

Машина жасау, технологиялық машиналар және көлік, құрылыс

DOI: <https://doi.org/10.53002/095>

TOOL TRAJECTORY PLANNING AND PERFORMANCE OPTIMIZATION OF CNC MACHINE TOOLS, TAKING INTO ACCOUNT TIME EFFICIENCY

Arkabayev U.

NPJSC “Abylkas Saginov Karaganda Technical University”, Karaganda, Kazakhstan

**Corresponding author e-mail: usen_0496@mail.ru*

Author information:

Arkabayev Ussen, NPJSC “Abylkas Saginov Karaganda Technical University”, Karaganda, Kazakhstan,

e-mail: usen_0496@mail.ru

Abstract — This study considers the optimization of processing time on CNC milling machines, which is achieved by changing machine parameters and tool trajectories. Using version 3.1.0 of ICAM3D, this approach aims to reduce processing time while maintaining workflow constraints. In addition, a new method of G-code optimization is proposed, which is aimed at reducing processing time, but maintaining the required accuracy and quality of the finished product. We offer a method that combines advanced algorithms that detect and eliminate excess movements, optimize tool trajectories, and improve processing strategies. Experimental results show that without reducing the processing accuracy, the processing time can be greatly reduced, which can save significant cost for industrial applications and improve efficiency. The importance of this work lies in the correct choice of the trajectory of the tool. In the P3 project, the optimization process reduced the processing time from 15 minutes 23 seconds to 13 minutes 33 seconds by improving the G-code. The initial processing time was 20 minutes and 2 seconds, which coincides with the completion time of the P3 project under the condition of the CNC machine tool working at 75% speed. To further increase efficiency, additional software tools such as ARTCAM and ASPIRE were used to implement a new tool trajectory strategy.

Keywords — recovery, sleeve lining, ultraviolet radiation, recovery, corrosion, hydraulic characteristics, engineering networks, economic efficiency.

УАҚЫТ ТИІМДІЛІГІН ЕСКЕРЕ ОТЫРЫП, ҚҰРАЛ ТРАЕКТОРИЯСЫН ЖОСПАРЛАУ ЖӘНЕ CNC СТАНОКТАРЫНЫҢ ӨНІМДІЛІГІН ОҢТАЙЛАНДЫРУ

Аркабаев У.Б.

«Ә.Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» КеАҚ, Қарағанды, Қазақстан

**Автор-корреспондент e-mail: usen_0496@mail.ru*

Автор туралы ақпарат:

Аркабаев Усен Бекжанович, «Ә.Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» КеАҚ, Қарағанды,

Қазақстан, e-mail: usen_0496@mail.ru

Аңдатпа — Бұл зерттеу CNC фрезерлеу станоктарында өңдеу уақытын оңтайландыруды қарастырады, оған машина параметрлері мен құрал траекторияларын өзгерту арқылы қол жеткізіледі. ICAM3D бағдарламасының 3.1.0 нұсқасын қолдана отырып, бұл тәсіл өңдеу уақытын азайтуды мақсат етеді, сонымен бірге жұмыс процесінің шектеулерін сақтайды. Сонымен қатар, G-кодты оңтайландырудың жаңа әдісі ұсынылады, ол өңдеу уақытын қысқартуға бағытталған, бірақ дайын өнімнің қажетті дәлдігі мен сапасын сақтайды. Біз артық қозғалыстарды анықтап, жоятын, құрал траекторияларын оңтайландыратын және өңдеу стратегияларын жақсартатын жетілдірілген алгоритмдерді біріктіретін әдісті ұсынамыз. Эксперименттік нәтижелер көрсеткендей, өңдеу дәлдігін төмендетпей, өңдеу уақытын едәуір қысқартуға болады, бұл өнеркәсіптік қолданбалар үшін айтарлықтай шығын үнемдеуге және тиімділікті арттыруға мүмкіндік береді. Бұл жұмыстың маңыздылығы құрал траекториясын дұрыс таңдауда жатыр. P3 жобасында оңтайландыру процесі G-кодты жетілдіру арқылы өңдеу уақытын 15 минут 23 секундтан 13 минут 33 секундқа дейін қысқартты. Бастапқы өңдеу уақыты 20 минут 2 секундты құрады, бұл CNC станогының 75% жылдамдықта жұмыс істеу жағдайында P3 жобасын аяқтау уақытымен сәйкес келеді. Тиімділікті одан әрі арттыру үшін ARTCAM және ASPIRE сияқты қосымша бағдарламалық құралдар жаңа құрал траекториясы стратегиясын енгізу үшін пайдаланылды.

Түйін сөздер — қалпына келтіру, гильзалық төсем, ультракүлгін сәулелену, қалпына келтіру, коррозия, гидравликалық сипаттамалар, инженерлік желілер, экономикалық тиімділік.

ПЛАНИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИИ ИНСТРУМЕНТА С УЧЕТОМ ВРЕМЕННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СТАНКОВ С ЧПУ

Аркабаев У.Б.

НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», Караганда, Казахстан

**Автор-корреспондент e-mail: usen_0496@mail.ru*

Информация об авторе:

Аркабаев Усен Бекжанович, НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», Караганда, Казахстан, e-mail: usen_0496@mail.ru

Аннотация — В данном исследовании рассматривается оптимизация времени обработки на фрезерных станках с ЧПУ, что достигается изменением параметров станка и траекторий инструмента. Используя версию 3.1.0 ICAM3D, этот подход направлен на сокращение времени обработки, сохраняя при этом ограничения рабочего процесса. Кроме того, предлагается новый метод оптимизации G-кода, который направлен на сокращение времени обработки, но сохраняет необходимую точность и качество готового продукта. Мы предлагаем метод, который объединяет передовые алгоритмы, которые выявляют и устраняют избыточные движения, оптимизируют траектории инструментов и улучшают стратегии обработки. Экспериментальные результаты показывают, что можно значительно сократить время обработки без снижения точности обработки, что может значительно сэкономить затраты и повысить эффективность для промышленных приложений. Важность этой работы заключается в правильном выборе траектории инструмента.

В проекте P3 процесс оптимизации сократил время обработки с 15 минут 23 секунды до 13 минут 33 секунды за счет улучшения G-кода. Начальное время обработки составило 20 минут 2 секунды, что соответствует времени завершения проекта P3 в условиях работы станка с ЧПУ со скоростью 75%. Для дальнейшего повышения эффективности дополнительные программные инструменты, такие как ARTCAM и ASPIRE, были использованы для реализации новой стратегии траектории инструмента.

Ключевые слова — восстановление, гильзовая прокладка, ультрафиолетовое излучение, восстановление, коррозия, гидравлические характеристики, инженерные сети, экономическая эффективность.

НЕГІЗГІ ЕРЕЖЕЛЕР

Зерттеу барысында CNC станоктарында құрал траекториясын оңтайландыру өңдеу уақытын қысқартып, өндірістік процестің тиімділігін арттыратыны анықталды. CAM жүйелерін пайдалану құрал қозғалысын дәл жоспарлауды қамтамасыз етіп, адам факторынан туындайтын қателіктерді азайтатыны дәлелденді. Жүргізілген салыстырмалы талдау нәтижесінде Zig Zag траекториясының басқа стратегиялармен салыстырғанда өңдеу уақыты бойынша жоғары тиімділік көрсететіні анықталды. ICAM3D бағдарламасын ArtCAM және Aspire бағдарламаларымен біріктіріп қолдану CNC өңдеу дәлдігін сақтай отырып, өндірістің жалпы өнімділігін арттыруға мүмкіндік беретіні көрсетілді.

КІРІСПЕ

Өңдеуде сандық басқару, немесе компьютерлік сандық басқару (CNC), құралдарды

компьютердің көмегімен автоматты басқару әдісін білдіреді. CNC – бұл алдын ала бағдарламаланған компьютерлік бағдарламалық жасақтаманы қолдана отырып, станок құралдарының жұмысын, қозғалысын және дәлдігін автоматтандыратын өндірістік әдіс. Бұл бағдарламалық жасақтама әртүрлі кесу құралдарының (фрезерлер, токарлық станоктар, маршрутизаторлар, бұрғылар, тегістегіштер, су ағындары және лазерлер) функцияларын автоматтандыру үшін машиналарға біріктірілген.

G-кодты өңдеу уақытын оңтайландыру CNC өңдеу процестерінің тиімділігі мен өнімділігін арттырудағы маңызды аспект болып табылады. Бұл мақалада жылдамдықтың, беріліс жылдамдығының және аспап траекториясының стратегияларының әртүрлілігіне байланысты өңдеу уақытын оңтайландыру қарастырылады. Компьютерлік өндіріс технологияларын (CAM) қолдану өңдеу тиімділігі мен сапасын арттыратын

аспап траекториясын жетілдіруге мүмкіндік береді.

Оңтайландыру арқылы өңдеу уақытын қысқартуға, беткі қабат сапасын жақсартуға және құралдың тозуын азайтуға болады. Әрбір параметрдің өңдеу уақыты ICAM3D нұсқасы 3.1.0 және Autodesk Art нұсқасы 2018.0.0 ECMAScript 6 (ES6)/ECMAScript 2015–2017 CNC модельдеу бағдарламалық жасақтамасын пайдаланып модельдеу арқылы анықталды. ICAM3D бағдарламасы өндірістік процестерді модельдеуге және оларды іске асыру алдында жобаның дұрыстығын тексеруге мүмкіндік береді. Өңдеу стратегиясы жалпы өңдеу уақытына айтарлықтай әсер етеді.

Қазіргі CNC жүйелерінде бағдарламаланатын автоматтандырылған станоктар қолмен бағдарламалаудың орнына CAM бағдарламалық жасақтамасына сүйенеді. Бұл бағдарлама жасау уақытын қысқартуға және адам қателерінің ықтималдығын азайтуға мүмкіндік береді.

CNC өңдеу саласында дәлдік, тиімділік және үнемділік сияқты параметрлер бойынша оңтайлы өнімділікке қол жеткізу қазіргі заманғы өндіріс үшін аса маңызды. Бұл оңтайландыруды жетілдіруде негізгі рөл атқаратын фактор – аспап траекториясының стратегиясы, яғни дайындаманы өңдеу үшін кесу құралының алдын ала бағдарламаланған қозғалыс жолы.

Аспап траекториясының стратегиясы құрал қозғалысының тиімділігіне, өңдеу циклінің уақытына, құралдың тозуына және беткі қабат сапасына тікелей әсер етеді. Озық алгоритмдер мен оңтайландыру әдістерін қолдану арқылы бұл стратегия құралдардың ең тиімді және үнемді қозғалысын қамтамасыз етеді, сонымен бірге дәлдік пен сапаны сақтайды. CNC жүйелері мен жоғары дәлдікті талап ететін өндірістердің дамуына байланысты аспап траекториясы стратегиясы CNC бағдарламалаудың негізгі элементіне айналды.

Аспап траекториясының негізгі мақсаты – өңдеу процесін толықтай оңтайландыру, құралдың қозғалыс жолын қысқарту, материалды өңдеу жылдамдығын арттыру және жалпы өнімділікті жоғарылату арқылы өндіріс шығындарын азайту. Бұл стратегия әсіресе авиация, автомобиль жасау және медициналық құрылғылар өндірісінде өте маңызды, өйткені бұл салаларда әрбір детальдің жоғары дәлдікпен жасалуы талап етіледі.

CNC технологиясының үнемі дамуымен аспап траекториясының стратегиясы нақты уақыттағы машинаның кері байланысын және бейімделген оқыту алгоритмдерін қолдану

арқылы одан әрі жетілдірілуде, бұл одан да жоғары оңтайландыру мен өнімділік деңгейлерін қамтамасыз етеді.

Бұл зерттеу ICAM3D бағдарламалық жасақтамасының стандартты мүмкіндіктерін кеңейту арқылы CNC өңдеуді жетілдірудің маңызды жетістіктерін көрсетеді. Бұл мақсатқа ArtCAM және Aspire сияқты қосымша құралдарды енгізу арқылы қол жеткізілді. Бұл бағдарламалық жасақтама жетілдірілген G-кодты генерациялау мен оңтайландыруды іске асырып, уақытты тиімді пайдалануға мүмкіндік берді. ICAM3D тек төрт аспап траекториясын қолдаса, біздің әдіс өңдеу уақытын 15 минут 23 секундтан 13 минут 33 секундқа дейін қысқартты, яғни 12%-ға жақсарды. Бұл әдістеме заманауи өндірісте тиімділік, дәлдік және өнімділікті арттыруға көмектеседі.

Зерттеудің маңыздылығы. Қазіргі машина жасау өндірісінде CNC станоктарының өнімділігін арттыру, өңдеу уақытын қысқарту және өндірістік шығындарды төмендету маңызды ғылыми-техникалық міндеттердің бірі болып табылады. Бұл міндеттерді шешуде құрал траекториясын оңтайлы жоспарлау ерекше рөл атқарады, себебі ол өңдеу уақытына, құралдың тозуына, энергия шығынына және дайын бұйымның сапасына тікелей әсер етеді. CAM жүйелерінің және өңдеу стратегияларының қарқынды дамуына қарамастан, көптеген өндірістік кәсіпорындарда құрал траекторияларының тиімділігі толық пайдаланылмайды. Осыған байланысты G-кодты жетілдіру және қосымша бағдарламалық қамтамасыз ету арқылы өңдеу уақытын қысқарту өндірістің экономикалық тиімділігін арттырудың маңызды бағыты болып табылады. Зерттеу нәтижелері машина жасау кәсіпорындарында CNC өңдеу процестерін жетілдіруге және өндірістік ресурстарды тиімді пайдалануға мүмкіндік береді.

Зерттеудің жаңалығы.

- ICAM3D бағдарламасының стандартты мүмкіндіктерін кеңейту арқылы CNC өңдеу уақытын қысқартудың жаңа тәсілі ұсынылды;

- ArtCAM және Aspire бағдарламаларының көмегімен оңтайландырылған G-код генерациялау әдістемесі әзірленді;

- Құрал траекториясының төрт стратегиясының (Spiral In, Spiral Out, One Way және Zig Zag) өңдеу уақытына әсері салыстырмалы түрде зерттелді;

- Zig Zag стратегиясының өңдеу уақытын азайтудағы артықшылықтары тәжірибелік түрде дәлелденді;

- Ұсынылған әдіс дәстүрлі өңдеу тәсілдерімен салыстырғанда өңдеу уақытын 15 мин 23 с-тан 13 мин 33 с-қа дейін қысқартуға мүмкіндік берді, бұл өндірістің тиімділігін арттырады.

ӘДІСТЕР МЕН МАТЕРИАЛДАР

Бұл зерттеу өңдеу процестерін талдау үшін модельдеу және оңтайландыру әдістерін қолданады. Ол CAM және CNC модельдеу бағдарламалық жасақтамасын пайдаланып, бағдарламаның тиімділігін және өңдеу уақытын талдауды қамтиды. ICAM3D бағдарламасы CNC бағдарламаларын жасау үшін қолданылады, онда жылдамдық пен аспап жолының стратегиясы сияқты параметрлер жұмыс бөлшегінің қималық өзгерістеріне негізделі отырып анықталады.

Жобаларды талдау үшін біз материал ретінде мәрмәрді қолдандық. Мәрмәр – әктастың жоғары температура мен қысым әсерінен қайта кристалдануынан пайда болатын метаморфтық жыныс. Ол негізінен кальций карбонатынан (CaCO_3) тұрады, ал оның ерекше өрнектері немесе тамырлары түзілу кезінде кездесетін қоспалардан, мысалы, саз, құм, шөгінділер немесе басқа минералдардан пайда болады.

P1 және P2 жобаларында біз 20 мм қалыңдықтағы кремді мәрмәрді қолдандық, ал P3 жобасында 15 мм қалыңдықтағы кремді мәрмәр пайдаланылды. Мәрмәр эстетикалық қасиеттері мен өңдеуге жеңілдігіне байланысты мүсіндерде, ғимараттарда, үстел беттерінде, еден жабындарында және сәндік элементтерде кеңінен қолданылады.

Бұл зерттеуде біз төрт түрлі аспап жолы стратегиясын қолдандық, олардың сипаттамасы төменде келтірілген.

Spiral In (Ішке қарай спираль) стратегиясы – бұл әдісте аспап қалтаның немесе кесілетін пішіннің сыртқы жиегінен басталып, ортасына қарай спираль бойымен біртіндеп қозғалады. Бұл аспап жолы, әдетте, қалта фрезерлеу, гравюра немесе контурды өңдеу тапсырмалары үшін қолданылады, онда кесу құралы материалды тегіс және үздіксіз алып тастауы керек. TP1 үшін Spiral In стратегиясының теңдеулері төмендегідей сипатталады:

$$\begin{aligned}x &= (D - k \cdot a) \cdot \cos(a) \\y &= (D - k \cdot a) \cdot \sin(a)\end{aligned}$$

мұнда:

D – сыртқы диаметр;

a – бұрыштық параметр;

k – бір айналымдағы қадамның азаюы.

Spiral Out (Сыртқа қарай спираль) стратегиясы TP2 үшін Spiral In стратегиясының

кері нұсқасы болып табылады. Бұл әдісте аспап қалтаның немесе кесілетін пішіннің ортасынан бастап шетке қарай спираль бойымен қозғалады. Бұл әдіс көбінесе нақыштау (гравюра) немесе таяз қалта жасау операцияларында қолданылады, мұнда өңдеу орталықтан басталып, шетке қарай жылжуы қажет. TP2 үшін Spiral Out стратегиясының теңдеулері төмендегідей сипатталады:

$$\begin{aligned}x &= (k \cdot a) \cdot \cos(a) \\y &= (k \cdot a) \cdot \sin(a)\end{aligned}$$

мұнда:

a – бұрыштық параметр;

k – бір айналымдағы қадамның азаюы.

One Way (Бір бағытта) стратегиясы TP3 үшін кесу құралы дайындама бойымен бір ғана бағытта қозғалады, әдетте түзу сызықты траекторияны ұстанады. Бұл құрал жолы қарапайым қалта өңдеу немесе контурлау тапсырмалары үшін ең жиі қолданылады және бір бағытта (не солдан оңға, не оңнан солға) орындалатын кесу қозғалыстарымен сипатталады. Әрбір өтуден кейін құрал қайтадан жоғары көтеріліп, сол бағытта жаңа өтуді бастайды.

20 флейтасы (кесу жиегі) бар құрал материалмен бір уақытта бірнеше нүктеде жанасады. Бір өтудің кесу траекториясы флейта арасындағы қашықтықпен анықталады және келесі теңдеулермен сипатталады:

$$\begin{aligned}x &= x_0 + n \cdot w, \\y &= y_0 + i \cdot S_{\text{effective}}\end{aligned}$$

мұнда:

$S_{\text{effective}} = s/20$ – 20 флейтаның әсерінен азайтылған қадам аралығы; x_0, y_0 – бастапқы позиция;

n – X бағытындағы өтулер саны;

i – Y бағытындағы қадамдар саны.

Zig Zag (Зигзаг) стратегиясы TP4 үшін, сонымен қатар кері және алға фрезерлеу деп те аталады, құрал екі бағытта (солдан оңға және оңнан солға) ауыспалы түрде қозғалады, осылайша зигзаг үлгісін жасайды. Бұл стратегия көбінесе қалта фрезерлеу, профильді кесу және материалды біркелкі әрі жылдам алып тастау қажет болатын басқа да операциялар үшін қолданылады.

TP4 үшін Zig Zag стратегиясында құрал қозғалыс бағытын ауыстырады, ал 20 флейта әсерінен нақты кесу қадамының арақашықтығы азаяды. Бұл стратегия үшін теңдеулер келесі түрде болады:

$$x = x_0 + (-1)^i \cdot (n \cdot w)$$

$$y = y_0 + i \cdot S_{\text{effective}}$$

мұнда:

$S_{\text{effective}} = s/20 - 20$ флейта әсерінен азайтылған қадам аралығы; x_0, y_0 – бастапқы позиция;

w – қалта ені (құрал диаметрін ескере отырып түзетілген); n – зигзаг өтулер саны;

i – қатар индексі (кезектескен бағыттармен $(-1)^i$).

20 флейта арқасында құрал материалды алу тиімділігін арттырады және жоғары кесу дәлдігін сақтайды.

Материалды алу жылдамдығы (MRR) әрбір стратегия үшін келесі формулалар арқылы есептеледі:

$$f_t = f/N = 700/20 = 35 \text{ [mm/tooth]}$$

$$\text{MRR} = f_t \cdot N \cdot D \cdot W \cdot \text{DOC} \text{ [mm}^3/\text{min]} = 3 \cdot 20 \cdot 85 \cdot 70 \cdot 2 = 8330 \text{ [mm}^3/\text{min]}$$

мұнда:

f – жалпы беріліс жылдамдығы (мм/мин); f_t – бір тістегі беріліс (мм/тіс);

N – құралдағы тістер (флейта) саны;

D – құрал диаметрі (мм);

W – кесу ені немесе қадам аралығы (мм);

DOC – кесу тереңдігі (мм).

P1 жобасы – $1200 \times 900 \text{ мм}^2$ өлшемдері бар шаршы геометрияны қамтиды. Қолданылған материал – табиғи тас. Тас өңдеуі T0050 құралымен жүргізілді, қалта қазу (pocketing) процесі бір өтуде 3 мм тереңдікте орындалды. P1 жобасы төрт түрлі құрал жолдары (TP1 – TP4) стратегияларын қолдану арқылы аяқталды. Нәтижелер кестеде көрсетіліп, жобаны аяқтау уақыты минутпен беріледі.

P2 жобасы – $1600 \times 750 \text{ мм}^2$ өлшемдері бар шаршы пішіннен тұрады. Бұл жобада да табиғи тас қолданылды. Қалта қазу процесі T0050 құралымен 2 мм тереңдікте орындалды. P1 жобасындағыдай жұмыс процедурасы қолданылды, сол құрал пайдаланылды. Жобаның симуляциясы ICAM3D бағдарламасы арқылы орындалды.

P3 жобасында $100 \times 50 \text{ мм}$ өлшемдері бар төртбұрышты траншея зерттелді. Траншеяны өңдеу T503 құралының бүйірімен 2 мм тереңдікте бір өтуде аяқталды. Жер жырту (plowing) процесі төрт түрлі құрал жолдары (TP1 – TP4) стратегияларымен орындалды. ICAM3D бағдарламасында симуляция жүргізілді, ал соңғы өнім Intermac Master 33.3 CNC станогында жасалды. Нәтижелер кестеде көрсетіліп, әрбір төрт стратегия бойынша жұмысты аяқтауға кеткен уақыт минутпен беріледі.

V	Y	D	L	MATERIAL	DIRECTION OF ROTATION	RPM	FEED mm/min	REMOVAL mm	CODE
30	10	10	55	M	DX	7000-8000	300-500	2-3	OFFR00776



Сурет 1 – Металды дәл өңдеуге арналған T503 токарлық / фрезерлік кескіш.

POS	ITEM TYPE	D	H	GRIT	CODE
1-2	Rough segmented	85	35	D427	DRI70162



Сурет 2 – Материалды өрескел алу үшін t0050 сегменттелген Гауһар кескіш

T0050 құралы материалды бұрғылау үшін жасалған, оның диаметрі $D = 85$ мм, биіктігі $H = 35$ мм.

Бұл құрал 20 тісті және 3800-4200 айн/мин (RPM) диапазонында жұмыс істейді.

T0050 құралы үшін рұқсат етілген беріліс жылдамдығы 600-1000 мм/мин аралығында, ал жұмыс тереңдігі 3,84 мм. Бұл құралдың негізгі мақсаты – материалды алу, әсіресе босату (emptying) процесі арқылы.

T0050 ISO стандарттарына сәйкес конусқа орнатылады, бұл оны жеңіл ауыстыруға және

тозған кезде жаңасына алмастыруға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, құрал екі деңгейлі суыту жүйесімен жабдықталған:

1. Сыртқы суыту (external cooling)
2. Ішкі суыту (internal cooling)

Жұмысты талдау үшін Intermac Master 33.3 CNC (Biesse Group, Италия, Пезаро) станогы қолданылды. Үш жоба талданды:

1. Бірінші және екінші жобаларда T0050 құралы пайдаланылып, симуляция жүргізілді.
2. Үшінші жоба (P3) үшін T503 құралы қолданылды.

Кесте 1 – Талданатын жобалар және олардың сәйкес кодтары.

Код	Өлшем	Құрал
P1	1200 x 900	0050
P2	1600 x 750	0050
P3	100 x 50	503

Механикалық өңдеу процесінде, мысалы, фрезерлеу немесе токарлық өңдеу кезінде құралдың қозғалатын нақты бағыты траекториясы (toolpath) деп аталады. Бұл траектория ICAM3D бағдарламасында жасалып, қажетті пішінді алу үшін құралдың дайындама бойынша қозғалысын анықтайды.

Құрал траекторияларын дұрыс басқару жоғары сапалы өңдеу нәтижелеріне қол жеткізуде маңызды рөл атқарады. Оған дәл өлшемдер, тегіс беткі қабат, сондай-ақ тиімді материал алу процесі жатады.

Сонымен қатар, траекториялар кесу құралының қасиеттерін, өңдеу параметрлерін және құрал ұстағышының шектеулері сияқты факторларды ескереді. Бұл материалды тиімді алып тастауға және құралдың дұрыс жұмыс істеуіне мүмкіндік береді.

ICAM3D бағдарламасында құрал траекториясының төрт стратегиясы қарастырылған: ішке спираль (Spiral In), сыртқа спираль (Spiral Out), бір бағытта (One Way) және зигзаг (Zig Zag). Бұл стратегиялар TP1-ден TP4-ке дейін нөмірленген. Құрал траекториясының параметрі қалталар (pocketing) өңдеу операцияларында қолданылған.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ТАЛҚЫЛАУ

Талдау барысында үш жоба (P1–P3) қарастырылды. Төрт түрлі құрал траекториясы (TP1–TP4) — ішке спираль (Spiral In), сыртқа спираль (Spiral Out), бір бағытта (One Way) және зигзаг (Zig Zag) — кезекпен қолданылды. Бұл ретте кесу жылдамдығы, беріліс жылдамдығы және кесу ені сияқты параметрлер ескерілді.

Жобаларда қолданылған құралдар P1 және P2 жобалары

Бұл жобаларда T0050 құралы қолданылды. Қалталарды (pocketing) өңдеу 2 мм тереңдікте, 75% жылдамдықта орындалды. Салқындату жүйесі ретінде ішкі және сыртқы су салқындатуы қолданылды.

T0050 құралының сипаттамалары:

1. Диаметр (D) = 85 мм
2. Биіктігі (H) = 35 мм
3. Айналу жылдамдығы (RPM) = 4000
4. Беріліс жылдамдығы = 700 мм/мин P3 жобасы

Бұл жобада T503 құралы қолданылды. Жұмыс екі фазада орындалды:

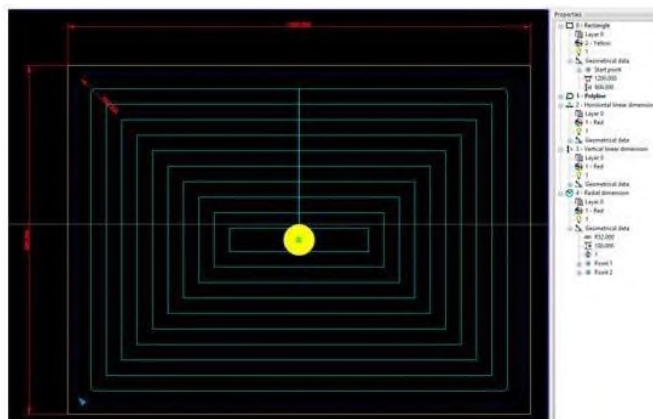
1. Бірінші фазада 75% жылдамдық
2. Екінші фазада 100% жылдамдық Кесу 2 мм тереңдікте жүргізілді. Ішкі және сыртқы су салқындату жүйесі қолданылды.

T503 құралының сипаттамалары:

1. Диаметр (D) = 10 мм
2. Биіктігі (H) = 5,5 мм
3. Айналу жылдамдығы (RPM) = 8000
4. Беріліс жылдамдығы = 400 мм/мин P1 жобасының геометриясы

1200 × 900 мм өлшемдері бар геометрия пайдаланылды. Қалталар T0050 құралының көмегімен өңделді. Талдау үшін жалпы қалтаны өңдеу уақыты тіркелді, ол төрт түрлі құрал траекториясы негізінде есептелді.

3- суретте зерттеу үшін қолданылған геометрия көрсетілген. Оң жақ бөлігінде 1200 × 900 өлшемдері және геометрияның доғалық бөлігі көрсетілген. Геометрия ICAM3D бағдарламасының көмегімен жасалған.



Сурет 3 – CNC аппаратына арналған геометрия

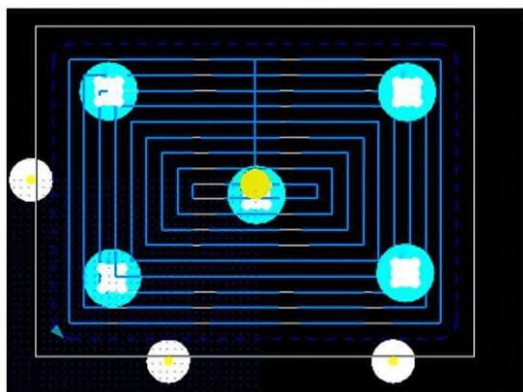
Сурет 4-7 P1 жобасы аяқталғаннан кейін құрал траекторияларын көрсетеді. Жоба алдымен ICAM3D бағдарламасында модельденді, содан кейін CNC станогында өңделді.

Симуляцияның негізгі мақсаты:

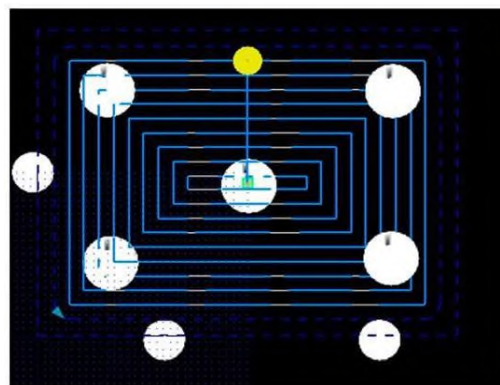
- Геометрияның және құралдың дұрыстығын тексеру;
- Жобаның сәтті аяқталу мүмкіндігін бағалау;

- Құрал жолдарын оңтайландыру және ықтимал қателерді алдын ала анықтау;

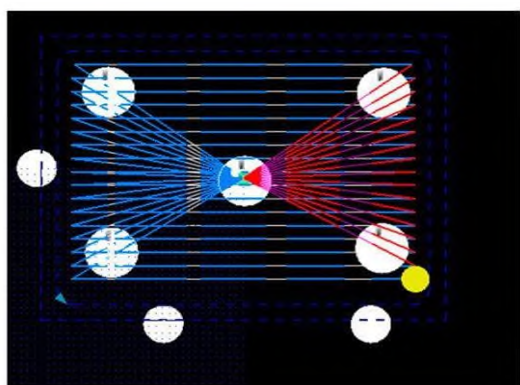
ICAM3D бағдарламасында алынған нәтижелерді CNC өңдеу кезінде растау маңызды болды, өйткені бұл материалды тиімді алып тастауға және өңдеу уақытының оңтайландырылуына мүмкіндік берді.



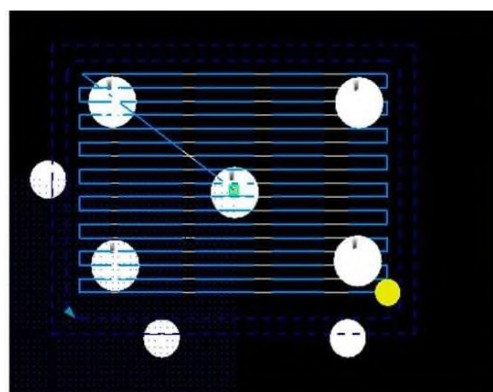
Сурет 4 – CNC аппаратында спираль ішке бағыттылан



Сурет 5 – CNC аппаратында спираль сыртқа бағыттылан



Сурет 6 – CNC аппаратында спираль бір бағытта (One Way)



Сурет 7 – CNC аппаратында спираль Зиг-Заг

ҚОРЫТЫНДЫ

Бұл зерттеуде біз төрт аспаптық жол стратегиясын бағаладық: спираль кіріс, спиральды шығу, зиг Заг және бір жол.

Деректерді талдаудан CNC машиналарының жұмысында аспап жолын таңдау өте маңызды деген қорытынды жасауға болады. Ең аз жұмыс уақыты 00:20:02 және максимум 01:21:46 болған P3 жобасында көрсетілгендей, құралдарды дұрыс таңдамау машинаның жұмыс уақытына әсер етеді.

Дегенмен, аспап жолын таңдау дайындаманың геометриясына да байланысты. Талдау нәтижесінде жобалар үшін өңдеудің ең аз уақыттары және сәйкес құралдар жолының түрлері келесідей екенін табуға болады.

Жалпы, өңдеудің ең аз уақыты TP4, Zig Zag үлгісі арқылы алынды, ал ең көп уақыт TP3, One Way үлгісімен жазылды. P3 жобасының аяқталу уақыты 20:02 мин. ICAM3D деректерін және P3 жобасы үшін CNC нақты деректерін ескере отырып, біз аяқтаудың соңғы уақытын 15 минут және 23 секундқа дейін қысқарттық. Бағдарламалық құрал және G-код арқылы оңтайландырылған уақыт одан әрі 13 минут және 33 секундқа дейін қысқарды.

Бұл жағдайда пайдаланылатын CNC түріне арналған бағдарламалық құрал тек төрт стратегия үлгісіне рұқсат етілгендіктен, біз одан әрі оңтайландыру мүмкіндіктерін қамтамасыз ететін ArtCAM және Aspire сияқты қосымша бағдарламалық құралды пайдаландық. Осы бағдарламалық бағдарламалардан G-коды жасалды, ол оңтайландырудан кейін CNC машинасында қолданылды.

Жалпы алғанда, біз қалтаға салу процесінде стандартты ICAM3D бағдарламалық жасақтамасының шектеулерін және уақыт тиімділігі тұрғысынан оңтайландырылған G-кодын жасау үшін басқа бағдарламалық құралдар ұсынатын артықшылықтарды пайдаландық.

CNC максималды жылдамдығында ең оңтайландырылған 15 минут және 23 секунд

уақытынан бастап, біз қосымша бағдарламалық құрал мен G-кодты оңтайландыру процесін пайдалану арқылы бұл уақытты 13 минут және 33 секундқа дейін қысқарта алдық.

Бұл зерттеу инженерлерге жұмыс процестерін оңтайландыруға көмектесуі мүмкін, әсіресе күрделі геометриялар үшін. Оңтайлы стратегияларды анықтау арқылы ол ресурстарды максималды пайдалану арқылы тұрақты өндірістік тәжірибелерді сәйкестендіреді.

Болашақ зерттеулер дайындаманың геометриясына, материалына және өңдеу параметрлеріне негізделген құрал-сайман жолының оңтайлы стратегияларын болжау үшін машиналық оқыту үлгілерін пайдалануға бағытталуы керек.

МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫ

Автор осы зерттеуді орындау және мақаланы жариялау барысында мүдделер қайшылығы жоқ екенін мәлімдейді.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ

Авторлар осы зерттеуді орындау кезінде сыртқы қаржыландырудың жоқтығын мәлімдейді.

АЛҒЫС

Автор қолжазбаны мұқият қарастырып, мақаланың мазмұны мен сапасын едәуір жақсартуға мүмкіндік берген құнды ескертулері мен ұсынымдары үшін журналдың редакторы мен рецензентіне шынайы алғысын білдіреді.

Авторлық құқық © 2025 автор(лар)ға тиесілі. Бұл мақала Creative Commons Attribution–ShareAlike 4.0 International (CC BY-SA 4.0) лицензиясы бойынша ашық қолжетімді болып табылады. Лицензия түпнұсқа еңбекке тиісті түрде сілтеме жасалған жағдайда, кез келген ортада пайдалануға, таратуға және қайта жариялауға рұқсат береді. Туынды материалдар осы лицензияның дәл осындай шарттарымен таратылуы тиіс.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- [1] Denkena B., Schmidt J., Krüger M. Toolpath optimization strategies for high-performance CNC machining. *Journal of Manufacturing Processes*. 2022. 77. P. 619–632. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.03.041>
- [2] Li X., Wang H., Zhang Y. Toolpath planning and machining efficiency optimization in CNC manufacturing: A review. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2022. 75. 102298. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2022.102298>
- [3] Kumar R., Singh P., Sharma A. Intelligent toolpath optimization for CNC milling using advanced CAM systems. *Materials Today: Proceedings*. 2023. 72. P. 2155–2162.
- [4] Zhang Y., Liu Q., Chen J. Recent advances in CNC machining process optimization: A comprehensive review. *Machines*. 2023. 11(8). 765. <https://doi.org/10.3390/machines11080765>

- [5] Krolczyk G., Legutko S., Nieslony P. Digital manufacturing and optimization of machining processes in Industry 4.0. *Applied Sciences*. 2023. **13**(4). 2407. <https://doi.org/10.3390/app13042407>
- [6] Xu J., Zhao H., Li M. Optimization of G-code generation and toolpath planning for CNC machine tools. *Journal of Manufacturing Systems*. 2024. **72**. P. 319–331.
- [7] Patel D., Mehta R. Artificial intelligence-assisted CNC machining optimization: Current trends and future perspectives. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2024. **129**. 107658.
- [8] Yao X., Sun Y., Wang Z. Advanced toolpath generation for CNC machining using hybrid optimization algorithms. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024. **131**. P. 2501–2518.
- [9] Chen L., Zhao W., Huang Y. Sustainable CNC machining through toolpath optimization and digital manufacturing. *Journal of Cleaner Production*. 2025. **489**. 145678.
- [10] Singh V., Gupta S., Kumar A. Intelligent CNC machining optimization using digital twin and advanced CAM technologies. *Manufacturing Letters*. 2025. **34**. P. 90–96.

REFERENCES

- [1] Denkena B., Schmidt J., Krüger M. Toolpath optimization strategies for high-performance CNC machining. *Journal of Manufacturing Processes*. 2022. **77**. P. 619–632. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.03.041>
- [2] Li X., Wang H., Zhang Y. Toolpath planning and machining efficiency optimization in CNC manufacturing: A review. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2022. **75**. 102298. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2022.102298>
- [3] Kumar R., Singh P., Sharma A. Intelligent toolpath optimization for CNC milling using advanced CAM systems. *Materials Today: Proceedings*. 2023. **72**. P. 2155–2162.
- [4] Zhang Y., Liu Q., Chen J. Recent advances in CNC machining process optimization: A comprehensive review. *Machines*. 2023. **11**(8). 765. <https://doi.org/10.3390/machines11080765>
- [5] Krolczyk G., Legutko S., Nieslony P. Digital manufacturing and optimization of machining processes in Industry 4.0. *Applied Sciences*. 2023. **13**(4). 2407. <https://doi.org/10.3390/app13042407>
- [6] Xu J., Zhao H., Li M. Optimization of G-code generation and toolpath planning for CNC machine tools. *Journal of Manufacturing Systems*. 2024. **72**. P. 319–331.
- [7] Patel D., Mehta R. Artificial intelligence-assisted CNC machining optimization: Current trends and future perspectives. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2024. **129**. 107658.
- [8] Yao X., Sun Y., Wang Z. Advanced toolpath generation for CNC machining using hybrid optimization algorithms. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024. **131**. P. 2501–2518.
- [9] Chen L., Zhao W., Huang Y. Sustainable CNC machining through toolpath optimization and digital manufacturing. *Journal of Cleaner Production*. 2025. **489**. 145678.
- [10] Singh V., Gupta S., Kumar A. Intelligent CNC machining optimization using digital twin and advanced CAM technologies. *Manufacturing Letters*. 2025. **34**. P. 90–96.