

Sardor Khusnutdinovich Kambarbekov – First-year doctoral student at S. Amanzholov East Kazakhstan University; e-mail: sardor.kambarbekov@ayu.edu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6794-1281>.

Berik Kaldar – Junior Researcher at the Research Institute of Natural Sciences, Nanotechnology, and New Materials; e-mail: berik.kaldar@ayu.edu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-9267-7029>.

Поступила в редакцию 05.01.2026

Поступила после доработки 18.02.2026

Принята к публикации 19.02.2026

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1\(21\)-60](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-60)



FTAXP: 44.31.35

М.Қ. Жамбаева*, О.А. Степанова¹, А.Б. Касымов¹, М.В. Ермоленко¹, К.С. Астемесова²

¹Шөкәрім университеті,

071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинка көшесі, 20А

²Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті,

050043, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Сәтпаев көшесі 22

*e-mail: zhambaeva_94@mail.ru.

МЕТАЛДАРДЫ КЕСУДЕГІ MQL ЖАҒДАЙЫНДА МАЙЛАУ-СУЫТУ СҰЙЫҚТЫҚТАРЫНЫҢ ЖЫЛУФИЗИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН ОҢТАЙЛАНДЫРУ

Аңдатпа: Мақалада металдарды механикалық өңдеу кезінде минималды мөлшерде майлау (MQL) технологиясын қолдану арқылы қолданылатын майлау-суыту сұйықтықтардың (МСС) және наномодификацияланған майлардың жылуфизикалық қасиеттеріне арналған заманауи зерттеулерге шолу ұсынылған. Мақалада майлы, суды және эмульсиялық негіздегі негізгі МСС түрлері, олардың жылуфизикалық сипаттамалары және металдарды қарқынды кесу кезінде эксплуатация талаптары қарастырылған.

Арнайы назар әртүрлі нанобөлшектерді (Al_2O_3 , TiO_2 , SiO_2 , ZnO , графен т.б.) қосудың МСС жылуөткізгіштік қасиеттерін арттыруға, үйкелісті, тұтқырлықты, тығыздықты және жылу сыйымдылығын төмендетуге әсеріне аударылған. Жарияланымдарды талдау наномодификацияланған МСС және MQL технологиясын зерттеуге мүмкіндік берді.

Зерттеу нәтижелері наномодификацияланған МСС қолдану жылу алмасу қарқындылығын арттырып, кесу құралының тозуын төмендететінін және МСС шығынын оңтайландыру арқылы өңдеу тиімділігін арттыруға мүмкіндік беретінін көрсетті. Сонымен қатар, жылуөткізгіштік пен тұтқырлық көрсеткіштерін оңтайландыру мақсатында МСС құрамы мен нанобөлшектер концентрациясын реттеу қажеттілігі көрсетілген.

Мақала MQL технологиясы жағдайында наномодификацияланған МСС-ны әрі қарай зерттеуге және практикалық қолдануға негіз болып табылады, бұл металдарды өңдеудің энергия тиімді және экологиялық қауіпсіз процестерін дамытуға ықпал етеді және өнеркәсіптік өндірісте кеңінен енгізілуіне мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: майлау-суыту сұйықтық (МСС), минималды мөлшерде майлау (MQL), өсімдік майлары, нано-сұйықтықтар, механикалық өңдеу, құралдың тозуы.

Кіріспе

Металдарды өңдеу технологияларын жетілдіру және энергия үнемдейтін, экологиялық қауіпсіз кесу әдістерін енгізу жағдайында кесу аймағында тиімді жылу шығарудың және үйкелісті төмендетудің рөлі арта түседі. Осыған байланысты металдарды механикалық өңдеуде қолданылатын майлау-суыту сұйықтықтарға (МСС) жоғары талаптар қойылады, ең алдымен олардың жылуфизикалық сипаттамаларына, тұтқырлығына, эксплуатациялық сенімділігіне және энергия тиімділігіне.

Дәстүрлі көлемдік берілетін МСС әрдайым құралдың тозуын азайтып, оптималды салқындату жағдайларын қамтамасыз ете алмайды, әсіресе кесу жылдамдығы жоғары және сұйықтық шығыны минималды болған жағдайда. Сонымен қатар, металдарды қарқынды кесу

локалды қыздыру мен жоғары үйкеліс тудырады, бұл стандартты майлау-салқындату жүйелерінің тиімділігін шектейді.

Осыған байланысты минималды мөлшерде майлау (MQL) технологиясы жағдайында наномодификацияланған МСС қолдану өзекті болып табылады. Бұл технология сұйықтық шығынын айтарлықтай төмендетуге мүмкіндік береді, сонымен бірге жылу шығаруды жақсартады, үйкелісті азайтады және құралдың қызмет мерзімін ұзартады. Жоғары жылуөткізгішті материалдардың нанобөлшектерін МСҚ құрамына енгізу жылуөткізгіштікті арттыруға, тұтқырлықты реттеуге және сұйықтықтың жылуфизикалық қасиеттерін жақсартуға ықпал етеді, бұл кесу процестерінің қарқындылығын арттырудың жаңа мүмкіндіктерін ашады.

Осы шолу мақаласының мақсаты – майлау-суыту сұйықтықтардың және олардың наномодификацияланған нұсқаларының жылуфизикалық қасиеттеріне арналған заманауи ғылыми зерттеулерді талдау және қорытындылау, сондай-ақ MQL технологиясын қолданудың тиімділігін арттыру, үйкелісті азайту және металдарды кесу процесін оңтайландыру перспективаларын бағалау болып табылады.

Зерттеу әдістері

Бұл жұмыс металдарды өңдеу кезінде минималды мөлшерде майлау (MQL) технологиясын қолдана отырып, майлау-суыту сұйықтықтардың (МСС) жылуфизикалық қасиеттерін оңтайландыруға арналған заманауи зерттеулерді талдауға бағытталған. Негізгі назар МСС құрамының, нанобөлшектердің енгізілуінің және беру режимдерінің жылу шығаруға, үйкелісті азайтуға және металдарды кесу тиімділігін арттыруға әсерін зерттеуге аударылады.

Әдебиеттерді іздеу және іріктеу халықаралық ғылыми деректер базалары Scopus және Web of Science арқылы жүргізілді, бұл кесу механикасы, трибология, жылу алмастыру және майлау-суыту жүйелеріндегі нанотехнологиялар бойынша рецензияланған жарияланымдарға қол жеткізуді қамтамасыз етті. Талдау кезеңі 2010 жылдан 2025 жылға дейінгі уақытты қамтиды, бұл MQL технологиялары мен наномодификацияланған МСС қолданудың қазіргі үрдістерін анықтауға мүмкіндік береді.

Шолу мақалаға енгізілген жарияланымдар келесі критерийлерге сәйкес болуы тиіс:

- рецензияланған ғылыми журналдарда жарияланған мақалалар;
- металдарды кесу кезінде МСС жылуфизикалық қасиеттерін тәжірибелік, сандық немесе теориялық зерттеулерге арналған жұмыстар;
- минималды мөлшерде майлау технологиясын қолдану және наномодификацияланған МСС қолдануды зерттейтін зерттеулер;
- жылу шығару, үйкеліс, құралдың тозуы және кесу процесінің тиімділігі бойынша сандық деректерді қамтитын жарияланымдар.

Іріктелген жарияланымдар МСС құрамының, нанобөлшектер концентрациясының, негіз сұйықтықтың және беру режимінің майлау-салқындатқыш сұйықтықтардың жылуфизикалық қасиеттеріне, салқындату тиімділігіне және құрал тозуын азайтуға әсер ету заңдылықтарын анықтау үшін жүйелендірілді. Арнайы назар келесі мәселелерге аударылды:

- дәстүрлі МСС мен наномодификацияланған сұйықтықтарды салыстыру;
- нанобөлшектердің мөлшері мен түрінің МСС жылуөткізгіштік және тұтқырлық қасиеттеріне әсері;
- минималды мөлшерде майлау кезінде берілу режимін оңтайландыру арқылы энергия тиімділігі мен экологиялық қауіпсіздікті арттыру.

Талдау көрсеткендей, MQL жағдайында МСС құрамына нанобөлшектерді қосу жылу шығаруды едәуір арттыруға, үйкелісті және құрал тозуын азайтуға мүмкіндік береді, бұл металдарды кесудің энергия тиімді және экологиялық қауіпсіз технологияларын әрі қарай дамытуға перспективалар ашады.

Зерттеу нәтижелері

Майлау-суыту сұйықтықтары (МСС) механикалық өңдеу процестерінде (бұрғылау, фрезерлеу, токарлық өңдеу, кесу және т.б.) қолданылады және кесу процесінің жағдайын жақсарту мен кескіш құралдың қызмет ету мерзімін арттыру үшін пайдаланылады. МСС-ның негізгі функциясы – өңдеу кезінде бөлінетін жылуды азайту, сондай-ақ екі объект арасындағы үйкелісті едәуір төмендету. Металды кесу барысында МСС жоңқа түзілу аймағына беріледі.

МСС-ның негізгі қасиеттері:

- жоғары тұтану температурасы;
- жабдықтың коррозиясын тудырмайды;

- жұмыс барысында адамға зиянсыз;
- үйкеліс күшін азайтып, энергия тұтынуды төмендететін тиімді майлау қасиеттері;
- жоғары меншікті жылусыйымдылық, жоғары жылуөткізгіштік және қабықша тұзу коэффициентінің жоғары болуы;
- ауада тотығуға және ыдырауға тұрақтылығы.

Нарықта негізінен МСС-ның төрт түрлі түрі қолжетімді:

1. суда еритін майлау-салқындату майлары;
2. таза майлау-салқындату майлары;
3. синтетикалық салқындату сұйықтықтары;
4. қатты майлау материалдары.

МСС-ның барынша тиімділігін қамтамасыз ету үшін жоғары сапалы сұйықтықтарды таңдау ұсынылады. МСС-ны дұрыс таңдау, ең алдымен, өңделетін материалға және қолданылатын құралға, сондай-ақ орындалатын операция түріне және қажетті салқындату әсерінің деңгейіне байланысты. Әдетте, латунь үшін құрғақ өңдеу тиімді, мыс негізіндегі материалдар үшін скипидар ұсынылады, алюминий үшін керосин ең қолайлы МСС болып табылады, ал болат үшін МСС-ның кез келген түрін қолдануға болады. Жылдамкескіш болат, қатты болат немесе қола үшін таза МСС немесе минералды май пайдалану ұсынылады.

Соңғы онжылдықтарда механикалық өңдеу процестерінде салқындату мен майлау үшін МСС қолданудың орындылығы жиі талқылануда [1]. МСС қолдану әдетте құрал шығынын азайтуға, қатаң дәлдік талаптарын сақтауға және дайындаманың беткі қасиеттерін зақымдамай қамтамасыз етуге мүмкіндік береді. МСС қолданудың артықшылықтарына құралдың қызмет ету мерзімін ұзарту, өңдеу уақытын қысқарту және беттің сапасын жақсарту жатады. Алайда, МСС-ның кемшіліктері де бар, оларға сақтау, дайындау, сүзу және қайта өңдеуге кететін жоғары шығындар, сондай-ақ қоршаған ортаның ластануы жатады.

Қоршаған орта мен адам денсаулығына байланысты мәселелерге байланысты механикалық өңдеу кезінде МСС тұтынуын азайтатын баламалы әдістер ұсынылды. Мұндай әдістерге бүрку арқылы беру, құрғақ өңдеу және ішкі салқындату жатады. Дегенмен, тісті дөңгелектерді жасау, протяжкалау және хондау сияқты процестерде МСС қолдану міндетті болып табылады. 1-кестеде МСС-ның әртүрлі қасиеттері келтірілген [1].

Кесте 1 – Әртүрлі негіздегі майлау-суыту сұйықтықтарының қасиеттері [1]

Қасиеттері	Миниралды майлар	Эмульсиялар	Жартылай синтетикалық майлар	Синтетикалық майлар
Сыртқы түрі	Мұнай негізінде	Тұнық емес	Жартылай тұнық	Жартылай тұнық
Майлау	Өте жақсы	Жақсы	Жақсы	Өлсіз
Суыту	Өлсіз	Жақсы	Жақсы	Өте жақсы
Жоңқаны (ұнтақты) шығару	Орташа	Орташа	Орташа	Орташа
Коррозияға қарсы бақылау	Өте жоғары	Өлсіз	Жақсы	Жақсы
Микробиологиялық бақылау	Өте жоғары	Өлсіз	Жақсы	Өте жақсы
Отқа төзімділік	Өртке қауіпті	Қауіпсіз	Қауіпсіз	Қауіпсіз

[1] жұмыста МСС металды кесу кезінде екі негізгі функцияны – суыту мен майлауды орындау үшін кеңінен қолданылатыны атап өтілген. МСС берудің ең кең таралған әдісі – ағынмен немесе толық батыру арқылы суыту, мұнда сұйықтықтың үлкен көлемі кесу аймағына беріледі. МСС-ның шамадан тыс қолданылуы өндіріс шығындарын арттырып қана қоймай, қоршаған орта мен адам денсаулығына елеулі қауіп төндіреді. Осы жұмыста қолданылатын МСС мөлшерін азайту және кесу параметрлері мен сұйықтық беру параметрлерін оңтайландыруға талпыныс жасалды. Зерттеу маймен шынықтырылған шөгусіз аспаптық болатты токарлық өңдеу кезінде Тагучи әдісін қолдана отырып, минималды МСС пайдалану арқылы жүргізілді. Алынған оңтайландырылған нәтижелер бірдей кесу жағдайларында құрғақ жону және дәстүрлі дымқыл жонумен салыстырылды (2-кесте).

Кесте 2 – Өртүрлі әдістер кезіндегі майлау-суыту сұйықтықтары көрсеткіштерінің салыстырмасы [1]

Көрсеткіштері	1 деңгей	2 деңгей	3 деңгей
Кесу жылдамдығы, м/мин	128,64	148,44	168,23
Айналу жиілігі	0,04	0,06	0,08
Кесу тереңдігі, мм	0,5	0,75	1,0
Инжектордағы қысым, Бар	50	75	100
Пульсация жиілігі, соққы/мин	500	700	900
МСС беру жылдамдығы, мл/мин	3	6	9
МСС мөлшері	10	20	30

Майлау-суыту сұйықтықтар (МСС) металдарды кесу технологиялық процестерінің ажырамас бөлігі болып табылады. Олар кесу күштерін төмендетуді, кескіш құралдың тозуын азайтуды, өңдеу аймағынан жылуды тиімді әкетуді және өңделетін беттің сапасын арттыруды қамтамасыз етеді. МСС тиімділігі негізінен олардың жылуфизикалық қасиеттерімен, атап айтқанда жылуөткізгіштік, жылуsыйымдылық, тұтқырлық, суланғыштық және термиялық тұрақтылық көрсеткіштерімен анықталады.

Металдарды кесу процестерінде минималды мөлшерде майлау (Minimum Quantity Lubrication, MQL) технологиясы 1990-жылдардың соңынан бастап экологиялық талаптардың қатаңдауы және машина жасау өндірісінде энергия тиімділігін арттыру қажеттілігіне байланысты кеңінен қолданыла бастады. Бұл әдісте кесу аймағына дәстүрлі суыту тәсілдерімен салыстырғанда көлемі едәуір аз (шамамен 10-100 мл/сағ) майлау-суыту сұйықтық (МСС) аэрозоль түрінде беріледі. Нәтижесінде МСС шығыны айтарлықтай азайып, өндірістік экологиялық жүктеме төмендейді және еңбек қауіпсіздігі артады. Сонымен қатар, кескіш құрал мен дайындама арасындағы жанасу аймағындағы жылуалмасу мен үйкеліс жағдайлары өзгереді.

Алайда MQL жағдайында сұйықтық көлемінің аз болуы базалық майлардың салыстырмалы түрде төмен жылуөткізгіштігі мен жылуsыйымдылығы салдарынан кесу аймағында жергілікті қызып кетуге, құралдың жедел тозуына және өңделген беттің сапасының төмендеуіне әкелуі мүмкін. Осыған байланысты МСС-ның жылуфизикалық қасиеттерін жақсарту MQL технологиясының тиімділігін арттырудың маңызды бағыты болып табылады.

Перспективалы шешімдердің бірі – наномодификацияланған МСС қолдану. 1995 жылдан бастап заманауи технологияларда қолданылып келе жатқан наносұйықтықтар базалық майлардың құрамына жылуөткізгіштігі жоғары нанобөлшектерді енгізу арқылы олардың жылуөткізгіштік қасиеттерін арттыруға мүмкіндік береді. Наноқоспалар ретінде көбінесе металл оксидтері (Al_2O_3 , CuO), молибден дисульфиді (MoS_2), графен және көміртекті нанотүтікшелер пайдаланылады. Нанобөлшектердің оңтайлы концентрациясын таңдау жылуөткізгіштік пен тұтқырлық көрсеткіштері арасындағы оңтайлы арақатынасты қамтамасыз етіп, аэрозольдің тұрақты шашырауын сақтауға және кесу аймағында тиімді жылуалмасуды жүзеге асыруға мүмкіндік береді.

MQL жағдайында МСС-ның жылуфизикалық қасиеттерін оңтайландыру базалық сұйықтықтың оңтайлы құрамын, нанобөлшектердің түрі мен концентрациясын дұрыс таңдауды, сондай-ақ олардың тұрақты дисперсиясын қамтамасыз етуді қамтиды. Бұл ретте тұтқырлық пен наносұйықтықтың тұрақтылығын бақылау ерекше маңызға ие, себебі тұтқырлықтың шамадан тыс артуы аэрозольдің шашырауын нашарлатып, МСС-ды кесу аймағына жеткізудің тиімділігін төмендетуі мүмкін.

Осылайша, минималды мөлшерде майлау технологиясында наномодификацияланған майлау-суыту сұйықтықтарды қолдану жылуалмасуды қарқындатудың және құралдың тозуға төзімділігін арттырудың тиімді тәсілі болып табылады, сонымен қатар экологиялық және экономикалық шығындарды азайтуға мүмкіндік береді. Бұл саладағы одан әрі зерттеулер өртүрлі кесу режимдерінде нанобөлшектердің түрі мен концентрациясының МСС-ның жылуфизикалық және трибологиялық сипаттамаларына әсер ету заңдылықтарын анықтауға бағытталады.

[1] мақалада дәстүрлі механикалық өңдеу процестерінде МСС қолданудың соңғы жетістіктері мен қолдану салалары қарастырылады. Дәстүрлі және озық салқындату әдістерін шолуымен қатар, мақалада минималды майлау мөлшерін (MQL) қолдану да талқыланады,

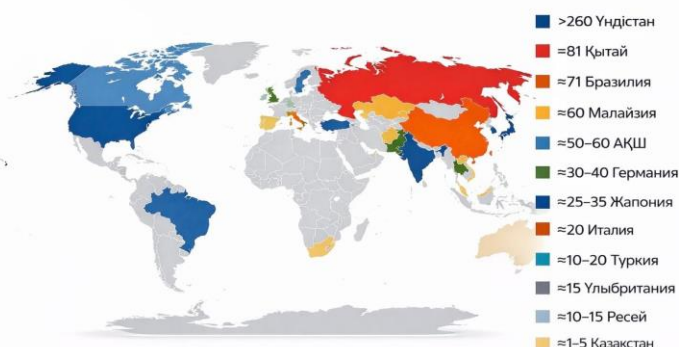
әсіресе болат, алюминий, легирленген және титан қорытпалары сияқты металдар үшін қарастырылған.

Дәстүрлі МСС токсикалық болуына байланысты экологиялық мәселелер туындайды, сондықтан экологиялық қауіпсіз МСС-қа сұраныс артып келеді. Осы себептен, биоыдыралу мен тұрақтылықтың маңызды аспектілеріне сай, табиғи өсімдік майы әлеуетті экологиялық таза МСС ретінде таңдалды. Сонымен қатар мақалада өсімдік майы негізіндегі МСС-ны MQL технологиясында қолдану да қарастырылады. 1 суретте майлау-суыту сұйықтықтарының әртүрлі түрлері көрсетілген.



Сурет 1 – Майлау-суыту сұйықтықтарының (МСС) әртүрлі түрлері

2-суретте [2] көрсетілген зерттеу деректері негізінде дәстүрлі мол суыту әдісі және минималды мөлшерде майлау технологиясы жағдайында қолданылатын майлау-суыту сұйықтықтарының (МСС) жылуфизикалық сипаттамаларының айырмашылықтары егжей-тегжейлі бейнеленген. Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, MQL технологиясын қолданған кезде базалық майлардан дайындалған және су мен май қоспасынан тұратын МСС-пен салыстырғанда, сұйықтықтардың жылуды әкету қабілеті айтарлықтай төмен болады. Бұл жағдай кесу аймағында температураның айтарлықтай көтерілуіне әкеліп, құрал мен өңделіп жатқан материалдың жұмыс режиміне әсер етуі мүмкін.



Сурет 2 – Өлемдік MQL және МСС зерттеулері бойынша елдер бойынша салыстырмалы географиялық талдау картасы

Сонымен қатар, MQL технологиясын қолданудың бірқатар артықшылықтары бар. Біріншіден, сұйықтық шығынын едәуір азайтуға мүмкіндік береді. Дәстүрлі мол суыту әдісінде металл кесу процесінде үлкен көлемде МСС пайдаланылады, бұл өндірістік шығындарды арттырады және қоршаған ортаға қосымша жүктеме түсіреді. Ал MQL әдісі өте аз мөлшерде сұйықтықты (миллилитр/минут деңгейінде) қолдана отырып, құрал мен өңделетін материалды жеткілікті түрде майлау және суыту мүмкіндігін береді. Бұл технология экологиялық тұрғыдан

тиімді болып, өндірістік ортадағы химиялық және су ресурстарын тұтынуды азайтуға септігін тигізеді.

Сонымен қатар, MQL технологиясы құралдың қызмет ету мерзімін ұзартып, өндірістік процестің тиімділігін арттыруға ықпал етеді. Бұл әсіресе жоғары жылдамдықтағы кесу операцияларында маңызды, себебі температураның көтерілуі кесу жиілігі мен тереңдігіне тікелей байланысты. MQL жағдайында жылуды жеткілікті мөлшерде тарату шектеулі болғанымен, аз мөлшердегі сұйықтықты дәл бағыттау және кесу аймағына тұрақты жеткізу арқасында процесстің сапасы төмендемейді.

Осылайша, [2-4] салыстырмалы деректерде MQL және дәстүрлі мол суыту әдістерінің жылуфизикалық сипаттамаларындағы айырмашылықтарды айқын көрсетеді. MQL технологиясының негізгі артықшылығы – қоршаған ортаға түсетін экологиялық жүктемені азайтып, сұйықтық шығынын төмендету, ал дәстүрлі мол суыту әдісінің негізгі артықшылығы – кесу аймағындағы жылуды тиімді тарату арқылы материал мен құралдың тозуын төмендету болып табылады. Осы факторлар өндірістік процесті оңтайландыру және өндіріс тиімділігін арттыру тұрғысынан маңызды.

Бірқатар зерттеушілер [1-3] MQL жағдайында MCC тиімділігі негізінен олардың жылуфизикалық және трибологиялық қасиеттерімен анықталатынын атап көрсетеді. Атап айтқанда, авторлар MQL үшін оңтайландырылған MCC-ның келесі артықшылықтарын бөліп көрсетеді:

- кесу аймағында тұрақты майлау қабықшасының түзілуі нәтижесінде үйкеліс коэффициентінің төмендеуі;
- кескіш қырдың температурасының төмендеуі және құралдың термиялық тозуының баяулауы;
- өңделген беттің сапасының жақсаруы және кедір-бұдырлықтың төмендеуі;
- кесу процесіне жұмсалатын энергетикалық шығындардың қысқаруы [1-3].

MQL технологиясы кезінде MCC тиімділігін арттырудың перспективалы бағыттарының бірі – наномодификацияланған сұйықтықтарды қолдану болып табылады. Базалық майлардың құрамына жылуөткізгіштігі жоғары қатты нанобөлшектерді енгізу минималды сұйықтық шығынына тән жылу әкетудің жеткіліксіздігін өтеуге мүмкіндік береді. Наноқоспалар ретінде көбінесе металл оксидтері (Al_2O_3 , CuO), молибден дисульфиді (MoS_2), графен және көміртекті нанотүтікшелер қолданылады [4].

Наномодификацияланған MCC-ның тұтқырлығы базалық майлармен салыстырғанда артатынына қарамастан, бірқатар авторлар кесу процесіндегі жиынтық энергетикалық шығындардың жылуалмасудың қарқындануы және трибологиялық сипаттамалардың жақсаруы есебінен төмендейтінін атап өтеді. Бұл ретте нанобөлшектердің жылуөткізгіштікті арттыруы мен аэрозольдің тұрақты шашырауын сақтау арасындағы оңтайлы тепе-теңдікті қамтамасыз ететін концентрациясын таңдау шешуші фактор болып табылады.

Осылайша, минималды мөлшерде майлау технологиясын қолдана отырып металдарды кесу кезінде майлау-суыту сұйықтықтардың жылуфизикалық қасиеттерін оңтайландыру құралдың төзімділігін арттыруға, өңдеу сапасын жақсартуға және экологиялық жүктемені төмендетуге бағытталған перспективалы зерттеу бағыты болып табылады. Бұл саладағы одан әрі зерттеулер әртүрлі кесу режимдерінде нанобөлшектердің түрі, өлшемдері мен концентрациясының MCC-ның жылуалмасу және трибологиялық сипаттамаларына әсер ету заңдылықтарын анықтауға бағдарланған.

Қорыта айтқанда, металдарды кесу процесінде MQL технологиясы үшін наномодификацияланған MCC қолдану құралдың төзімділігін арттыруға, өңдеу сапасын жақсартуға және экологиялық жүктемені төмендетуге бағытталған перспективалы тәсіл болып табылады. Болашақ зерттеулер нанобөлшектердің түрі, өлшемдері мен концентрациясының жылуалмасу және трибологиялық қасиеттерге әсерін нақтылау мақсатында жүргізілуі қажет. 3-кестеде өсімдік майларының және наномодификацияланған өсімдік майларының қасиеттері көрсетілген.

Соңғы жылдары металдарды өңдеу процесінде минималды майлау технологиясы (MQL) белсенді түрде қолданыла бастады. Бұл технологияда майлау-суыту сұйықтықтың негізгі функциялары – құрал мен заготовка арасындағы үйкелісті азайту, кесу аймағында жылу алмасуды қамтамасыз ету және өңделген бетті қорғау. Дәстүрлі майлау-суыту сұйықтықтың қарағанда, MQL жүйесінде сұйықтық көлемі өте аз қолданылады, бұл жылуөткізгіштікке ерекше талап қояды.

Кесте 3 – Өсімдік майларының және наномодификацияланған өсімдік майларының қасиеттері.

Қасиеттер / Тип МСС	Таза өсімдік майлары	Өсімдік майлары + нанобөлшектер / ЕР қоспалар
Молекулалық құрам	Қанықпаған май қышқылдары жоғары концентрацияда, жоғары полярлық [8, 10, 18, 19]	Сол + нанобөлшектер (Al_2O_3 , MoS_2 , графен) немесе ЕР қоспалар [7, 9, 11-13, 15, 17, 20]
Майлау қабілеті	Жақсы, құрал тозуын 10-52% төмендетеді [8, 27-30, 32, 34]	Өте жақсы, құрал тозуын 34-56% төмендетеді [7, 9, 13, 29-31, 34]
Үйкеліс коэффициенті	Төмен [8, 10]	Төмен, тұрақты, қорғаныш қабықшалар түзіледі [7, 9, 13, 29, 30]
Қыздыру / кесу температурасы	Орташа төмендейді [8, 10, 18, 19]	Айтарлықтай төмендейді, жылуөткізгіштік жақсартылған [6, 9, 12, 13, 15, 17, 20]
Бет сапасы	Орташа / жоғары деңгейде жақсарады [8, 10]	Айтарлықтай жақсарады, микрозадирыл азаяды [7, 9, 13, 29, 34]
Тотығуға төзімділік	Төмен, шектеулі [6, 14, 10]	Артады, нанобөлшектер мен антиоксиданттар арқасында [6, 11, 14]
Қоршаған ортаға қауіпсіздік	Жоғары, биологиялық ыдырайды [8, 10, 18, 19]	Жоғары, аз уытты, экологиялық таза [7, 9, 13, 29, 34]
Шектеулері	Тотығу тұрақтылығы төмен, қарсы тозу қасиеті шектеулі [6, 14, 10]	Нанобөлшектер концентрациясын дұрыс таңдауды қажет етеді, тұтқырлық сәл жоғарылайды [7, 12, 13, 29, 30]
Эксплуатациялық тиімділік	Құрғақ өңдеумен салыстырғанда тозуды айтарлықтай төмендетеді; минералды майдан кейде тиімдірек [25, 8, 28-30, 32, 16, 34]	Құрғақ немесе дәстүрлі режимдермен салыстырғанда ең жоғары тиімділік; құрал қызмет мерзімі ұзартылады [7, 9, 13, 29, 34]
Артықшылықтары	Құрал тозуын азайтады, өңделген бет сапасын жақсартады, экологиялық таза [8, 10, 18, 19]	Құрал тозуын барынша азайтады, кесу температурасын төмендетеді, бет сапасы айтарлықтай жақсарады, тұрақты қорғаныш қабықшалар түзіледі, экологиялық таза [7, 9, 13, 29-31, 33, 34]

Зерттеулер көрсеткендей, MQL жүйесінде базалық майлар немесе су-этиленгликоль/пропиленгликоль негізіндегі майлау-суыту сұйықтықтар жылуды жеткілікті деңгейде әкету қабілетіне ие болмайды. Сондықтан, нанокұрылымдық қоспаларды (мысалы, Al_2O_3 , CuO , графен, көп қабатты көміртекті нанотүтікшелер – MWCNT) енгізу арқылы сұйықтықтардың жылуфизикалық қасиеттерін жақсарту тиімді әдіс болып табылады. Нанобөлшектердің қосылуы:

- жылуөткізгіштікті арттырады: кейбір зерттеулерде ол 160%-ға дейін өскені байқалған;
- үйкелісті төмендетеді: тұрақты май қабықшасының түзілуі құрал тозуын азайтады;
- температураны төмендетеді: кесу аймағындағы жылу концентрациясын азайтып, құралдың термиялық тозуын тежейді.

Наносұйықтықтардың тиімділігі көбінесе нанобөлшектердің концентрациясы, өлшемі, пішіні, сондай-ақ сұйықтықтың температурасы мен ағыс режиміне байланысты. Зерттеулер көрсеткендей, кішірек нанобөлшектер тұтқырлықты арттырады, ал үлкенірек бөлшектер жылуөткізгіштікті күшейтеді. Ламинарлық немесе турбуленттік ағыс режимдері коэффициент жылуберуге елеулі әсер етеді.

MQL технологиясында майлау-суыту сұйықтықтары жылуфизикалық қасиеттерін оңтайландыру үшін келесі әдістер қолданылады:

1. Базалық сұйықтықты таңдау: өсімдік майлары немесе гликоль негізіндегі сұйықтықтар экологиялық таза, биологиялық ыдырайтын және құралдың майлау қабілетін қамтамасыз етеді.

2. Нанобөлшектерді енгізу: Al_2O_3 , CuO , MoS_2 , графен, MWCNT сияқты материалдар жылуөткізгіштікті арттырып, үйкелісті азайтады.

3. Қоспалар мен аддитивтерді қолдану: қарсы тозу (ЕР) және антиоксидант қоспалар майдың термиялық тұрақтылығын және трибологиялық қасиеттерін жақсартады.

4. Концентрацияны бақылау: нанобөлшектердің оптималды мөлшері (әдетте 0,2-1 wt.%) ағыстың тұтқырлығын және тиімділігін сақтап, аэрозольды жеткілікті шашырауды қамтамасыз етеді.

Зерттеулер [1-21] көрсеткендей, наномодификацияланған майлау-суыту сұйықтықтары MQL жүйесінде дәстүрлі майлауға қарағанда:

- құрал тозуын 34-56% төмендетеді,
- өңделген бет сапасын жақсартады,
- кесу температурасын төмендетеді,
- энергия шығынын азайтады.

Осылайша, MQL технологиясында металдарды өңдеуге арналған MCC жылуфизикалық қасиеттерін оңтайландыру – құрал ресурсын арттыру, өңделген беттің сапасын жақсарту және экологиялық әсерді азайтуға бағытталған перспективалы бағыт болып табылады. Алдағы зерттеулерде нанобөлшектердің түрі, мөлшері, концентрациясы және базалық сұйықтықтың табиғатының кесу процесіне әсерін жүйелі зерттеу қажет. Төмендегі 4 кестеде майлау-суыту сұйықтары негізіндегі өсімдік майы және наномодификацияланған майлардың зерттеу әдістері мен нәтижелерін салыстыру көрсеткіштері көрсетілген.

Кесте 4 – Майлау-суыту сұйықтары негізіндегі өсімдік майы және наномодификацияланған майлардың зерттеу әдістері мен нәтижелерін салыстыру

№	Зерттелген MCC	Зерттеу әдістері	Негізгі көрсеткіштер	Нәтижелері	Әдебиет
1	Таза өсімдік майлары	Оптикалық микроскопия, SEM, EDS; лазерлік профилометр, 3D-оптикалық микроскопия; pin-on-disk, шар-диск триботестер; CNC станоктарда MQL және дәстүрлі салқындату; пьезоэлектрлік динамометр	Құрал тозуы, бет сапасы, температура, тұтқырлық, тығыздық, қышқылдық саны	Құрал тозуы құрғақ өңдеуге қарағанда 10-52% төмен, бет сапасы жақсарған, температура төмендеген	[8, 25, 28-30, 32, 34, 16]
2	Өсімдік майлары + EP қоспалар	Оптикалық микроскопия, SEM, EDS; pin-on-disk, төртшарикті үйкеліс машинасы; CNC станоктарда MQL; профильметрия; вискозиметрия, спектроскопия	Құрал тозуы, үйкеліс коэффициенті, тозу тереңдігі, бет сапасы, физика-химиялық қасиеттер	Құрал тозуы құрғақ өңдеуге қарағанда 34% төмен, минералды майлармен салыстырмалы немесе одан жақсы нәтижелер, қорғаныш трибоқабықша түзілуі	[31, 16]
3	Өсімдік майлары + нанобөлшектер (Al ₂ O ₃ , CuO, графен, MWCNT)	Механикалық араластыру + ультрадыбыстық диспергация; тұтқырлық, тығыздық, жылуөткізгіштік, реология, тұрақтылық; CNC станоктарда MQL және дәстүрлі салқындату; кесу күші, температура, құрал тозуы, бет кедір-бұдырлығы өлшенген	Құрал тозуы, бет сапасы, температура, тұтқырлық, жылуөткізгіштік, суспензия тұрақтылығы	Құрал тозуы 56%-ға дейін төмендеді, бет сапасы жақсарды, температура азайды, 0,8 wt.% графен ең тиімді; тұрақты қорғаныш қабықша түзілді	[19, 20, 22, 35-42],
4	Таза өсімдік майлары MQL	MQL жүйесі; кесу күші (Kistler динамометрі), температура (ИК-камера), құрал тозуы, бет сапасы	Тұтқырлық, жылуөткізгіштік, суланғыштық	Тұтқырлық жоғары температурада азаяды, суланғыштық жеткілікті, құрал тозуы азайған	[18, 22, 35-45]

Қазіргі зерттеулер көрсеткендей, наномодификацияланған майлау-суыту сұйықтарын (МСС) қолдану металдарды өңдеу процестерінің тиімділігін минималды сұйықтық мөлшерін қолдану (MQL) кезінде айтарлықтай арттыруға мүмкіндік береді. Нанобөлшектерді (Al_2O_3 , CuO , TiO_2 , SiO_2 , ZnO) базалық сұйықтыққа енгізу жылуөткізгіштікті арттырады, бұл кесу аймағындағы жылуды тиімді шығарып, құрал мен өңделетін детальдің жергілікті қызып кетуін төмендетуге септігін тигізеді. Сонымен қатар, оксидті нанобөлшектер жылуөткізгіштікті ұстап тұратын және тұрақты түрде арттыратын қасиетке ие, сондықтан олар MQL жүйелері үшін оңтайлы таңдау болып табылады [2, 16, 19].

Наносұйықтықтардың динамикалық тұтқырлығы – сұйықтық ағынының гидродинамикасы мен МСС-ның айналымына жұмсалатын энергияны анықтайтын негізгі параметр. О.Я. Хлиева және әріптестерінің зерттеулері көрсеткендей, тұтқырлық нанобөлшектер концентрациясы артқан сайын өседі және бөлшектердің пішіні, өлшемі, сондай-ақ нанофлюид құрамындағы беттік активті заттарға (БАЗ) байланысты болады [5]. Пропиленгликоль негізіндегі жүйелер әдетте этиленгликольмен салыстырғанда жоғары тұтқырлыққа ие, сондықтан MQL-де тиімді жеткізу үшін нанобөлшектердің концентрациясын оңтайландыру қажет.

Сұйықтықтың тығыздығы мен белгілі жылу сыйымдылығы МСС-ның жылу жинау қабілетіне және жылу жүктемесін есептеуге әсер етеді. Зерттеулер көрсеткендей, наносұйықтықтардың тығыздығы нанобөлшектер концентрациясы артқан сайын өседі, ал температураның жоғарылауымен азаяды; ал белгілі жылу сыйымдылығы салыстырмалы түрде тұрақты болып қалады [16-20]. Бұл әртүрлі өңдеу режимдерінде кесу аймағындағы жылулық балансын дұрыс бағалауға мүмкіндік береді.

Осылайша, MQL үшін МСС-ның жылуфизикалық қасиеттерін оңтайландыру кешенді тәсілді талап етеді, оның ішінде:

1. Жылуөткізгіштік пен майлау қабатының тұрақтылығын арттыру үшін нанобөлшектердің түрі мен концентрациясын таңдау.
2. Тұтқырлықты және ағыстың гидродинамикасын бақылау арқылы минималды сұйықтық мөлшерінде сұйықтықты біркелкі тарату.
3. Жылуфизикалық параметрлерді (тығыздық, жылу сыйымдылығы) ескере отырып, кесу аймағындағы жылу режимін дәл есептеу.

MQL технологияларында наномодификацияланған МСС-ды қолдану кесу температурасын төмендетуге, құрал тозуын азайтуға, деталь бетінің сапасын жақсартуға және энергия шығынын азайтуға мүмкіндік береді, бұл әсіресе жоғары жылдамдықтағы металдарды өңдеуде маңызды болып табылады.

Наножүйелерді металдарды өңдеу кезінде майлау-суыту сұйықтықтарының (МСС) жылуфизикалық қасиеттерін оңтайландыруда қолдану ерекше қызығушылық тудырады. Минималды мөлшерде майлауды қолдану технологиясы (Minimum Quantity Lubrication, MQL) наножүйелермен біріктірілгенде, кесу аймағында жылуды тиімді алып кетуге және үйкелісті азайтуға мүмкіндік береді. МСС құрамына нанобөлшектерді қосу сұйықтықтың жылуөткізгіштігін және жылу сыйымдылығын арттырады, майлау қабатын тұрақтандырады және кескіш құралдардың тозуын азайтады.

Сондықтан, нанотехнологияларды MQL технологиясына интеграциялау металдарды өңдеу өнімділігін және сапасын арттыруға, сонымен қатар дәстүрлі майлау-салқындату сұйықтықтарын аз пайдалану арқылы энергия шығынын және экологиялық жүктемені төмендетуге жаңа мүмкіндіктер ашады.

Қазіргі зерттеулер көрсеткендей, наномодификацияланған майлау-суыту сұйықтарын (МСС) қолдану металдарды өңдеуде минималды сұйықтық мөлшерін пайдалану (MQL) технологиясының тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді. Нанобөлшектерді (мысалы, Al_2O_3 , CuO , TiO_2 , SiO_2 , ZnO) базалық сұйықтыққа енгізу жылуөткізгіштікті арттырып, кесу аймағындағы жылуды тиімді шығару арқылы құрал мен детальдің жергілікті қызып кетуін азайтады.

5-кестеде әлемдік деңгейде жүргізілген MQL және МСС бойынша ғылыми зерттеулердің негізгі бағыттары елдер мен аймақтар кескінінде салыстырмалы түрде көрсетілген. Кесте деректері әр мемлекеттің зерттеу басымдықтарын, технологиялық даму деңгейін және өндірістік қолдану ерекшеліктерін айқындайды.

Кесте 5 – Әлемдік MQL және MCC зерттеулері бойынша елдердің негізгі ғылыми бағыттарына арналған салыстырмалы талдау.

№	Ел / Аймақ	Негізгі ғылыми бағыттар
1	Үндістан	MQL, MCC жылу-физикалық қасиеттері, нанөсімдіктер, параметрлерді оңтайландыру
2	Қытай	MQL, Cryo-MQL, биоқайта өңделетін сұйықтықтар, тұрақты өндіріс
3	Бразилия	MQL оңтайландыру, трибология, құралға әсері
4	Малайзия	MQL, жылу-физикалық сипаттамалар, тұрақты өндіріс
5	АҚШ	MQL, кесу процестерін оңтайландыру, трибология
6	Германия	Жоғары дәйектілік, өнеркәсіптік MQL қолдану
7	Жапония	MQL, жылу алмасу, трибология
8	Италия	Тұрақты өндіріс, биоқайта өңделетін MCC
9	Түркия	MQL, Cryo-MQL элементтері, кесу процесінің жылу-механикалық талдауы, тұрақты және экологиялық өңдеу технологиялары
10	Ұлыбритания	MQL, MCC жылуфизикасы
11	Ресей	MQL, MCC, кесу жылуфизикасы, өнеркәсіптік зерттеулер
12	Қазақстан	Жергілікті MQL және MCC жылуфизикасы зерттеулері, университет жобалары

Үндістанда жүргізілетін зерттеулер негізінен MQL технологиясын қолдану, майлау-салқындату сұйықтықтарының жылуфизикалық қасиеттерін анықтау, наноқоспаларды пайдалану және кесу процесінің параметрлерін оңтайландыруға бағытталған. Қытайда MQL және Cryo-MQL технологиялары кеңінен зерттеліп, биоқайта өңделетін сұйықтықтарды қолдану мен тұрақты өндіріс қағидаларына басымдық беріледі.

Бразилия ғалымдары MQL оңтайландыру, трибологиялық сипаттамаларды зерттеу және кесу құралдарына әсерін бағалау мәселелеріне назар аударады. Малайзияда MQL технологиясының жылуфизикалық сипаттамалары мен тұрақты өндіріс аспектілері белсенді түрде зерттелуде. АҚШ-тағы зерттеулер MQL негізіндегі кесу процестерін оңтайландыру және трибология саласына шоғырланған.

Германияда жоғары дәйектілік пен өндірістік ортада MQL технологиясын енгізу мәселелері жетекші орын алады, бұл елдің өнеркәсіптік бағыттылығын көрсетеді. Жапониядағы зерттеулер MQL, жылу алмасу процестері және трибологияны кешенді түрде қарастырумен ерекшеленеді. Италияда тұрақты өндіріс тұжырымдамасы аясында биоқайта өңделетін майлау-суыту сұйықтықтарын қолдану бағытында жұмыстар жүргізілуде.

Түркиядағы MQL және MCC зерттеулері негізінен кесу процесінің жылу-механикалық сипаттамаларын, экологиялық таза өндіріс технологияларын және Cryo-MQL элементтерін зерттеуге бағытталған. Бұл елдің ғылыми бағыты Италия мен Ресей зерттеулерімен мазмұндас болып, тұрақты өндіріс пен инженерлік қолданбаларға басымдық береді.

Ұлыбританияда MQL және MCC-ның жылуфизикалық қасиеттерін зерттеу басым болса, Ресейде MQL, MCC, кесу аймағындағы жылуфизикалық процестер және өнеркәсіптік қолданбалы зерттеулер кеңінен дамыған. Қазақстанда бұл бағыттағы зерттеулер негізінен жергілікті жағдайларға бейімделген MQL және MCC жылуфизикасын зерделеуге, сондай-ақ университеттер базасындағы ғылыми жобаларды іске асыруға бағытталған.

Осылайша, кестеде көрсетілген деректер әр елдің ғылыми-зерттеу бағыты мен өндірістік қажеттіліктеріне сәйкес MQL және MCC технологияларын дамытуда өзіндік ерекшеліктерге ие екенін көрсетеді.

Сонымен қатар, әлемдік MQL және MCC зерттеулері бойынша елдер кескінінде салыстырмалы географиялық талдау жүргізілді (2-сурет). Аталған талдау ғылыми жарияланымдардың мемлекеттер арасында таралуын және зерттеу белсенділігінің аумақтық ерекшеліктерін анықтауға мүмкіндік береді. Нәтижелерге сәйкес, Үндістан, Қытай және Бразилия MQL және MCC саласындағы зерттеулер бойынша негізгі көшбасшы елдер болып табылады.

Ал Қазақстанда бұл бағыттағы жарияланымдар саны шамамен 1-5 жұмыс көлемінде, бұл елде тақырыпқа деген ғылыми қызығушылықтың қалыптасу кезеңінде екенін және өңірлік деңгейде зерттеулер жүргізіліп жатқанын көрсетеді. Аталған деректер Қазақстанда MQL және MCC технологияларын дамыту үшін ғылыми әлеуеттің бар екенін және болашақта зерттеу белсенділігін арттыру қажеттігін айқындайды.

Айта кету керек, кесте ғылыми деректер базаларын (Scopus, Web of Science, Google Scholar және т.б.) талдаудың нәтижесінде алынған библиометриялық деректерге негізделген. Осы мақаланың әдебиеттер тізіміне талдау, әдістемелік негіздеу және нәтижелерді талқылау үшін тікелей пайдаланылатын ең маңызды жарияланымдар енгізілген. Кесте ғылыми белсенділіктің жалпы талдау құралы ретінде қызмет етеді және наножүйелер саласында дамудың перспективалары бар жетекші елдер мен аймақтарды анықтауға мүмкіндік береді, сонымен қатар негізгі зерттеу бағыттары мен инновацияларды көрсетуге көмектеседі.

Ғылыми нәтижелерді талқылау

Қазіргі заманғы металдарды өңдеу технологиялары кескіш қабаттағы жылуды тиімді шығару мен үйкелісті азайтуды талап етеді. Дәстүрлі майлау-суыту сұйықтықтары (МСС) салқындату мен майлауды қамтамасыз етеді, алайда олардың тиімділігі жиі жоғары тұтқырлық, токсиктік немесе жеткіліксіз жылу өткізгіштікпен шектеледі. Минималды мөлшерде майлау технологиясын (MQL) қолдану МСС шығынын едәуір азайтуға мүмкіндік береді, сонымен бірге жылу шығару мен үйкелісті тиімділігін сақтайды немесе арттырады, бұл әсіресе жоғары жылдамдықтағы және дәлдікпен өңдеуде маңызды.

Өртүрлі МСС-тардың жылуфизикалық қасиеттерін талдау көрсеткендей, сұйықтықтарды нанобөлшектермен (мысалы, Al_2O_3 , TiO_2 , SiO_2 , ZnO , графен т.б.) модификациялау жылу өткізгіштігін және жылу алмасу қарқынын арттыруға мүмкіндік береді.

2010-2025 жылдар аралығында MQL және наносұйықтықтар бойынша жарияланымдардың библиометриялық талдауы ең белсенді зерттеулер Үндістан, Қытай және Бразилияда жүргізілгенін көрсетеді, ал Қазақстандағы зерттеулер саны салыстырмалы түрде аз, бұл жергілікті ғылыми жобаларды дамыту әлеуетін көрсетеді.

Жалпы, наномодификацияланған МСС-тарды MQL технологиясымен біріктіру арқылы:

1. Жылуды тиімді шығару және құрал мен детальдың температуралық жүктемесін азайтуға болады.

2. МСС шығынын азайту арқылы экологиялық және экономикалық шығындарды төмендетуге болады.

3. Нанобөлшектердің түрі мен концентрациясын таңдау арқылы жұмыс сұйықтықтарының тұтқырлығын және жылу өткізгіштігін оңтайландыруға болады.

Осылайша, наномодификацияланған МСС негізіндегі оңтайландырылған наносұйықтықтарды MQL процестерінде қолдану перспективалы болып табылады, бұл жылу өткізгіштікті арттыру мен тұтқырлықты өсіру арасындағы баланс, өнеркәсіптік қауіпсіздік және тұрақты өндіріс талаптарын ескереді.

Қорытынды

Қазіргі зерттеулерді талдау көрсеткендей, наномодификацияланған майлау-суыту сұйықтықтарын (МСС) минималды мөлшерде майлау (MQL) технологиясымен біріктіру металдарды өңдеудің тиімділігін арттырудың перспективалы бағыты болып табылады. Металдар, метал оксидтері және көміртекті наноқұрылымдар қосылған наносұйықтықтар МСС -тың жылу өткізгіштігін және жылу алмасу қарқынын едәуір арттыруға мүмкіндік береді, бұл құрал мен заготовканың жергілікті қызып кетуін төмендетіп, үйкелісті азайтып, кескіш құралдың қызмет мерзімін ұзартуға ықпал етеді.

Наноқоспалардың тиімділігі базалық сұйықтық түріне, нанобөлшектердің концентрациясына, өлшемі мен пішініне, сондай-ақ кесу аймағындағы температура мен ағын режиміне тәуелді. MQL технологиясы МСС-ты өте аз мөлшерде қолдануға мүмкіндік береді, бұл экологиялық және экономикалық шығындарды азайтып, жылу шығару мен майлау тиімділігін сақтайды немесе арттырады.

Географиялық талдау көрсеткендей, наномодификацияланған МСС және MQL саласындағы ең белсенді зерттеулер зерттеулер Үндістан, Қытай және Бразилияда жүргізілген, ал Қазақстанда жеткілікті түрде пайдаланылмаған, бұл жергілікті ғылыми зерттеулер мен өндірістік енгізулер үшін қосымша мүмкіндіктер ашады.

Осылайша, наномодификацияланған МСС-тарды MQL технологиясымен біріктіру жұмыс сұйықтықтарының жылу өткізгіштігі мен гидродинамикалық қасиеттерін оңтайландыруға, МСС шығынын азайтуға, өңдеу өнімділігін арттыруға және құрал ресурсын ұзартуға мүмкіндік береді, бұл әсіресе суық климат жағдайында өндірісте қолдануға перспективалы шешім болып табылады.

Әдебиеттер тізімі

1. Бабаев Э.Р. Смазочно-охлаждающие жидкости: свойства и методы применения / Э.Р. Бабаев // Башкирский химический журнал. – 2022. – № 29(3). – P. 11-19.
2. Experimental evaluation of cooling lubrication performance of nanofluid minimum quantity lubrication in turning / Y.Z hang et al // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2012. – Vol. 62. – P. 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.04.007>.
3. A comprehensive study on minimum quantity lubrication / S. Kumar et al // Materials Today: Proceedings. – 2022. – T. 56. – P. 3078-3085. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.158>.
4. Dhar N.R. Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on tool wear, surface roughness and dimensional deviation in turning AISI-4340 steel / N.R. Dhar, M. Kamruzzaman, M. Ahmed // Journal of Materials Processing Technology. – 2006. – Vol. 172, № 2. – P. 299-304. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.09.022>.
5. Экспериментальное исследование конвективного коэффициента теплоотдачи хладоносителя с добавками наночастиц Al_2O_3 / International Conference “Energy of Moldova – 2016 / О.Я. Хлиева и др. // «Regional aspects of development» 29 September – 01 October, 2016 – Chisinau, Republic of Moldova Экспериментальное исследование конвективного коэффициента теплоотдачи хладоносителя с добавками наночастиц Al_2O_3 .
6. Vegetable Oil Based Nanolubricants in Machining: From Physicochemical Properties to Application / X. Zhang et al // Chinese Journal of Mechanical Engineering. – 2023. – № 36. – P. 1-39. <https://doi.org/10.1186/s10033-023-00895-5>.
7. Makhesana M. Analysis of vegetable oil-based nano-lubricant technique for improving machinability of Inconel 690 / M. Makhesana, K. Patel, N. Khanna // Journal of Manufacturing Processes. – 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.03.060>.
8. Advances in the Application of Vegetable-Oil-Based Cutting Fluids to Sustainable Machining Operations – A Review / R. Kazeem et al // Lubricants. – 2022. <https://doi.org/10.3390/lubricants10040069>.
9. Pal A. Performance evaluation of the minimum quantity lubrication with Al_2O_3 - mixed vegetable-oil based cutting fluid in drilling of AISI 321 stainless steel / A. Pal, S. Chatha, H. Sidhu // Journal of Manufacturing Processes. – 2021. – № 66. – P. 238-249. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.04.024>.
10. Lawal S. Application of vegetable oil-based metalworking fluids in machining ferrous metals – A review / S. Lawal, I. Choudhury, Y. Nukman // International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 2012. – № 52. – P. 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2011.09.003>.
11. Preparing vegetable oils-based metalworking fluids by a hydrolysis esterification two-step process / B. Kamyab et al // Biomass and Bioenergy. – 2024. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107175>.
12. Performance evaluation of vegetable oil based nano cutting fluids in machining using grey relational analysis-A step towards sustainable manufacturing / P. Rapeti et al // Journal of Cleaner Production. – 2018. – № 172. – P. 2862-2875. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.127>.
13. Development and potential use of MWCNT suspended in vegetable oil as a cutting fluid in machining of Monel 400 / N. Ross et al // Journal of Molecular Liquids. – 2023. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.121853> 2/3.
14. Zareh-Desari B. Assessing the lubrication performance of vegetable oil-based nano-lubricants for environmentally conscious metal forming processes / B. Zareh-Desari, B. Davoodi // Journal of Cleaner Production. – 2016. – № 135. – P. 1198-1209. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.040>.
15. Conventional and Recent Advances of Vegetable Oils as Metalworking Fluids (MWFs): A Review / I. Afonso et al // Lubricants. – 2023. <https://doi.org/10.3390/lubricants11040160>.
16. Formulation, characterization, mechanism, and application of vegetable oil based nano-cutting fluids / W. Wang et al // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2025. <https://doi.org/10.1007/s00170-024-14973-y>.
17. Characterization of vegetable oil as cutting fluid / R. D'Amato et al // Procedia Manufacturing. – 2019. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.07.040>.
18. Use of Jatropha and Moringa oils for lubricants: Metalworking fluids more environmental-friendly / M. De Souza et al // Industrial Crops and Products. – 2019. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.12.033>.

19. Manikanta J. Investigation of vegetable oil-based cutting fluids enhanced with nanoparticle additions in turning operations / J. Manikanta, N. Ambhore, G. Thellaputta // *Metal Working and Material Science*. – 2025. <https://doi.org/10.17212/1994-6309-2025-27.1-20-33>.
20. Performance evaluation of castor oil-ethanol blended coolant under minimum quantity lubrication turning of difficult-to-machine materials / N. Liu et al // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2020. – № 58. – P. 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.07.058>.
21. Experimental Research on the Effect of Thermophysical Characteristics of Cutting Fluid on Cutting Performance During Turning Ti-6Al-4V Alloy / X. Zhou et al // *Lubricants*. – 2025. <https://doi.org/10.3390/lubricants13020090>.
22. Sustainable Development of Cutting Fluids: The Comprehensive Review of Vegetable Oil / X. Luo et al // *Journal of Cleaner Production*. – 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143544>.
23. Khan M. Effects of minimum quantity lubrication on turning AISI 9310 alloy steel using vegetable oil-based cutting fluid / M. Khan, M. Mithu, N. Dhar // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2009. – № 209. – P. 5573-5583. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.05.014>.
24. Roles of Eco-Friendly Non-Edible Vegetable Oils in Drilling Inconel 718 through Minimum Quantity Lubrication / N. Safie et al // *Lubricants*. – 2022. <https://doi.org/10.3390/lubricants10090211>.
25. Airao J. Tool Wear Behavior in μ -turning of Nimonic 90 Under Vegetable Oil-Based Cutting Fluid / J. Airao, H. Kishore, C. Nirala // *Journal of Micro and Nano-Manufacturing*. – 2021. <https://doi.org/10.1115/1.4053315>.
26. Saleem M. Eco-friendly precision turning of superalloy Inconel 718 using MQL based vegetable oils: Tool wear and surface integrity evaluation / M. Saleem, A. Mehmood // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.10.059>.
27. Jeevan T. Tribological Properties and Machining Performance of Vegetable Oil Based Metal Working Fluids – A Review / T. Jeevan, S. Jayaram // *Modern Mechanical Engineering*. – 2018. – № 08. – P. 42-65. <https://doi.org/10.4236/mme.2018.81004>.
28. Kumar B. Experimental Investigations of Vegetable Oil Based Cutting Fluids with Extreme Pressure Additive in Machining of AISI 1040 Steel / B. Kumar, G. Padmanabhan, P. Krishna // *Manufacturing Science and Technology*. – 2015. – № 3. – P. 1-9. <https://doi.org/10.13189/mst.2015.030101>.
29. Bacak S. EFFECTS OF VARIOUS VEGETABLE OIL AND WATER MIXTURES USED AS CUTTING FLUIDS ON TOOL WEAR AND SURFACE ROUGHNESS / S. Bacak, Ö. Karabiyik // *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*. – 2022. <https://doi.org/10.46519/ij3dptdi.1132387>.
30. Machining performance of vegetable oil with phosphonium- and ammonium-based ionic liquids via MQL technique / A. Sani et al // *Journal of Cleaner Production*. – 2019/ <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.317>.
31. Minimum quantity lubrication machining nickel base alloy: a comprehensive review / S. Zhou et al // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2023. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11721-6>.
32. Okafor A.C. A study of viscosity and thermal conductivity of vegetable oils as base cutting fluids for minimum quantity lubrication machining of difficult-to-cut metals / A.C. Okafor, T.O. Nwoguh // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2020. – T. 106, № 3. – P. 1121-1131. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04611-3>
33. Mechiri S. Investigation of thermal conductivity and rheological properties of vegetable oil based hybrid nanofluids containing Cu-Zn hybrid nanoparticles / S. Mechiri et al // *Experimental Heat Transfer*. – 2017. – № 30. – P. 205-217. <https://doi.org/10.1080/08916152.2016.1233147>.
34. Kumar M. Thermal conductivity and rheological studies for Cu-Zn hybrid nanofluids with various base fluids / M. Kumar, V. Vasu, A. Gopal // *Journal of The Taiwan Institute of Chemical Engineers*. – 2016. – № 66. – P. 321-327. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2016.05.033>.
35. Tiwari S. Synthesis, characterization, and application of Al₂O₃/coconut oil-based nanofluids in sustainable machining of AISI 1040 steel / S. Tiwari, M. Amarnath, M. Gupta // *Journal of Molecular Liquids*. – 2023. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.122465>.
36. Nwoguh T. Enhancement of viscosity and thermal conductivity of soybean vegetable oil using nanoparticles to form nanofluids for minimum quantity lubrication machining of difficult-to-cut metals

- / T. Nwoguh, A. Okafor, H. Onyishi // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2021. – № 113. – P. 3377-3388. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06812-1>.
37. Impact of nanoparticles on vegetable oil as a cutting fluid with fractional ramped analysis / F. Hasin et al // Scientific Reports. – 2023. – № 13. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-34344-z>.
38. Pasam V. Characterization of Vegetable Oil-Based Nanocutting Fluids / V. Pasam, R. Revuru, P. Rapeti // Journal of Testing and Evaluation. – 2019. – № 47. – P. 20170426. <https://doi.org/10.1520/jte20170426>.
39. Performances of a tailored vegetable oil-based graphene nanofluid in the MQL internal cooling milling / R. Peng et al // Journal of Manufacturing Processes. – 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.12.063>.
40. Vegetable Oil-Based Nanolubricants in Machining: From Physicochemical Properties to Application / X. Zhang et al // Chinese Journal of Mechanical Engineering. – 2023. – № 36. – P. 1-39. <https://doi.org/10.1186/s10033-023-00895-5>.
41. Das A. Performance comparison of vegetable oil based nanofluids towards machinability improvement in hard turning of HSLA steel using minimum quantity lubrication / A. Das, S. Patel, S. Das // Mechanics & Industry. – 2019. <https://doi.org/10.1051/meca/2019036>.
42. Performance evaluation of vegetable-based cutting fluids in turning of AISI 1050 steel / D. Carvalho et al // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2019. – № 103. – P. 1603-1619. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03636-y>.
43. Kara F. Investigation of the effect of Al₂O₃ nanoparticle-added MQL lubricant on sustainable and clean manufacturing / F. Kara // Lubricants. – 2024. – T. 12, № 11. – P. 393. <https://doi.org/10.3390/lubricants12110393>.
44. Effect of Cooling/Lubrication Conditions on Machining Performance: An Experimental Investigation of 1040 Steel Under Dry, MQL, and Nano-MQL Environments / E. Salur et al // Materials. – 2025. – T. 18, № 17. – P. 4063. <https://doi.org/10.3390/ma18174063>.
45. Usca Ü.A. Investigation of the Effects of CNC Nanoparticle-Added Nanofluids on the Machinability of Cupral 4M Alloy / Ü.A. Usca // Turkish Journal of Nature and Science. – 2025. – № 14(3). – P. 165-171. <https://doi.org/10.46810/tdfd.1738630>.

References

1. Babaev E.R. Smazochno-ohlazhdayushchie zhidkosti: svoystva i metody primeneniya / E.R. Babaev // Bashkirskij himicheskij zhurnal. – 2022. – № 29(3). – R. 11-19. (In Russian).
2. Experimental evaluation of cooling lubrication performance of nanofluid minimum quantity lubrication in turning / Y.Z. hang et al // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2012. – Vol. 62. – P. 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.04.007>. (In English).
3. A comprehensive study on minimum quantity lubrication / S. Kumar et al // Materials Today: Proceedings. – 2022. – T. 56. – R. 3078-3085. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.158>. (In English).
4. Dhar N.R. Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on tool wear, surface roughness and dimensional deviation in turning AISI-4340 steel / N.R. Dhar, M. Kamruzzaman, M. Ahmed // Journal of Materials Processing Technology. – 2006. – Vol. 172, № 2. – P. 299-304. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.09.022>. (In English).
5. Eksperimental'noe issledovanie konvektivnogo koefficienta teplootdachi hladonositelya s dobavkami nanochastic AL₂O₃ / International Conference "Energy of Moldova – 2016 / O.Ya. Hlieva i dr. // «Regional aspects of development» 29 September – 01 October, 2016 – Chisinau, Republic of Moldova Eksperimental'noe issledovanie konvektivnogo koefficienta teplootdachi hladonositelya s dobavkami nanochastic Al₂O₃. (In Russian).
6. Vegetable Oil Based Nanolubricants in Machining: From Physicochemical Properties to Application / X. Zhang et al // Chinese Journal of Mechanical Engineering. – 2023. – № 36. – R. 1-39. <https://doi.org/10.1186/s10033-023-00895-5>. (In English).
7. Makhesana M. Analysis of vegetable oil-based nano-lubricant technique for improving machinability of Inconel 690 / M. Makhesana, K. Patel, N. Khanna // Journal of Manufacturing Processes. – 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.03.060>. (In English).
8. Advances in the Application of Vegetable-Oil-Based Cutting Fluids to Sustainable Machining Operations – A Review / R. Kazeem et al // Lubricants. – 2022. <https://doi.org/10.3390/lubricants10040069>. (In English).

9. Pal A. Performance evaluation of the minimum quantity lubrication with Al₂O₃- mixed vegetable-oil based cutting fluid in drilling of AISI 321 stainless steel / A. Pal, S. Chatha, H. Sidhu // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2021. – № 66. – R. 238-249. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.04.024>. (In English).
10. Lawal S. Application of vegetable oil-based metalworking fluids in machining ferrous metals – A review / S. Lawal, I. Choudhury, Y. Nukman // *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. – 2012. – № 52. – R. 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2011.09.003>. (In English).
11. Preparing vegetable oils-based metalworking fluids by a hydrolysis esterification two-step process / B. Kamyab et al // *Biomass and Bioenergy*. – 2024. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107175>. (In English).
12. Performance evaluation of vegetable oil based nano cutting fluids in machining using grey relational analysis-A step towards sustainable manufacturing / P. Rapeti et al // *Journal of Cleaner Production*. – 2018. – № 172. – R. 2862-2875. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.127>. (In English).
13. Development and potential use of MWCNT suspended in vegetable oil as a cutting fluid in machining of Monel 400 / N. Ross et al // *Journal of Molecular Liquids*. – 2023. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.121853> 2/3. (In English).
14. Zareh-Desari B. Assessing the lubrication performance of vegetable oil-based nano-lubricants for environmentally conscious metal forming processes / B. Zareh-Desari, B. Davoodi // *Journal of Cleaner Production*. – 2016. – № 135. – R. 1198-1209. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.040>. (In English).
15. Conventional and Recent Advances of Vegetable Oils as Metalworking Fluids (MWFs): A Review / I. Afonso et al // *Lubricants*. – 2023. <https://doi.org/10.3390/lubricants11040160>. (In English).
16. Formulation, characterization, mechanism, and application of vegetable oil based nano-cutting fluids / W. Wang et al // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2025. <https://doi.org/10.1007/s00170-024-14973-y>. (In English).
17. Characterization of vegetable oil as cutting fluid / R. D'Amato et al // *Procedia Manufacturing*. – 2019. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.07.040>. (In English).
18. Use of Jatropha and Moringa oils for lubricants: Metalworking fluids more environmental-friendly / M. De Souza et al // *Industrial Crops and Products*. – 2019. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.12.033>. (In English).
19. Manikanta J. Investigation of vegetable oil-based cutting fluids enhanced with nanoparticle additions in turning operations / J. Manikanta, N. Ambhore, G. Thellaputta // *Metal Working and Material Science*. – 2025. <https://doi.org/10.17212/1994-6309-2025-27.1-20-33>. (In English).
20. Performance evaluation of castor oil-ethanol blended coolant under minimum quantity lubrication turning of difficult-to-machine materials / N. Liu et al // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2020. – № 58. – R. 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.07.058>. (In English).
21. Experimental Research on the Effect of Thermophysical Characteristics of Cutting Fluid on Cutting Performance During Turning Ti-6Al-4V Alloy / X. Zhou et al // *Lubricants*. – 2025. <https://doi.org/10.3390/lubricants13020090>. (In English).
22. Sustainable Development of Cutting Fluids:The Comprehensive Review of Vegetable Oil / X. Luo et al // *Journal of Cleaner Production*. – 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143544>. (In English).
23. Khan M. Effects of minimum quantity lubrication on turning AISI 9310 alloy steel using vegetable oilbased cutting fluid / M. Khan, M. Mithu, N. Dhar // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2009. – № 209. – R. 5573-5583. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.05.014>. (In English).
24. Roles of Eco-Friendly Non-Edible Vegetable Oils in Drilling Inconel 718 through Minimum Quantity Lubrication / N. Safie et al // *Lubricants*. – 2022. <https://doi.org/10.3390/lubricants10090211>. (In English).
25. Airao J. Tool Wear Behavior in μ -turning of Nimonic 90 Under Vegetable Oil-Based Cutting Fluid / J. Airao, H. Kishore, C. Nirala // *Journal of Micro and Nano-Manufacturing*. – 2021. <https://doi.org/10.1115/1.4053315>. (In English).
26. Saleem M. Eco-friendly precision turning of superalloy Inconel 718 using MQL based vegetable oils: Tool wear and surface integrity evaluation / M. Saleem, A. Mehmood // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.10.059>. (In English).

27. Jeevan T. Tribological Properties and Machining Performance of Vegetable Oil Based Metal Working Fluids – A Review / T. Jeevan, S. Jayaram // *Modern Mechanical Engineering*. – 2018. – № 08. – R. 42-65. <https://doi.org/10.4236/mme.2018.81004>. (In English).
28. Kumar B. Experimental Investigations of Vegetable Oil Based Cutting Fluids with Extreme Pressure Additive in Machining of AISI 1040 Steel / B. Kumar, G. Padmanabhan, P. Krishna // *Manufacturing Science and Technology*. – 2015. – № 3. – R. 1-9. <https://doi.org/10.13189/mst.2015.030101>. (In English).
29. Bacak S. EFFECTS OF VARIOUS VEGETABLE OIL AND WATER MIXTURES USED AS CUTTING FLUIDS ON TOOL WEAR AND SURFACE ROUGHNESS / S. Bacak, Ö. Karabiyik // *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*. – 2022. <https://doi.org/10.46519/ij3dptdi.1132387>. (In English).
30. Machining performance of vegetable oil with phosphonium- and ammonium-based ionic liquids via MQL technique / A. Sani et al // *Journal of Cleaner Production*. – 2019/ <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.317>. (In English).
31. Minimum quantity lubrication machining nickel base alloy: a comprehensive review / S. Zhou et al // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2023. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11721-6>. (In English).
32. Okafor A.C. A study of viscosity and thermal conductivity of vegetable oils as base cutting fluids for minimum quantity lubrication machining of difficult-to-cut metals / A.C. Okafor, T.O. Nwoguh // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2020. – T. 106, № 3. – R. 1121-1131. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04611-3>. (In English).
33. Mechiri S. Investigation of thermal conductivity and rheological properties of vegetable oil based hybrid nanofluids containing Cu-Zn hybrid nanoparticles / S. Mechiri et al // *Experimental Heat Transfer*. – 2017. – № 30. – R. 205-217. <https://doi.org/10.1080/08916152.2016.1233147>. (In English).
34. Kumar M. Thermal conductivity and rheological studies for Cu–Zn hybrid nanofluids with various basefluids / M. Kumar, V. Vasu, A. Gopal // *Journal of The Taiwan Institute of Chemical Engineers*. – 2016. – № 66. – R. 321-327. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2016.05.033>. (In English).
35. Tiwari S. Synthesis, characterization, and application of Al₂O₃/coconut oil-based nanofluids in sustainable machining of AISI 1040 steel / S. Tiwari, M. Amarnath, M. Gupta // *Journal of Molecular Liquids*. – 2023. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.122465>. (In English).
36. Nwoguh T. Enhancement of viscosity and thermal conductivity of soybean vegetable oil using nanoparticles to form nanofluids for minimum quantity lubrication machining of difficult-to-cut metals / T. Nwoguh, A. Okafor, H. Onyishi // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2021. – № 113. – R. 3377-3388. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06812-1>. (In English).
37. Impact of nanoparticles on vegetable oil as a cutting fluid with fractional ramped analysis / F. Hasin et al // *Scientific Reports*. – 2023. – № 13. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-34344-z>. (In English).
38. Pasam V. Characterization of Vegetable Oil–Based Nanocutting Fluids / V. Pasam, R. Revuru, P. Rapeti // *Journal of Testing and Evaluation*. – 2019. – № 47. – R. 20170426. <https://doi.org/10.1520/jte20170426>. (In English).
39. Performances of a tailored vegetable oil-based graphene nanofluid in the MQL internal cooling milling / R. Peng et al // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.12.063>. (In English).
40. Vegetable Oil-Based Nanolubricants in Machining: From Physicochemical Properties to Application / X. Zhang et al // *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. – 2023. – № 36. – R. 1-39. <https://doi.org/10.1186/s10033-023-00895-5>. (In English).
41. Das A. Performance comparison of vegetable oil based nanofluids towards machinability improvement in hard turning of HSLA steel using minimum quantity lubrication / A. Das, S. Patel, S. Das // *Mechanics & Industry*. – 2019. <https://doi.org/10.1051/meca/2019036>. (In English).
42. Performance evaluation of vegetable-based cutting fluids in turning of AISI 1050 steel / D. Carvalho et al // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2019. – № 103. – R. 1603-1619. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03636-y>. (In English).
43. Kara F. Investigation of the effect of Al₂O₃ nanoparticle-added MQL lubricant on sustainable and clean manufacturing / F. Kara // *Lubricants*. – 2024. – T. 12, № 11. – R. 393. <https://doi.org/10.3390/lubricants12110393>. (In English).

44. Effect of Cooling/Lubrication Conditions on Machining Performance: An Experimental Investigation of 1040 Steel Under Dry, MQL, and Nano-MQL Environments / E. Salur et al // Materials. – 2025. – Т. 18, № 17. – Р. 4063. <https://doi.org/10.3390/ma18174063>. (In English).
45. Usca Ü.A. Investigation of the Effects of CNC Nanoparticle-Added Nanofluids on the Machinability of Cupral 4M Alloy / Ü.A. Usca // Turkish Journal of Nature and Science. – 2025. – № 14(3). – Р. 165-171. <https://doi.org/10.46810/tdfd.1738630>. (In English).

Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғарғы білім министрлігінің Ғылым комитеті (Грант № AP26100207 «Өсімдік майлары негізінде экологиялық таза наномодификацияланған майлап суыту сұйықтықтарын өндіру технологиясын әзірлеу») қаржыландырды.

М.Қ. Жамбаева*, О.А. Степанова¹, А.Б. Касымов¹, М.В. Ермоленко¹, К.С. Астемесова²

¹Шәкәрім университет,

071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А

²Казахский национальный технический исследовательский университет им. К.И. Сатпаева,

050043, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22

*e-mail: zhambayeva_94@mail.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕРМОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИХ ЖИДКОСТЕЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛОВ В УСЛОВИЯХ MQL

В статье представлен обзор современных исследований термofизических свойств смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) и наномодифицированных масел, применяемых при механической обработке металлов с использованием технологии минимального количества смазки (MQL). Рассмотрены основные виды СОЖ на масляной, водной и эмульсионной основе, их термofизические характеристики и эксплуатационные требования при интенсивной резке металлов.

Особое внимание уделено влиянию добавления различных наночастиц (Al_2O_3 , TiO_2 , SiO_2 , ZnO , графен и др.) на повышение теплопроводности СОЖ, снижение трения, вязкости, плотности и теплоемкости. Анализ публикаций позволил исследовать наномодифицированные СОЖ и технологии MQL.

Результаты исследований показали, что применение наномодифицированных СОЖ повышает интенсивность теплообмена, снижает износ инструмента и способствует повышению эффективности обработки за счет оптимизации расхода СОЖ. Кроме того, выявлена необходимость регулирования состава СОЖ и концентрации наночастиц с целью оптимизации показателей теплопроводности и вязкости.

Статья служит основой для дальнейших исследований и практического применения наномодифицированных СОЖ в условиях технологии MQL, что способствует развитию энергоэффективных и экологически безопасных процессов обработки металлов.

Ключевые слова: смазочно-охлаждающая жидкость (СОЖ), минимальное количество смазки (MQL), растительные масла, наножидкости, механическая обработка, износ инструмента.

M.K. Zhambayeva*, O.A. Stepanova¹, A.B. Kassymov¹, M.V. Ermolenko¹, K.S. Astemessova²

¹Shakarim University,

071412, Republic of Kazakhstan, Semey, Glinki Street 20 A.

²K.I. Satbayev Kazakh National Research Technical University,

050043, Republic of Kazakhstan, Almaty, Satpayev Street 22

*e-mail: zhambayeva_94@mail.ru

OPTIMIZATION OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF CUTTING FLUIDS IN METAL MACHINING UNDER MQL CONDITIONS

The article presents a review of recent studies devoted to the thermophysical properties of metalworking fluids (MWFs) and nanomodified lubricants used under Minimum Quantity Lubrication (MQL) conditions in metal machining processes. The main types of MWFs – oil-based, water-based, and emulsified fluids – are considered, along with their thermophysical characteristics and operational requirements under intensive cutting conditions.

Special attention is paid to the effect of adding various nanoparticles (Al_2O_3 , TiO_2 , SiO_2 , ZnO , graphene, etc.) on enhancing the thermal conductivity of MWFs, as well as reducing friction, viscosity, density, and specific heat capacity. The analysis of publications made it possible to evaluate the potential of nanomodified MWFs in MQL technology.

The research findings indicate that the use of nanomodified MWFs increases heat transfer intensity, reduces tool wear, and improves machining efficiency by optimizing fluid consumption. In addition, the need to regulate the MWF composition and nanoparticle concentration to optimize thermal conductivity and viscosity parameters is emphasized.

The article provides a scientific basis for further research and practical application of nanomodified MWFs under MQL conditions, contributing to the development of energy-efficient and environmentally safe metal machining processes.

Key words: cutting fluids (CFs), minimum quantity lubrication (MQL), vegetable oils, nanofluids, mechanical processing, tool wear.

Авторлар туралы мәліметтер

Маржан Қанатқызы Жамбаева* – «Техникалық физика және жылуэнергетика» кафедрасының докторанты, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: zhambaeva_94@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3957-2879>.

Ольга Александровна Степанова – техника ғылымдарының кандидаты, профессор, «Техникалық физика және жылу энергетикасы» кафедрасының меңгерушісі, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: o.stepanova@shakarim.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5221-1772>.

Аскар Багдатович Касымов – PhD, Басқарма мүшесі – стратегия және әлеуметтік даму жөніндегі проректор, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: kassymov.asb@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1983-6508>.

Михаил Вячеславович Ермоленко – техника ғылымдарының кандидаты, «Техникалық физика және жылуэнергетика» кафедрасының аға оқытушысы, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: tehfiz@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1677-8023>.

Каламкас Сериковна Астемесова – PhD, «Жалпы физика» кафедрасының меңгерушісі, Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: k.astemessova@satbayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4143-6084>.

Сведения об авторах

Маржан Қанатқызы Жамбаева* – PhD докторант образовательной программы «Техническая физика» кафедры «Техническая физика и теплоэнергетика», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: zhambaeva_94@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3957-2879>.

Ольга Александровна Степанова – кандидат технических наук, профессор, зав. кафедрой «Техническая физика и теплоэнергетика», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: o.stepanova@shakarim.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5221-1772>.

Аскар Багдатович Касымов – PhD, Член правления – проректор по стратегии и социальному развитию, Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: kassymov.asb@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1983-6508>.

Михаил Вячеславович Ермоленко – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Техническая физика и теплоэнергетика», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: tehfiz@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1677-8023>.

Каламкас Сериковна Астемесова – PhD, заведующий кафедрой «Общая физика», Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, Республика Казахстан; e-mail: k.astemessova@satbayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4143-6084>.

Information about the authors

Marzhan Kanatkyzy Zhambayeva* – PhD doctoral student of the educational program «Technical Physics», Department of Technical Physics and Heat Power Engineering, Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: zhambaeva_94@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3957-2879>.

Olga Aleksandrovna Stepanova – Candidate of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Technical Physics and Heat Power Engineering, Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: o.stepanova@shakarim.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5221-1772>.

Askar Bagdatovich Kassymov – PhD, Member of the Board – Vice-Rector for Strategy and Social Development, Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: kassymov.asb@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1983-6508>.

Mikhail Vyacheslavovich Ermolenko – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer, Department of Technical Physics and Thermal Power Engineering, Shakarim University of Semey City, Republic of Kazakhstan; e-mail: tehfiz@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1677-8023>.

Kalamkas Serikovna Astemessova – PhD, Head of the Department of General Physics, Kazakh National Technical University named after K.I. Satbayev, Republic of Kazakhstan; e-mail: k.astemessova@satbayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4143-6084>.

Редакцияға енуі 16.01.2026

Өңдеуден кейін түсуі 06.03.2026

Жариялауға қабылданды 10.03.2026