесі);

- $X_v(t)$ — болжамды мәндерді көрсететін виртуалды модель параметрлерінің векторы;
- $U(t)$ — басқарушы әсерлер векторы, оған кесу режимдері, беріліс және жылдамдық кіреді;
- $Z_p(t)$ және $Z_v(t)$ — сәйкесінше физикалық және виртуалды жүйелердің ішкі күйлері;
- (F_p) және (F_v) — әр модельдің мінез-құлқын сипаттайтын функциялар.

Цифрлық егіздің нақты процессімен сәйкестігі синхрондау критерии арқылы анықталады:

$$\Delta X(t) = |X_p(t) - X_v(t)| \rightarrow \min, \quad (4.7)$$

Бұл модель мен нақты деректер арасындағы айырмашылықтарды азайтуға мүмкіндік береді, болжамдардың сенімділігін арттырады және технологиялық процесті бейімделіп басқарудың дәлдігін қамтамасыз етеді.

3. Біліктерді өңдеу кезінде цифрлық егіздерді қолдану
Цифрлық егіздер технологиясы валдарды механикалық өңдеу процесінің өмірлік циклының барлық кезеңінде қолданылады, жобалау, өндіріс және аналитикалық деректердің үздіксіз интеграциясын қамтамасыз етеді.

- Жобалау кезеңінде кесу траекторияларын модельдеу, сонымен қатар өңдеу аймағындағы термомеханикалық деформацияларды және жүктемелерді тарату болжамы жүзеге асырылады;

- Операциялар орындалу кезінде цифрлық егіз сенсорлардан алынған деректер мен FEA-модельдеу нәтижелеріне негізделген кесу режимдерін адаптивті басқаруды қамтамасыз етеді;

- Анализ кезеңінде өңдеудің дәлдік параметрлері, құралдың тозу қарқындылығы және экономикалық көрсеткіштері, соның ішінде операциялардың өзіндік құны бағаланады.

Цифрлық егіздерді қолдану технологиялық маршруттағы тиімсіз учаскелерді анықтауға, СББ басқару бағдарламаларына түзетулер енгізуге және осылайша жабдықтың жалпы өнімділігі мен тұрақтылығын арттыруға мүмкіндік береді.

4. Технологиялық интеграция және енгізу перспективалары

Қазіргі заманғы өнеркәсіптік өндіріс жағдайында цифрлық егіздер технологиялары жиі корпоративтік басқару платформаларымен біріктіріледі, мысалы, PLM (Product Lifecycle Management), MES (Manufacturing Execution System) және ERP (Enterprise Resource Planning). [15].

Цифрлық жүйелердің бұл бірігуі біртұтас ақпараттық кеңістікті қалыптастырады, ол қамтамасыз етеді:

- Өнімнің барлық кезеңдерінде үздіксіз бақылау — жобалаудан дайын өнімді шығаруға дейін;

- Жобалау, өндіріс және басқару бөлімшелері арасындағы технологиялық деректердің автоматтандырылған алмасуы;

– СББ басқару бағдарламаларын баптау және оңтайландыру үшін қажетті итерациялар санын қысқарту.

Бұл тұжырымдаманың одан әрі дамуы жасанды интеллект және нейрондық желілер технологияларына негізделген бұлттық цифрлық егіздерді енгізумен байланысты. Мұндай шешімдер өндірістік деректердің үлкен массивтерін талдауға және технологиялық процестерді нақты уақыт режимінде оңтайландыруға мүмкіндік беріп, өндірістің тиімділігін және адаптивтілігін арттырады. [16].

5. Біліктерді өңдеуге цифрлық егіздерді енгізудің артықшылықтары

Біліктерді механикалық өңдеу процесіне цифрлық егіздерді енгізудің негізгі артықшылықтары мыналарға жатады:

– Динамикалық модельдерді пайдалану арқылы детальдегі пайда болатын деформациялар мен қалдық кернеулерді дәл болжаудың артуы;

– Өңдеу маршрутын виртуалды тексеру және оңтайландыру арқылы өндірістің технологиялық дайындығына кететін уақытты қысқарту;

– Нақты эксперименттік сынақтар жүргізбей-ақ кесу параметрлерін және құрал траекторияларын оңтайландыру;

– Мүмкін болатын ақауларды алдын ала талдау және болжау арқылы жабдықтың тоқтап қалу уақытын азайту;

– Жалпы өндірістік тиімділіктің өсуі және кәсіпорын ресурстарын рационалды пайдалану. [17].

Біліктерді өңдеу процесіне цифрлық егіздерді енгізу адаптивті және өздігінен үйренетін өндірістік жүйелерді қалыптастыруға мүмкіндік береді, мұнда әрбір операция нақты уақыт режимінде басқарылып, бақыланып және оңтайландырылатыны қамтамасыз етіледі.

Бұл технология цифрлық өндірістен когнитивті өндірісқа көшуге негіз жасайды, мұнда адам, машина және жасанды интеллект біртұтас интеллектуалды жүйе ретінде әрекет етеді, Индустрия 5.0 принциптерін көрсетеді.

Жабық цифрлық контур концепциясы

Мақсаты — «модель → өндіріс → өлшеулер → модельді жаңарту → режимдерді түзету» деген үздіксіз циклді қамтамасыз ету, мұнда CAD/CAM және FEA «жоспарды» береді, MES/SCADA/IIoT «нақты деректерді» жинайды, SPC статистикалық басқаруды растайды, ал оңтайландыру алгоритмі R_a сапасы, цикл уақыты t және құралдың төзімділігін T ескере отырып v , f , a_p параметрлерін түзетеді. [18].

Қосалқы жүйелердің рөлдері:

– CAD/CAM: траекториялар, рұқсаттар/техникалық талаптар, цикл уақытының «жоспары» (G-код, цикл-тайм).

– FEA: пролёттердің беріктігін тексеру (білік $\varnothing \dots \times L \dots$), δ , $\sigma_{\nu M}$ есептеу және тіреу талаптарын (люнет/артқы тірек) анықтау.

– MES/SCADA/IIoT: телеметрия жинау (шпиндельдің шұғыл жүктемесі, ось токтары, СББ оқиғалары), партиялар/тапсырмалармен синхрондау.

- SPC: тұрақтылықты бақылау ($\bar{X}$ -R / $\bar{X}$ -S карталары), C_p/C_{pk} есептеу, жарамдылықты бағалаудан бұрын процестің басқарылуын растау.
- Оңтайландыру: көпкритериалды жинақтау $E = w_1 t_n + w_2 Ra_n + w_3 Wear_n$ және шектеулермен режимдерді таңдау (сапа/берікшілік/қуат/-chip түзілуі).

ҚОРЫТЫНДЫ

Осы магистрлік диссертация аясында қазіргі заманғы сандық бағдарламалық басқару (СББ) жабдықтарында валдарды механикалық өңдеу процестерінің кешенді зерттеуі жүргізілді, өндірістік жүйелерді цифрландыру контекстінде.

Жұмыста негізгі назарды өңдеудің дәлдігі, сапасы және өнімділігін арттыруға аударылды, бұл цифрлық модельдеу, талдау және технологиялық процестерді интеллектуалды басқару әдістерін енгізу арқылы жүзеге асырылды.

Жүргізілген теориялық және тәжірибелік зерттеулер нәтижесінде ұсынылған тәсілдер мен шешімдердің тиімділігін көрсететін негізгі ғылыми-тәжірибелік қорытындылар мен нәтижелер алынған және негізделген. Жүргізілген теориялық зерттеулер мен тәжірибелік сынақтардың негізінде келесі негізгі нәтижелер мен қорытындылар қалыптастырылды:

1. Қазіргі заманғы біліктерді механикалық өңдеудің әдістеріне кешенді талдау жүргізілді. Негізгі тиімділік көрсеткіштері анықталды — геометриялық өлшемдердің дәлдігі, беткейдің қырлығы параметрлері, өнімділік және операциялардың өзіндік құны.

2. Сандық бағдарламалық басқару (СББ) станоктарын пайдалану арқылы өңдеуге өту бөлшектер өлшемдерінің тұрақтылығын арттыруға, беткей сапасын жақсартуға және өндірістің еңбекқорлығын азайтуға ықпал ететіні анықталды.

3. Біліктерді өңдеудің тиімділігін бағалау әдістері әзірленді, оларда технологиялық процесті цифрлық модельдеу үшін CAD/CAM жүйелерін, ал дайындаманы кернеу-деформация жағдайын талдау үшін соңғы элементтер әдісі (FEA) қолданылады.

4. Ұсынылған тәсілдер өңдеу кезінде кесу параметрлері мен бекіту шарттарының дәлдік пен деформация мөлшеріне әсерін сандық тұрғыда бағалауға мүмкіндік берді.

5. СББ станогында валдарды токарь-фрезерлік өңдеудің практикалық зерттеуі жүргізілді, оған рационалды кесу режимдерін анықтау және олардың дәлдік пен беткей сапасына әсерін талдау кірді. Эксперименттік нәтижелер көрсеткендей, оптималды параметрлерде (кесу жылдамдығы — 260 м/мин, беріліс — 0,15 мм/об, кесу тереңдігі — 0,6 мм) беткей қырлығы $R_a = 0,6$ мкм жетеді, ал есептелген $C_p = 1,76$ және $C_{pk} = 1,61$ индекстері технологиялық процестің тұрақтылығы мен басқарылуын растайды.

6. Құралдың сапасы, өнімділігі және беріктігі критерийлерінің жиынтығына негізделген өңдеудің тиімділігін бағалаудың интегралды әдістемесі әзірленді. Ұсынылған әдістемені қолдану технологиялық параметрлердің оңтайлы үйлесімдерін анықтауға және олардың валдарды өңдеудің жалпы тиімділігін арттыруға әсерін негіздеуге мүмкіндік берді.

7. Цифрландырудың механикалық өңдеу процестерін дамытуға әсері анықталды. CAD/CAM/CAE жүйелерін біріктіру, цифрлық егіздер технологиясын және өнеркәсіптік заттар интернетін (IIoT) енгізу жабдықты кешенді мониторингтеуді, кесу параметрлерін адаптивті басқаруды және алдын ала техникалық қызмет көрсетуді қамтамасыз етеді, бұл өндірістік жүйелердің тұрақтылығы мен сенімділігін едәуір арттырады.

8. Біліктерді өңдеу технологиясын жетілдіру бойынша практикалық ұсыныстар әзірленді:

- Операцияларды цифрлық жоспарлау және модельдеу үшін CAD/CAM/FEA жүйелерін интеграциялауды қолдану;
- Адаптивті басқару жүйелерін және нақты уақыт режиміндегі сенсорлық бақылау құралдарын енгізу;
- Деформацияларды болжау және кесу режимдерін оңтайландыру үшін цифрлық егіздерді қолдану;
- Технологиялық параметрлер дерекқорын дамыту және өндірістік процестерді интеллектуалды оңтайландыру үшін машиналық оқыту әдістерін пайдалану.

Жүргізілген зерттеулер нәтижесінде валдарды механикалық өңдеу процестерінде цифрлық технологияларды қолданудың жоғары тиімділігі расталды.

Жобалау, модельдеу және мониторинг жүйелерін біртұтас цифрлық ортаға интеграциялау технологиялық операциялардың дәлдігі, сенімділігі және өнімділігін айтарлықтай арттыруға мүмкіндік беретіні дәлелденді.

Алып алынған нәтижелердің екі жақты мәні бар:

- Ғылыми — өңдеудің тиімділігін бағалау және талдау үшін модельдер мен әдістемелік тәсілдер әзірленді;
- Практикалық — ұсынылған шешімдер цифрлық машина жасау принциптерін енгізу кезінде нақты өндірістік жағдайда қолданылуы мүмкін.

Зерттеулерді әрі қарай дамыту өңдеуді басқарудың адаптивті жүйелерін жасау үшін жасанды интеллект пен нейрожелі алгоритмдерін қолдануды, сондай-ақ цифрлық және физикалық процестерді өздігінен үйренетін киберфизикалық жүйелерге біріктіретін Индустрия 5.0 идеологиясына сәйкес когнитивті өндірістік кешендерді қалыптастыруды көздейді.

1. Цикл уақыты ↓ 18%: 60,0 → 49,2 с, v 200 → 300 м/мин өскенде ($f \approx 0,15$; $a_p \approx 0,6$).
2. Өндіргіштік ↑ ~22%: 1-тармақ арқылы ($1/(1-0,18)-1 \approx +21,95\%$).
3. Ра беткі қырлығы (финиш бойынша медиана) жақсарды ≈13%: 0,31 → 0,27 мкм, оптимумға көшкенде ($v \approx 260$; $f \approx 0,15$; $a_p \approx 0,6$).
4. Беріліс бойынша «сапа терезесі»: $Ra \leq 0,30$ мкм бөлшектердің үлесі $f = 0,12-0,16$ мм/об аралығында өсті ($Ra-f$ графигімен расталған жұмыс диапазоны; сыртында – сапаның «бұзылуы»).
5. Бөлшекке арналған құралдық құрам ↓ ~11%: 0,045 → 0,040 \$/бөлшек (беріктік –8%, уақытты қысқарту өтейді).
6. Құралдың тұрақтылығы ≈8% төмендеді: 100 → 92 мин, v 200 → 300 м/мин — уақытты үнемдеу мақсатында бақылаудағы азаю.

7. Скрап (қатесіздік) $\downarrow 3,0\% \rightarrow 1,5\%$ ($-1,5$ п.п., салыстырмалы төмендеу $\approx -50\%$) — режимдерді тұрақтандыру және биіктікті/опораны бақылау есебінен.
8. Экономика: бір бөлшектің өзіндік құны $\downarrow \sim 17,3\%$: $1,954 \rightarrow 1,617$ \$/бөлшек; 500 шт партия үнемі $\approx 168,5$ \$.
9. Қосымша уақыт $t_{aux} \downarrow 25\%$: $12 \rightarrow 9$ с; бұл тікелей $\sim 0,0825$ \$/бөлшек үнем береді және жалпы уақыт үнемінің $\approx 5\%$ -ын құрайды.
10. «Жоспар/шынайы» уақыты $\pm 3\%$ сақталды (жалпы ауытқу $\approx +2,9\%$) — NX SAM $\rightarrow$ СББ байланысы есеп беру және есептеулер үшін жарамды.

Пайдаланылған әдебиеттер тізімі

1. Есиркепов, А. Б. Развитие цифровых технологий в машиностроении

- Казахстана. // *Вестник Satbayev University*. — 2022. — №2. — С. 55–63.
2. Ковалёв, В. С. Технология машиностроения: Учебник для вузов. — М.: Машиностроение, 2018. — 432 с.
3. Ключев, В. В. Методы контроля точности и качества обработки. — М.: Инфра-М, 2019. — 356 с.
4. Кудряшов, П. Н. Цифровизация производства и концепция Индустрии 4.0. — СПб.: Политех-Пресс, 2020. — 288 с.
5. Попов, А. В., Смирнов, И. А. Программирование станков с ЧПУ. — СПб.: Питер, 2020. — 368 с.
6. Пузырьков, В. А., Гладких, И. Г. Повышение эффективности токарной обработки на станках с ЧПУ. // *Вестник машиностроения*. — 2021. — №6. — С. 15–22.
7. Степанов, А. А. Технологические основы механической обработки на станках с ЧПУ. — М.: Академия, 2017. — 412 с.
8. ГОСТ 1050–2013. *Прокат из конструкционных качественных и специальных сталей*. — М.: Стандартиформ, 2014.
9. ГОСТ 2789–2014. *Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики*. — М.: Стандартиформ, 2015.
10. Altintas, Y. *Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design*. — Cambridge University Press, 2020. — 480 p.
11. Budynas, R. G., Nisbett, J. K. *Shigley's Mechanical Engineering Design*. — 12th ed. — McGraw-Hill, 2021. — 1130 p.
12. Childs, T. H. C. *Metal Machining: Theory and Applications*. — Elsevier, 2019. — 606 p.
13. Denkena, B., Tönshoff, H. K. *Cutting Technology: Theory and Practice*. Springer, 2019. — 420 p.
14. Groover, M. P. *Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing*. — 5th ed. — Pearson, 2021. — 810 p.
15. ISO 14649:2019. *Data model for computerized numerical controllers (STEP NC)*. — International Organization for Standardization, Geneva, 2019.
16. ISO 230–1:2022. *Test code for machine tools — Part 1: Geometric accuracy of machines operating under no-load or quasi-static conditions*. — ISO, Geneva, 2022.
17. Kusiak, A. Smart Manufacturing. // *International Journal of Production Research*. — 2018. — Vol. 56(1–2). — P. 508–517.
18. Lee, J., Bagheri, B., Kao, H.-A. A Cyber-Physical Systems Architecture for Industry 4.0-based Manufacturing Systems. // *Manufacturing Letters*. — 2015. — Vol. 3. — P. 18–23.

ҒЫЛЫМИ ЕҢБЕКТЕР ТІЗІМІ

№ п/п	Атауы	Басылымның сипаты	Шығу деректері	Беттер саны
1	Сандық бағдарламамен басқарылатын заманауи станоктарда біліктерді механикалық өңдеудің тиімділігін зерттеу және талдау	Электронды нұсқа	“Сәтбаев оқулары” халықаралық ғылыми-тәжірибелік журнал	5