

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії транспорту та архітектури

Кафедра галузевого машинобудування та агроінженерії

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

На тему: Обґрунтування застосування мастильно-охолоджувальних технологічних рідин на основі рослинних олів у процесах механічної обробки деталей обладнання харчових виробництв

Освітній ступінь: Магістр


Галузь знань: G Інженерія, виробництво та будівництво

Спеціальність: G11 Машинобудування (за спеціалізаціями)

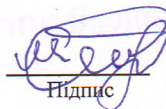
Предметна спеціальність/спеціалізація: Технологічні машини та обладнання

Освітня програма: Технологічні машини та обладнання харчових виробництв

Шифр: Кр.МАХВ 25.11.00.00.000.ПЗ

Виконав здобувач 2-го курсу гр. МАХВм-24-1  Павло СТАВІНОГА
Підпис

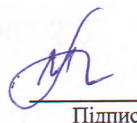
Керівник: д.т.н., професор


Підпис

Мирослав СТЕЧИШИН

До захисту допускаю:

Завідувач кафедри галузевого машинобудування та агроінженерії


Підпис

Андрій МАРТИНЮК

Дата

Хмельницький, 2025

Хмельницький національний університет

Факультет інженерії, транспорту та архітектури

Кафедра галузевого машинобудування та агроінженерії

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 13 Механічна інженерія

Шифр і найменування

Спеціальність 133 Машинобудування (за спеціалізаціями)

Код і найменування

Предметна

спеціальність /спеціалізація _____

Код і найменування

Освітня програма Машини і апарати харчових виробництв

Найменування

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри _____

_____._____.2025

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Ставінога Павло Анатолійович

Прізвище, ім'я, по батькові здобувача

1 Тема роботи Обґрунтування застосування мастильно-охолоджувальних техно-логічних рідин на основі рослинних олів у процесах механічної обробки деталей обладнання харчових виробництв

Керівник роботи Стечишин Мирослав Степанович, докт.техн.наук, професор

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, учене звання

Затверджено наказом ректора університету від _____ 2025 р. № _____

2 Термін подання здобувачем роботи на кафедру _____

3 Вихідні дані до роботи) _____

4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

5 Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)

6 Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7 Дата видачі завдання _____

АНОТАЦІЯ

У дипломній роботі обґрунтовано доцільність застосування мастильно-охолоджувальних технологічних рідин (МОТР) на основі рослинних олив у процесах механічної обробки деталей обладнання харчових виробництв. Актуальність дослідження зумовлена зростанням вимог до екологічної безпеки, охорони праці та санітарно-гігієнічних норм у харчовій промисловості, а також необхідністю зменшення негативного впливу традиційних мінеральних МОТР на здоров'я персоналу та навколишнє середовище.

У роботі проведено аналіз сучасного стану застосування мастильно-охолоджувальних рідин у машинобудуванні та харчовому машинобудуванні зокрема. Розглянуто фізико-хімічні, трибологічні та експлуатаційні властивості рослинних олив, таких як ріпакова, соєва, соняшникова та інші, з точки зору можливості їх використання як базових компонентів МОТР. Особливу увагу приділено біорозкладності, токсикологічним характеристикам, змочувальній здатності та впливу на зносо- і теплонавантаженість інструменту та оброблюваних поверхонь.

Обґрунтовано вплив МОТР на основі рослинних олив на якість механічної обробки деталей, зокрема на шорсткість поверхні, точність розмірів, інтенсивність зношування різального інструменту та температурний режим у зоні різання. Наведено порівняльну оцінку ефективності рослинних і традиційних мінеральних мастильно-охолоджувальних рідин з урахуванням умов експлуатації обладнання харчових виробництв.

У рамках дослідження проаналізовано технологічні, економічні та екологічні аспекти впровадження МОТР на основі рослинних олив у виробничі процеси. Показано, що використання таких рідин сприяє підвищенню безпеки праці, зниженню ризику забруднення харчової продукції, покращенню умов експлуатації обладнання та зменшенню витрат на утилізацію відпрацьованих мастильних матеріалів.

Практична цінність роботи полягає у можливості використання отриманих результатів під час вибору та впровадження екологічно безпечних мастильно-охолоджувальних рідин у процесах механічної обробки деталей обладнання харчових виробництв. Результати дослідження можуть бути використані у виробничій практиці, а також у навчальному процесі під час підготовки фахівців у галузі харчового машинобудування.

Дипломна робота викладена на 136 сторінках, містить 26 малюнків та 25 таблиць. Графічна частина складається з 10 аркушів формату А1.

ЗМІСТ

	Арк.
Вступ	3
1.Огляд літератури за темою кваліфікаційної роботи	5
2.Мастильно-охолоджуючі технологічні середовища	19
2.1.Основні типи і область застосування МОТР	19
2.2.Дослідження використання МОТР в процесах обробки металів	22
2.3.Функціональні і технологічні властивості	36
2.4.Охолоджуюча здатність МОТР	64
3.Методи дослідження фізико-хімічних і теплофізичних властивостей МОТР для процесів різання металів	73
4.Наукова новизна роботи і задачі досліджень	79
4.1.Дослідження зносостійкості антифрикційних властивостей МОТР в лабораторних умовах	81
4.2.Дослідження тепло-фізичних властивостей і охолоджуючої здатності МОТР	88
4.3.Технологія одержання емульсола концентрата «Рапломол-ЕП2» і пасти концентрата «Раплом-ЕП1»	101
4.4.Промислові випробування нових МОТР та їх експлуатаційні характеристики	106
Висновки	110
Перелік літературних посилань	116
Додатки	119

ВСТУП

Актуальність дослідження. Забезпечення України мастильно-охолоджуючими технологічними речовинами (МОТР) високої якості є однією з ключових проблем, для вирішення якої існують такі відомі стратегічні напрями: розроблення альтернативних нафтопродуктам джерел отримання нових МОТР, здатних хоча б частково замінити дефіцитні нафтопродукти, та впровадження енергоефективних і екологічно безпечних технологічних процесів. Один із перспективних шляхів вирішення цієї проблеми полягає у пошуку альтернативної сировини, зокрема технічних рослинних олій, серед яких ріпакова олія займає особливе місце. Ріпакова олія, у порівнянні з іншими технічними оліями (касторовою, лляною, бавовниковою), є найекономічнішою й найбільш доступною. Її виробництво поширене в 11-ти областях України, а потенційний обсяг цього виробництва є значним та залежить від рівня попиту на продукт. На теперішній час масштаби використання ріпакової олії в різних секторах економіки визначаються ступенем розроблення та впровадження шляхів її застосування. Проте слід зазначити, що рівень дослідницької роботи в цьому напрямі поки що перебуває на початковій стадії. До основних переваг ріпакової олії як потенційної сировини для виробництва МОТР, яка принципово відрізняє її від традиційних нафтопродуктів, належать такі характеристики: поновлюваність ресурсу; екологічна безпечність, оскільки сама олія та продукти її переробки не лише є екологічно сумісними з навколишнім середовищем, але також швидко розкладаються до безпечних для нього сполук.

1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Дослідження та аналіз проблеми застосування ріпакової олії у виробництві мастильних матеріалів вказують на недостатню кількість публікацій, присвячених хімічній та фізико-хімічній модифікації цієї сировини за останнє десятиліття. Відомо, що ключ до раціонального вирішення цього питання міститься саме у вдосконаленні ріпакової олії, яка не задовольняє сучасні вимоги до якісних мастильних матеріалів. На початковому етапі досліджень важливо розробити ефективні методи структурної модифікації ріпакової олії з метою її перетворення в якісну та доступну базову оливу. Ця олива може слугувати як дисперсійною фазою, так і середовищем. Результати інформаційно-патентного пошуку свідчать про відсутність серйозних науково-технічних розробок у напрямку створення нових дисперсійних фаз та середовищ, а також базових олив високої якості. Разом із цим, інший напрямок обробки ріпакової олії пов'язаний з розробкою різноманітних присадок і мастильних композицій, у тому числі поліфункціональних. У цій сфері наявні певні приклади використання технічних олив, таких як бавовняна чи касторова, для виготовлення протизношувальних присадок, але систематичні дослідження для вдосконалення ріпакової олії практично відсутні. Якщо й трапляються наукові роботи з цього питання, то вони здебільшого належать до вузьких підрозділів галузі мастильних матеріалів. Одним із таких специфічних напрямків є розробка ефірних олив для реактивних двигунів. Перевага рослинних олив, особливо ріпакової, яка є найдешевшою та найпоширенішою в Україні, полягає у їх високій змащувальній здатності порівняно з мінеральними аналогами. Їх часто додають до мінеральних олив для підвищення характеристик. Однак недоліком є те, що при високих температурах рослинні оливи формують смоли та нагар, що може призводити до поломки двигунів через пригорання поршнів. Це пов'язано зі структурою триацилгліцеридів у молекулах олив, які містять вторинні гідроксильні групи гліцерину. Водночас складні ефіри поліолів із первинними ОН-групами характеризуються значно

кращою термічною стабільністю. Завдяки цьому ефірні оливи мають найнижчі температури застигання та найвищі температури спалаху. Саме цей напрямок обробки рослинних олив набув значної популярності в середині ХХ століття. З таких олив отримували жирні карбонові кислоти (ВЖК), які потім використовувалися для синтезу ефірних олив із поліолами. Отримані продукти мали відмінні змащувальні якості та високу термічну стабільність порівняно з традиційними мінеральними оливами, а також відмінно змішувалися з ними. Ефірні оливи набули особливо важливого значення у виробництві пластичних мастил, насамперед тих, що загущені літієвим милом. Завдяки гарній сумісності ефірних груп із милами цей аспект досліджень, присвячених синтезу складних ефірів на основі ВЖК рослинних олив, визнано одним із пріоритетних. Особливо цінними є ефіри на основі поліоксипохідних неопентану як спиртових компонентів. Окрім того, важливе практичне значення мають дослідження процесу гідролізу рослинних олив для отримання мила.

Для вирішення проблем, що виникають у процесі використання мастильно-охолоджуючих рідин (МОР), до складу композицій вводять триетаноламінові мила органічних кислот фракції С18 і гліцерин. Жирні кислоти, необхідні для створення такої композиції, отримують із рослинних або тваринних жирів, а також з продуктів обробки цих кислот гліцерином. У результаті в складі МОР формується ефективний змащуючий шар (плівка) між робочою поверхнею заготовки та інструментом. Ця плівка утворюється завдяки фізико-хімічним процесам адсорбції, хемосорбції та трибохімічних реакцій, що безпосередньо впливають на якість змащування. Плівки, що виникають у парах тертя, характеризуються високою стійкістю до зсувних навантажень і низькими коефіцієнтами тертя, що суттєво перевищує характеристики сухого тертя. Рослинні олії, такі як соняшникова, бавовняна або соєва, що використовуються для отримання жирних кислот із соапстоків, належать до напіввисихаючих олій. Вони формують на поверхнях міцні й еластичні плівки з підвищеними стійкими властивостями. Оброблені жирні кислоти з гліцерином і ланцюгами

розгалужених радикалів створюють потужну адсорбційну змащувальну плівку, яка значно покращує антифрикційні характеристики композиції. Одним із таких відомих мастил для холодного штампування металів є склад на водяній основі із включенням мінеральної оливи, гідрогенізованих термоущільнених рослинних олій та триетаноламінових мил жирних кислот. Як мінеральна складова традиційно береться циліндрова олива. Використання рослинних олій (бавовняної, соняшникової або ріпакової) у свіжому, гідрогенізованому чи термоущільненому вигляді служить жирними добавками, які додатково покращують змащувальні та захисні функції. У ролі емульгатора виступають триетаноламінові мила вищих жирних кислот з рослинних олій. Така рецептура створює технологічний склад мастила, який рівномірно наноситься на поверхні деталей, забезпечує високу ефективність штампування завдяки видатним змащувальним характеристикам. Окремих згадок заслуговує мастильно-охолоджуюча рідина (МОР), спеціально розроблена для механічної обробки металів. Її склад базується на суміші нафтового мастила із додаванням сірковмісних речовин як протизносних присадок. Це можуть бути сульфідовані тваринні жири або модифіковані рослинні олії. Полімерна добавка у вигляді поліізобутилену сприяє створенню стійких плівок, а антиокислювальні та антипінні агенти (наприклад, 4-метил-2,6-ди-трет-бутилфенол і ПМС-200А) підвищують стабільність складу під час експлуатації. Є також рецептури моторних МОР для свердління сталей різних марок, які включають комбінацію мінерального масла з елементною сіркою, полісульфідами та сульфонатом кальцію. Доповненням виступають рослинна олія (ріпакова, гірчична або бавовняна) і олеїнова кислота – разом ці інгредієнти створюють екологічно чистий продукт. Композиція не містить хімічно шкідливих компонентів на кшталт хлору.

Для вдосконалення процесів шліфування важкообробних поверхонь матеріалів, які взаємодіють із абразивним кругом, було розроблено спеціальне мастило. Його унікальний склад включає нафтовий бітум у кількості 40-55%,

ортофосфорну кислоту від 6 до 8%, сечовину в обсязі 17-21% і мінеральну оливу, що виконує роль основи. Така комбінація компонентів створює покращені умови для інтенсивної обробки поверхонь, знижуючи тертя між матеріалом та шліфувальним кругом. Для механічної обробки сталі та інших тугоплавких металів, особливо під час таких операцій як свердління чи нарізання різьби, використовують мастильно-охолоджуючу рідину (МОЗ) із ретельно збалансованим складом. У цьому варіанті вона містить 55-65% олеїнової кислоти, 35-45% солей гексиламіну та фракції синтетичних жирних кислот (C10-C12), які додатково слугують ефективними інгібіторами корозії. Така рецептура дозволяє значно полегшити процес металообробки, підвищити якість оброблених поверхонь і зменшити знос інструмента. Щоб продовжити термін експлуатації інструменту під час механічної обробки деталей, була розроблена ще одна дієва мастильно-охолоджуюча рідина. До її складу входить емульсія на основі госсіполової смоли в межах 4-10%, кальцинована сода у кількості 0,001-0,005%, кубовий залишок від ректифікації полівінілпіролідону (0,3-5,0%) та вода – все інше. Мастильний засіб цього типу дозволяє збільшити стійкість інструментів у середньому в 1,5 раза порівняно зі стандартними зразками. Також існують функціональні рідини для застосування у ролі мастильних матеріалів, гідравлічних рідин та рідин для обробки металів. До їх складу часто входить базова олива (мінеральна або синтетична) та специфічний простий тіоефір у кількості від 0,5 до 1,5%. Присутність тіоефіру значно підвищує протизадирні й протизносні характеристики мастильного засобу завдяки його хімічній формулі: $R_1-S-CH_2-CH(OH)-CH_2-O-CH_2-CH(OH)-CH_2-S-R_2$ (де R1 і R2 – це третинні алкіли з ланцюгами різної довжини). Такий склад гарантує покращену функціональність рідин при роботі із високими навантаженнями та температурами. Для лиття металів під тиском застосування МОЗ дозволяє значно покращити якість кінцевої поверхні деталей. При цьому процес отримання рідини починається з нейтралізації суміші гудронів дистиляції ефірних кислот триетаноламіном. Після цього додається мінеральне

масло разом із гасом у масовому співвідношенні 0,1-0,15 до 2. Завершальний етап включає лужну обробку суміші з наступним розбавленням водою. Результат – отримана МОТР із високою стабільністю (90-97,5%) навіть у межах температурного діапазону від 250°C до 600°C. Вона відзначається низьким коефіцієнтом тертя на рівні 0,23. Серед інших відомих мастильно-охолоджуючих рідин варто відзначити склад для холодної обробки металів "Легвін", основними компонентами якого є карбонова кислота та спеціальний емульгатор. У складі карбонової кислоти використовується легке таллове

Відомо про мастильно-охолоджувальну технологічну рідину "Прогрес-П", яка активно застосовується в механічній обробці матеріалів, особливо складнооброблюваних. Наприклад, її використовують при різанні тонкостінних деталей із молібдену під час операцій розточування отворів. Для виготовлення цієї рідини до складу включають натрій хлорид, сульфидоване касторове масло, хвойний концентрат, тринатрійфосфат, сульфат цинку, буру, триетаноламін і гліцерин. У результаті застосування цього складу тривалість роботи різців збільшується в 10 разів, а жорсткість обробленої поверхні зменшується у 2,5 рази. Ще один приклад технологічного мастила — рідина для мокрого волочіння надзвичайно тонкого сталевого дроту (діаметром 0,25–0,5 мм). Основна її функція полягає у зменшенні зношуваності тягучих шайб механізму. Ця рідина містить соапстоки рослинної олії, фосфатидний концентрат рослинної олії, гашене вапно і воду. Використання мастила знижує знос шайб у 1,09–1,5 рази і скорочує кількість обривів дроту в 1,2–2 рази. Соапстоки містять до 30% загального жиру (включно до 15% у формі натрієвих солей жирних кислот) і відіграють важливу роль у забезпеченні антифрикційних властивостей. Фосфатидний концентрат використовується як ефективний емульгатор і адсорбент, а введення до складу до 0,01–0,02% гашеного вапна сприяє переведенню частини натрієвого мила в кальцієве, яке ефективніше адсорбується на поверхні металу і діє як змазка. Концентрат мастила для мокрого волочіння отримують шляхом обробки гудрону від дистиляції жирних

кислот водним лужним розчином. Як гудрон використовують олеїновий концентрат. Оптимізація співвідношення компонентів забезпечує формування балансу натрієвих солей насичених і ненасичених жирних кислот та гліцерину, що сприяє покращенню адсорбційної взаємодії змазки із деформованим металом, поліпшуючи його протизадирні властивості. Передбачено часткову нейтралізацію гудрону для наявності вільних жирних кислот, які підсилюють екрануючий ефект, хоч і впливають на стабільність емульсії. Додавання солей гумінових кислот дозволяє стабілізувати емульсію та одночасно підвищує антифрикційні властивості рідини. Існує також мастильно-охолоджувальна рідина для абразивної обробки металів. Її застосування охоплює високошвидкісне шліфування профільних ріжучих інструментів і виробів зі спеціальних сталей. Склад такої рідини включає мінеральне масло, хлорований парафін, рослинну олію, багатозольний алкілмалеїлат кальцію, а також антиоксидантні, антипінні та фосфорвмісні добавки. Ще однією композицією МОТР для механічної обробки металів є формула, що містить привитий сополімер метакрилової кислоти з акрилонітрилом, лігносульфонат, силіконове масло, ортофосфат натрію, сульфонол, триетаноламін і воду. Використання цієї рідини збільшує стійкість інструмента у 1,9 раза та знижує шорсткість поверхонь із 2,5 до 1,15–1,2.

Для механічної обробки металів використовується мастильно-охолоджувальна рідина (МОТР), що складається з комплексу компонентів. До її складу входять поліксиетильований алкілфенол, термічно оброблений за температури 110-120°C, продукт омилення сумішей розчинів гідроксиду натрію і моноетаноламіну або триетаноламіну в молярному відношенні 1:1, а також продукт конденсації каніфольної олії з малеїновим ангідридом і вода як основна складова. Проте один із недоліків такої рідини – висока собівартість, пов'язана з використанням каніфолі. Ефективне рішення було знайдено шляхом заміни каніфолі на продукт термічної переробки мила моноетаноламіном при 60-80°C, що утворює в'язку пастоподібну масу. За результатами випробувань

така рідина демонструє чудові миючі, змащувальні й охолоджувальні властивості, вона нетоксична та стійка до бактеріального забруднення. Застосовується й інша композиція мастильних матеріалів для різьбових з'єднань, що містить натрієві солі жирних кислот та мильну стружку. Для її приготування стружку розчиняють у підігрітій воді, додають парафін і рідке натрієве скло, після чого суміш нагрівають до 80°C. Одержане мастило випробовується на різьбових деталях із цинковим покриттям шляхом занурення деталей у ванну з мастилом на 2-3 хвилини для прогрівання металу й формування захисної плівки товщиною приблизно 10 мкм. В умовах механічної обробки широко використовують водомасляні емульсії, які мають невисокі протизадирні властивості. Наприклад, існує композиція емульсолу на основі мінерального масла з вмістом сульфату міді, що зменшує зношення ріжучого інструменту. Однак його використання часто спричиняє розшарування емульсії і підвищує корозійну активність рідини. Інша вдосконалена композиція включає воду, триетаноламін, нітрит натрію, водорозчинне мило, поверхнево-активні речовини (ПАР) й добавки солей міді (хлорид, нітрат, сульфат). Завдяки утворенню мідьвмісних водонерозчинних сполук, що створюють захисну плівку на поверхні металу, значно зменшується тертя й зношення. Така композиція має прозору або напівпрозору консистенцію, характеризується стабільністю, антикорозійними та змащувальними властивостями і стійкістю до мікробного забруднення. Для виробництва підшипників, зокрема шліфування шариків, використовують МОТР із тринатрійфосфатом, сіллю циклогексиламіну і синтетичних жирних кислот фракції C10-C13, флотореагентом на основі кубового залишку диметилдіоксану та абразивним порошком (корунд або шлаки білого корунда). Така рідина забезпечує рівень шорсткості поверхні до 0,25-0,27 мкм і підвищує продуктивність обробки понад удвічі. Ефективною також є композиція для алмазно-абразивної обробки металів (шліфування, хонінгування), яка включає поліетиленгліколеві ефіри вищих жирних спиртів і моноетаноламіну зі синтетичними жирними кислотами

фракції С10-С16, триетаноламін, гліцерин.

Розроблено емульсію для змащування металевих форм у процесі виробництва бетонних та залізобетонних виробів. Основною перевагою технології її отримання є використання замість дефіцитних мінеральних олив суміші кубових залишків синтетичних жирних кислот (СЖК) і фільтрату парафінового виробництва, які обробляються міцним розчином гідроксиду натрію. Під час змащування металевих форм на їх поверхні утворюється тонка плівка з твердих парафінів, що містяться у фільтраті. Представлено результати порівняльного трибологічного аналізу ряду моторних олив вітчизняного та зарубіжного виробництва, які були досліджені за допомогою машини тертя обертового типу. В дослідженні використано експериментальні діаграми Штрибека, гістограми зношування та трибологічний паспорт моторних олив. Встановлено, що трибологічні властивості вітчизняних моторних олив відповідають рівню зарубіжних аналогів. Проаналізовано триботехнічні й корозійні властивості синтетичної мастильно-охолоджувальної рідини (МОР) марки СБ-1, яка застосовується для механічної обробки сталі, чавуну та алюмінієвих сплавів. Проведено порівняння з традиційно використовуваною емульсією ЭГТ, що показало переваги нової МОР за основними характеристиками. Компанія ZOM Oberflächenverarbeitung Gmb, що спеціалізується на виробництві ріжучого інструменту, приділяє велику увагу чистоті МОР, використовуваних у шліфувальних процесах. Для відповідності високим вимогам було розроблено спеціальну центрифугу MZA-T22 фірмою Turbo-Separator AG, яка з 2005 року забезпечує високу чистоту МОР та подовжує термін їх служби. Оцінено ефективність нової МОР, створеної трибологічним центром ІвГУ для виробничих потреб ТОВ "Белазремкомплект" у місті Прокоп'євськ. Випробування підтвердили позитивний результат, тому нова рідина рекомендована для застосування в машинобудуванні Кузбасу. Досліджено експлуатаційні властивості біорозкладних багатофункціональних мастильних і робочих рідин на основі синтетичних складних поліефірів із

протизадирними добавками. Результати фрикційних тестів показали, що поліолльні поліефіри мають високу мастильну здатність при низькій витраті, добре витримують навантаження і можуть застосовуватись як робочі рідини в металообробці, а також у якості гідравлічних та охолоджувальних рідин і мастильних сумішей. Окремо розглянуто властивості базових масел, модифікаторів мастильних матеріалів та параметри мастил, такі як в'язкість, температура спалаху тощо. Наведено опис структури та характеристик пластичних мастильних матеріалів разом із рекомендаціями щодо їх вибору і методів змащування. Компанія Fuchs Europe Schmierstoffe Gmb займається розробкою і виробництвом МОР із додатковими властивостями, такими як вибухобезпечність та антикорозійність. Для шліфувальних робіт пропонується мастило Escut HSG 211 LE без хлору, з низьким рівнем випаровуваності відповідно до стандарту EN 13478, яке рекомендоване для роботи з інструментом із кубічного нітриду бора. Для шліфування твердих сплавів розроблено водорозчинну МОР Escocool S-COS, яка не містить мінеральних масел.

У представленому тексті викладена інформація про сучасні мастильно-охолоджувальні рідини (МОР), які використовуються в процесах механічної обробки металів, зокрема із застосуванням інноваційних підходів на основі соєвої олії. Акцент робиться на важливості використання природних компонентів, які демонструють високі експлуатаційні властивості і відповідають вимогам екологічної безпеки. Соєва олія в таких МОР відіграє ключову роль, оскільки її трансформація дає змогу отримувати активні добавки, що виконують кілька надважливих функцій. Вони запобігають утворенню смолистих відкладень, захищають оброблювані поверхні від корозії та сприяють формуванню стабільної емульсії олії. Крім того, особлива увага приділяється вивченню біодеградації цих рідин і їхній екологічній сумісності, що забезпечує безпечне використання в технологічних процесах. Такі рідини рекомендується застосовувати при операціях гостріння, прокатки, волочіння і

штамбування, що значно розширює спектр їх практичного застосування. Результати лабораторних досліджень свідчать про високі експлуатаційні характеристики таких технологічних рідин. Зокрема, проведено експерименти для оцінки їх мастильних, охолоджувальних та антикорозійних властивостей, які залишаються стабільними навіть за умови тривалої експлуатації та потрапляння до них забруднень. Навіть за умисного додавання кальцію, хлоридів чи гідравлічних масел до рідин відзначалася лише незначна втрата ефективності. Це підкреслює високу надійність та адаптивність таких МОР до несприятливих умов. Одним із прикладів сучасних розробок у цій галузі є змазка Unifluid 10 від компанії Fuchs Europe Schmierstoffe GmbH, яка спроектована насамперед для металорізальних верстатів. Цей продукт віднесено до категорії екологічно безпечних і таких, що швидко розкладаються в навколишньому середовищі. Змазка універсальна у застосуванні та підходить для понад 80% операцій обробки металів, що значно розширює її практичну значущість у галузі. Додатково розглядаються фізико-хімічні властивості магнію і його сплавів у контексті їхньої обробки разом із характеристиками мастильно-охолоджувальних рідин, які використовуються для цих цілей. У тексті представлені переваги й обмеження різних типів МОР, таких як водорозчинні рідини, водомасляні емульсії та масла, включаючи синтетичні основи. Це дозволяє детально оцінити ефективність використання тих чи інших продуктів залежно від вимог операцій. Окремо зазначаються недоліки традиційних МОР типу Allround від Chemischbere Werke Kluthe GmbH, які мають тенденцію до швидкої втрати функціональних властивостей і розкладання. У відповідь на цей виклик компанія розробила інноваційну змазку Nakuform 70-73 MG на водній основі, яка характеризується значною стабільністю навіть після трьох місяців використання. Такий підхід є яскравим прикладом прогресивного вирішення завдань підвищення довговічності та ефективності сучасних МОР. В цілому, наведені дослідження й приклади демонструють тенденцію до підвищення екологічності й вдосконалення функціональних

показників мастильно-охолоджувальних рідин, що сприяє оптимізації технологій обробки металів і одночасно мінімізує негативний вплив на довкілля.

2. МАСТИЛЬНО-ОХОЛОДЖУЮЧІ ТЕХНОЛОГІЧНІ СЕРЕДОВИЩА

2.1. Основні типи і області застосування МОТР

Мастильно-охолоджувальні технологічні рідини (МОТР) відіграють важливу роль у покращенні продуктивності та якості обробки матеріалів різанням, виконуючи охолоджувальні, мастильні та миючі функції. Охолоджувальна дія таких рідин полягає у відведенні тепла з робочої зони деталей і ріжучого інструмента. Завдяки мастильним властивостям МОТР зменшують тертя, а також попереджають явища схоплювання та адгезії на поверхнях, що контактують, зокрема інструмента, оброблюваних деталей і стружки. Миюча функція забезпечує видалення продуктів зношування інструмента (переважно абразивного), дрібної стружки та інших відходів процесу з робочої поверхні різального інструмента, деталі й обладнання. МОТР повинні мати добре виражені функціональні властивості: охолоджувальну, мастильну й мийну дію, ефективність яких залежить від способу подачі рідини в зону різання. У металообробці використовують різноманітні за складом і фізико-хімічними характеристиками МОТР, які можуть бути в твердому, рідкому чи газоподібному стані. Найбільший обсяг застосувань припадає на рідкі середовища, або мастильно-охолоджувальні рідини (МОР). Вони класифікуються за хімічною структурою як вуглеводневі, емульсійні або водні. Водні МОР поділяються на електроліти, водні розчини полімерів і поверхнево-активних речовин (ПАР), а також суспензії. Інколи використовують комбіновані склади, що містять солі та ПАР одночасно. У закордонних джерелах МОР на основі води мають назви "хімічні" або "синтетичні" рідини. Емульсії — це дисперсні системи з двома рідинами, що не змішуються чи майже не змішуються. Дисперсна фаза представлена дрібними краплями однієї рідини, розподіленими в іншій з різними діаметрами. Залежно від того, яка рідина є дисперсною фазою, виділяють емульсії типів "масло у воді" і "вода в маслі". Для обробки різанням переважно використовують емульсії "масло у

воді", концентрат яких після розведення називають емульсолами. Сучасні емульсоли є колоїдними системами зі складною структурою, що включають емульгатори, активні присадки, антикорозійні інгібітори, бактерицидні добавки та інші компоненти. Емульгатор як вид ПАВ знижує поверхневий натяг на межі вода-масло, сприяючи формуванню стабільних емульсій й запобігаючи злипанню крапельок. У процесі розчинення емульсолу формується трифазна система (вода, масло, емульгатор). Частка молекул емульгатора створює захисну оболонку навколо часток масла. При включенні молекул мінерального масла в структуру міцел емульгатора виникають прозорі водні міцелярні розчини — так звані розчинні масла. Завдяки своїм змочувальним, охолоджувальним і антикорозійним властивостям такі розчини широко застосовуються за кордоном у виробничих процесах. Їх прозорість додатково сприяє візуальному контролю обробки. До вуглеводневих середовищ належать мінеральні та рослинні масла. У промисловості також використовують компаундовані системи — суміші мінеральних і розчинних масел. Проте чисте використання цих речовь також органічні розчинники, наприклад чотирихлористий вуглець, гас.

Мастильно-охолоджувальні рідини (МОР) повинні відповідати не лише сучасним функціональним вимогам, а й характеристикам, що забезпечують їх ефективне використання в умовах індустріального виробництва з урахуванням соціальних, санітарно-гігієнічних, економічних та інших факторів. Серед основних експлуатаційних властивостей виділяють нетоксичність, стійкість до корозії, стабільність, бактерицидність та гігієнічність. МОР не повинні руйнувати фарбове покриття на обладнанні й трубопроводах, спричиняти спінення чи розбризкування, змішуватися з мастильними або гідравлічними маслами, викликати заклинювання рухомих частин станка, пошкоджувати ізоляцію електроустаткування або мати високий рівень випаровування. До того ж вони мають бути пожежо- та вибухобезпечними, легко утилізуватися і розкладатися перед скиданням у каналізацію. Ще десятиліття тому вітчизняне

виробництво мастильно-охолоджувальних технологічних рідин (МОТР) було обмеженим як за обсягами, так і за асортиментом. Переважно це були емульсоли, наприклад, Э-2 (Б), ЭТ-2, а також осірене масло – сульфозфрезол. Протягом 1971-1980 років асортимент значно розширився завдяки появі сучасних МОР і технологічних змазок для роботи в різних умовах виробництва. До стандартів масового випуску увійшли масляні МОР, емульсоли, напівсинтетичні й синтетичні рідини з різними фізико-хімічними характеристиками. Уже зараз асортимент серійних МОТР для обробки металів різанням налічує понад 50 продуктів. Вони знайшли застосування для таких видів обробки, як точіння, фрезерування, свердління, шліфування тощо, і підходять як для чорних металів (чавун, сталі), так і для кольорових (мідь, цинк, алюміній, олово та їх сплави). У сферах листового і об'ємного штампування все ще широко використовуються індустріальні масла і їхні комбінації з графітом, тальком та іншими компонентами. Однак останнім часом створено сучасні високоефективні технологічні змазки для процесів висадки, вирубки, глибокої витяжки та інших видів холодного штампування й профілювання сталі, кольорових металів та їхніх сплавів. Для прокатного виробництва чорних і кольорових металів широко застосовуються стандартні емульсоли (Т, ЭГТ, ЭТ-2в, СП-3), нафтові масла (И-12А, И-20А, П-28, циліндрове 11 тощо), а також впроваджуються нові серії ефективних змазок типу укринол (202, 203, 205, 207, 211 тощо) та МОТР Т-6п, Т-7п. Актуальність розробки нових і оптимізації застосування існуючих МОТР особливо зростає під час впровадження нових або вдосконалення наявних технологій металообробки. Основне завдання МОТР – підвищення продуктивності технологічного процесу та забезпечення необхідної якості готового виробу. Для досягнення цього мастильно-охолоджувальні рідини мають зменшувати сили тертя і теплові навантаження під час роботи інструменту й обробки металу, ефективно видаляти стружку, окалину та інші відходи зі зони різання. Таким чином, до мастильно-охолоджувальних рідин ставляться різноманітні вимоги

залежно від умов експлуатації та специфіки обробки. Різновиди оброблюваних матерії.

2.2. дослідження використання МОТР в процесах обробки металів

Фізико-механічні аспекти різання металів і зношування інструмента.

Основними елементами складного механізму металорізання є процеси пластичної деформації, тертя, зношування та руйнування, які відбуваються в зоні контакту між інструментом і заготовкою. При ортогональному різанні ріжуча кромка розташована перпендикулярно до напрямку відносної швидкості між заготовкою і різцем за умови зливного стружкоутворення і за відсутності наросту на різці. На Рисунку 2.1 подано схематичну модель ортогонального різання, що включає розвинену зону пластичної деформації. За певних умов, наприклад, із зростанням швидкості різання, ця зона може зменшуватися і змінюватися до стану квазіплощини ковзання. У загальному випадку зона деформації описується набором поверхонь ковзання, які в проекції на площину креслення формують поле ліній ковзання (позначені як CA, CA1, CA2 тощо), що схематично представлені на Рисунку 2.1.

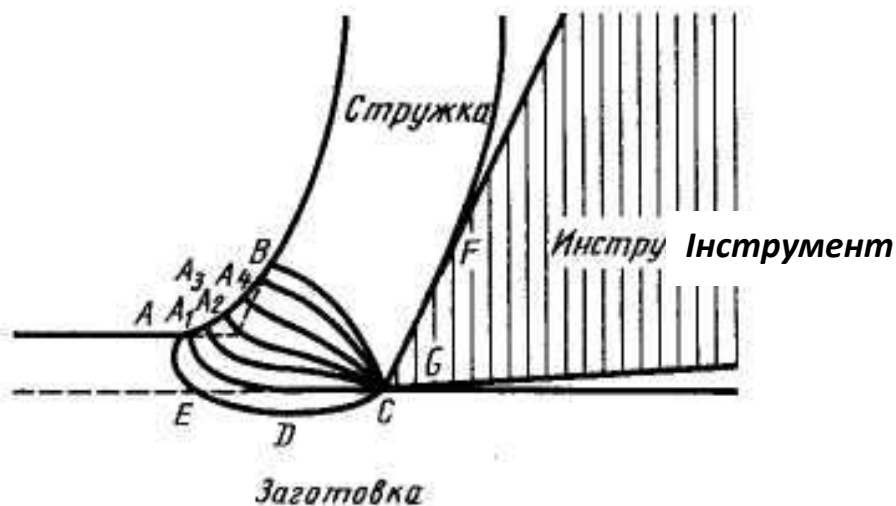


Рис. 2.1. Схема ортогонального різання з розвинутою зоною пластичної деформації

Пластична деформація в заготовці розпочинається по лінії AEDC, яка проходить нижче сліду ріжучої кромки. Це пояснює значну зміну властивостей металу в поверхневому шарі після проходження різця. Перемінний характер напружень у цьому шарі, зосереджений по обидва боки від ріжучої кромки, може у рамках процесів втомити викликати утворення численних поверхневих мікротріщин. Така структура сприяє ослабленню напружень у зоні зсуву під час наступного проходу різального інструмента. Крім поверхневого шару металу, зона пластичної деформації частково охоплює стружку до лінії BF. Основою роботи пластичної деформації під час процесу різання є переміщення дислокацій, самодифузія та дифузія. У процесі деформації полікристалічного металу щільність дислокацій зростає, за чим слідує їхня анігіляція всередині матеріалу, вихід на поверхню та розрядка, особливо на границях зерен. Цей механізм генерує особливу, хімічно чисту поверхню з високим значенням поверхневої енергії, яка характеризується наявністю значної кількості вільних валентностей. Їхнє число може досягати 10^{15} на квадратний сантиметр. Зменшення хімічної активності такої поверхні за рахунок пасивуючих агентів з вільними валентностями виступає дієвим методом мінімізації зношування інструмента. Одним із прикладів такого впливу є сорбція продуктів перетворення МОТР на ювенільній поверхні. На початковій стадії процесу пластичної деформації матеріалу, за невеликої щільності дислокацій у кристалічних ґратках (приблизно 10^5 – 10^7 см⁻² для відпаленого заліза та його сплавів), імовірність безперешкодного проходження дислокацій через весь об'єм кристаліта є високою. Через це більшість дислокацій на початку процесу легко виходять на поверхню та розряджаються, що забезпечує мінімальний опір зсуву. Втім, із прогресуванням деформації щільність дислокацій значно збільшується (до 10^{12} см⁻²), а їхній рух всередині матеріалу уповільнюється через взаємодію дислокацій між собою, що призводить до значного підвищення опору зсуву. Це явище отримало назву деформаційного зміцнення або наклепу і проявляється найяскравіше у металах із кубічною структурою ґраток, таких як

залізо та його сплави. При процесі різання металу рівні напружень та деформації зсуву в зоні пластичної деформації досягають надзвичайно високих величин. Унаслідок цього частина дислокацій виходить із площин ковзання та взаємодіє між собою. Дислокації з протилежними знаками поширюють взаємне знищення, що сприяє розрядці щільності дислокацій після стадії зміцнення. Результатом цього процесу стає покращення пластичних властивостей матеріалу. Самодифузійні та дифузійні механізми пластичної деформації переважно домінують при підвищених температурах ($\geq 0,5T_{\text{плав}}$). Їхній вплив контролюється потоком точкових дефектів у кристалічних ґратках: вакансій, міжвузлових атомів і домішкових часток у зоні напружень. У неоднорідному полі напружень домішкові атоми заповнюють локальні області стиску та розтягу через дифузію як усередині матеріалу, так і вздовж меж зерен. Це призводить до зменш

$$S_r = N/\sigma_T \quad (2.1)$$

Сила тертя без використання мастильних матеріалів між двома контактуючими поверхнями є результатом суми всіх тангенціальних сил, які формуються у зонах контакту під час взаємного переміщення тіл. Ці тангенціальні сили складаються з декількох компонентів: адгезійних сил, що виникають завдяки хімічним (металічним) зв'язкам у так званих "містках зварювання" і фізичним міжмолекулярним зв'язкам; сил опору зсуву, спричинених пластичною деформацією мікронерівностей на поверхні контакту (як через дислокаційні, так і через дифузійні механізми), а також пластичною деформацією поверхневих шарів; і сил опору руйнуванню мікронерівностей у матеріалах, схильних до крихкого розщеплення. За наявності середовища в зазорі між контактуючими поверхнями відбувається суттєва зміна розподілу цих сил у загальній величині тертя. Зокрема, адгезійна складова майже повністю зникає, а дві останні сили значно знижуються завдяки ефекту

Ребіндера. Водночас до загальної сили тертя додаються сили опору зсуву, що виникають через пластичну деформацію або текучість цього середовища. Границя текучості при зсуві залежить від гідростатичного тиску лише незначною мірою. Тому сила тертя, обумовлена адгезійними силами й силами опору зсуву, є прямо пропорційною фактичній площі контакту й нормальному навантаженню N . У разі помірних навантажень (низькі Sr) залежність сили тертя від N має лінійний характер. При значному збільшенні N фактична площа контакту поступово досягає свого граничного значення, яке відповідає номінальній контактній площі. У таких умовах сила тертя вже практично не змінюється при подальшому зростанні нормального навантаження. На схемі (Рис. 2.2) зображено ідеалізовані криві розподілу нормальних σ і тангенціальних τ компонентів напруження на передній частині інструмента. Схема відповідає ситуації, коли гідростатичний тиск не впливає на границю текучості при зсуві. Область пластичного контакту між передньою поверхнею інструмента та стружкою розташована між точками H і C . У цьому інтервалі нормальне напруження монотонно зростає від величини σ_H (на межі пластичного контакту) до максимального значення σ_C на ріжучій кромці. Тангенціальна напруга залишається сталою по всьому інтервалу.

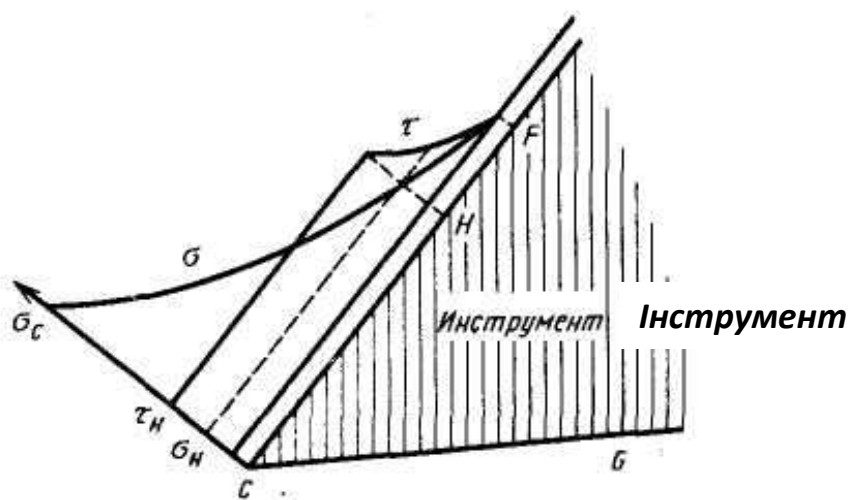


Рис. 2.2. Розподіл дотичної τ і нормальної σ складових напружень на передній поверхні різального інструменту.

При виході з області пластичного контакту величина σ стає менше межі $\sigma_{и}$, а між нею і тангенціальною складовою виникає лінійна залежність: $\tau=f\sigma$, де f – коефіцієнт тертя. Відповідна область називається областю пружно-пластичного контакту. На Рис. 2.2 вона розташована в інтервалі HF .

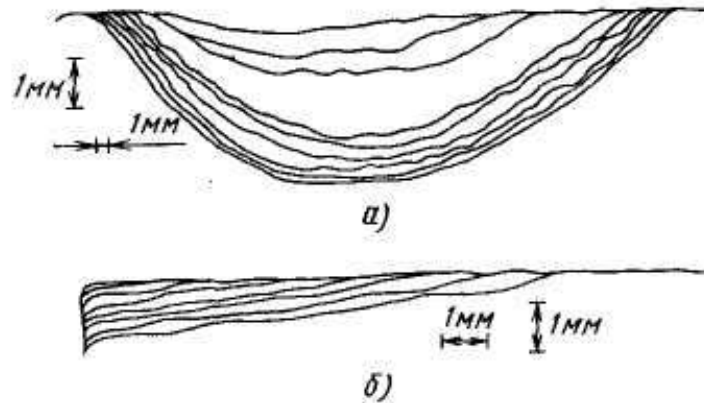


Рис. 2.3. Динаміка зміни форми лунки (а) і фаски (б) зношування з інтервалом 2 хв (точіння; швидкість різання 150 м/хв; подача 0,127 мм/об; глибина 2,5 мм; заготовка – сталь 1020).

З формули (2.1) випливає, що нормальне навантаження, необхідне для досягнення пластичного контакту, значною мірою залежить від властивостей середовища між контактуючими поверхнями, а також від температури. Це обумовлено тим, що механохімічні характеристики середовища й температура впливають на границю текучості матеріалу (σ_T). Передня та задня поверхні інструмента зазнають інтенсивного зношування під час експлуатації. На рисунку 2.3 наведена динаміка зміни профілю зношування, що відбувається на передній поверхні у вигляді утворення лунки та на задній поверхні у вигляді стирання фаски. Механізми зношування третьових пар мають різну природу. Процес втомно-адгезійного зношування різального інструмента характеризується наступним чином: під час тертя будь-який обраний мікрооб'єм на поверхні інструмента, який контактує з мікронерівностями деталі, зазнає циклічних напружень через постійно змінний контакт. У результаті такого впливу всередині мікрооб'єму накопичуються мікротріщини,

які призводять до руйнування матеріалу. Відокремлення частинок під час зношування може виникати через адгезію чи вимивання середовищем. Зменшення втомно-адгезійного зношування можливе за рахунок зниження адгезійних і механічних взаємодій між мікронерівностями контактуючих поверхонь. Частинки, які утворилися внаслідок втомного адгезійного зношування, під впливом пластичної деформації закріплюються та проникають у більш м'який матеріал деталі або стружки. У цьому процесі вони стають абразивом для інструмента. Крім того, мікронерівності на поверхнях стружки та деталі також можуть спричиняти абразивне зношування. До того ж у багатьох марках конструкційних сталей присутні тверді включення, такі як карбіди, інтерметалеві сполуки чи оксиди, які також виконують роль абразивного матеріалу та прискорюють зношування різального інструмента. Механохімічне зношування пов'язане із хімічними реакціями, що протікають на поверхнях тертя. У зоні різання інтенсивно розвиваються хімічні й дифузійні процеси, особливо при взаємодії хімічно активного середовища з металевими контактуючими поверхнями. Утворені плівки — продукти реакції середовища з металом — характеризуються фізико-механічними властивостями, що відрізняються від матеріалів тертьових пар. Ці плівки видаляються при терті інструмента об стружку та деталь. Одним із проявів механохімічного зношування є окисне зношування, де окислення поверхонь металу супроводжується відокремленням і видаленням оксидів. Дифузійне зношування виникає через втрату міцності інструмента внаслідок дифузії вуглецю та легуючих елементів із прилягаючих до робочих поверхонь шарів металу в деталь, стружку або частинки зносу. Це явище відбувається в умовах адгезійного контакту контактуючих поверхонь. Інтенсивність дифузійного зношування значно знижується за умови зменшення фактичних площ контакту та температури в зонах тертя. Його мінімізація можлива завдяки постійній подачі до контактної зони вуглецю та легуючих елементів у активній формі для компенсації їхньої втрати. Для цього можуть використовуватися продукти

перетворення мастильно-охолоджувальних рідин (МОТР). Більшість механічної енергії, яка витрачається

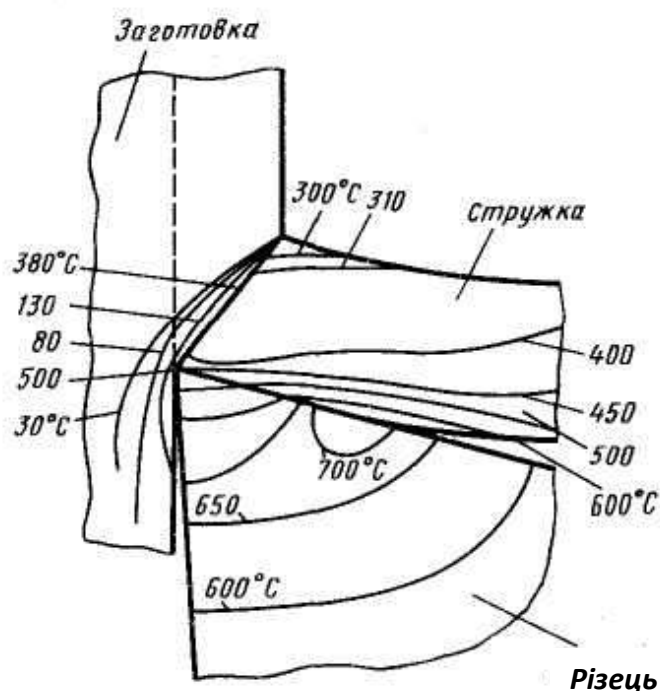


Рис. 2.4. Температурне поле в зоні різання (швидкість різання 60 м/хв; глибина різання 0,32 мм; кут різання 10°).

Процес найінтенсивніше відбувається в областях пластичної деформації матеріалу заготовки та на поверхнях тертя інструмента, що спричиняє значне підвищення температури. На рисунку 2.4 зображено температурне поле у зоні різання. Температури на тертьових поверхнях значно перевищують показники в зоні пластичної деформації матеріалу заготовки. Підвищення температури має як позитивний, так і негативний вплив на процес різання. До позитивних чинників належать зниження опору зсуву під час пластичної деформації матеріалу, прискорення дифузії атомів домішок, а також підвищення ймовірності переходу до пластичної текучості при формуванні евтектичних фаз. Негативні наслідки включають посилене дифузійне і втомно-адгезійне зношування інструмента. Функція мастильно-охолоджувальних технологічних засобів (МОТР). Основною метою застосування МОТР є зменшення зношування різального інструмента, покращення якості оброблюваної поверхні

та підвищення продуктивності. Це досягається впливом на фізико-механічні та механохімічні процеси, що відбуваються під час різання металу. Важливими аспектами є вибір базової основи МОТР (вода, мінеральні олії тощо), додавання присадок із заданими хімічними властивостями, а також регулювання умов подачі МОТР до зони різання. Охолоджувальний ефект. Охолодження загалом сприяє зниженню зношування інструмента та покращує якість обробленої поверхні. У певних технологічних процесах використовуються охолоджувальні агенти, такі як холодне повітря чи вуглекислий газ. На ефективність охолодження МОТР впливають не лише теплоємність і теплопровідність, а й здатність змочувати металеві поверхні та утворювати пару. При високих швидкостях різання і температурі рідина може втрачати контакт із поверхнею через слабку змочуваність або парову подушку, що унеможлиблює пряму залежність між теплофізичними властивостями МОТР і її охолоджувальною здатністю. Охолодження не завжди дає позитивний результат. Наприклад, при застосуванні МОТР на основі мінерального масла і водної емульсії було встановлено, що кількість отворів, які можна просвердлити до затуплення свердла, значно більша для першого варіанту, попри те, що температура в цьому випадку становить 280 °С порівняно з 101 °С для другого варіанту. У деяких випадках температуру в зоні різання спеціально підвищують за допомогою зовнішніх джерел тепла для гарячого оброблення металів. Поліпшення охолоджувальних характеристик МОТР зазвичай є бажаним. Одним із способів покращення охолоджувальної здатності є створення водної основи, тобто перехід до синтетичних водорозчинних МОТР. Водночас виникають труднощі з введенням у водний розчин гідрофобних молекулярних фрагментів, які забезпечують протизношувальні, антифрикційні та інші функції. Ці проблеми вирішують, наприклад, хімічним щепленням гідрофобних фрагментів до водорозчинних молекул, таких як полімер етиленоксиду. Додавання відповідних поверхнево-активних речовин істотно покращує змочуваність і збільшує охолоджувальну здатність середовища.

Ефективність охолодження ділянки різання можна підвищити через вдосконалення методів подачі мастильно-охолоджувальних технічних рідин (МОТР). Способи, такі як туманне охолодження, використання ультразвукових хвиль чи високонапірне підведення МОТР, заслуговують на увагу для досягнення цієї мети. Гідродинамічне змащення зменшує силу тертя завдяки утворенню рідкої плівки, яка розділяє контактні поверхні. У зоні різання при високих навантаженнях понад 102 МПа та температурах у кілька сотень градусів Цельсія розрахункова товщина рідких плівок для звичайних ньютонівських рідин із в'язкістю менше $0,01 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{м}^2$ у тисячі разів менша від середньої висоти мікронерівностей поверхонь, що стикаються. Це свідчить про обмежену роль гідродинамічного змащення за таких умов. Однак цей тип змащення може бути важливим у сфері пружно-пластичного контакту, наприклад, при зниженні сил тертя в напрямних під час глибокого свердління. Реологічні ефекти також відіграють важливу роль. Більшість рідин, які використовуються як МОТР, належать до класу неньютонівських пружно-в'язких речовин. Їх в'язкість залежить від напружень і швидкостей деформації зсуву. У процесі різання ефективна в'язкість рідини підвищується при наближенні до ріжучої кромки через зростання швидкості деформації та гідростатичного тиску. Це сприяє поділу третювих поверхонь навіть за умов значного зростання напружень. Хоча проникнення рідини безпосередньо в зону різання здається малоімовірним, все ж таки її наявність у ключових точках сприяє зниженню тертя та температури, а також мінімізує знос інструмента. Цікаво, що рідини, які поведуться як ньютонівські за помірних навантажень, можуть стати неньютонівськими за екстремальних умов і працювати за реологічним принципом. Можливі й зворотні перетворення: полімери з вираженими пружно-в'язкими характеристиками здатні вести себе як ньютонівські рідини через деградацію макромолекул при високих навантаженнях. Граничне змащення є ще одним важливим механізмом зменшення тертя. Воно визначається наявністю тонких адсорбційних або хімічно зв'язаних плівок

товщиною від десятків до сотень нанометрів. Ці плівки мають високу стійкість до зсуву порівняно з рідкими шарами гідродинамічного змащення. Наприклад, реакція між стеариноювою кислотою й чистою металевою поверхнею утворює тверді мила, молекули яких хімічно закріплюються на поверхні. Довгі алкільні ланцюги кислотних залишків формують щільну упорядковану структуру, що мінімізує тертя. Механізм роботи граничного змащення включає кілька ключових аспектів: хемосорбцію активних сполук, які утворюють захисну плівку на поверхнях тертя; пасивацію контурних частин для запобігання їхньому небажаному контакту; створення шару з нижчим опором до зсуву; релаксацію напружень у плівці або на її межах, що знижує ризик втомного руйнування поверхонь. Ці механізми можуть діяти одночасно, забезпечуючи надійний захист від зношування. Характеристики граничного змащення залежать від структурних властивостей і.т.д.

Пасивація ювенільної поверхні є специфічним механізмом граничного змащення, при якому товщина захисної плівки не перевищує кілька десятків нанометрів. Основний її ефект полягає у запобіганні утворенню металевих зв'язків між контактуючими поверхнями інструмента та заготовки, що, у свою чергу, дозволяє зменшити адгезійне і дифузійне зношування інструмента. Даний процес активується через взаємодію активних компонентів фізико-хімічної плазми з ювенільною поверхнею, яка постійно утворюється під час різання. Плазма виникає у зоні різання через піролітичні перетворення, механічну та радіаційну деструкцію складових мастильно-охолоджувальних технологічних рідин (MOTP) при температурах 500–700 °C у вакуумі або в присутності кисню, у середовищі високих зсувних напружень та екзоелектронної емісії. Основними компонентами хімічної плазми є молекули, іони, радикали та іон-радикали в основному й збудженому станах. Радикальні форми утворюються також через перенесення радикалів на молекули або іони при їх взаємодії з ювенільною поверхнею. Висока проникна здатність плазми порівняно із рідиною забезпечує ефективність пасивації саме в області

пластичного контакту поблизу ріжучої кромки – там, де доступ рідини утруднений і формування рідких плівок малоімовірно. Пасивація значно уповільнює втомно-адгезійне зношування та абсолютно виключає дифузійне деградаційне руйнування. Активні частки плазми потрапляють на ювенільну поверхню або з газової фази прилеглих мікрооб’ємів, або переміщуються на них шляхом поверхневої дифузії з інструменту, стружки чи заготовки. Будь-який вплив, спрямований на зміну швидкості дифузії активних компонентів у зону пластичної деформації металу (наприклад, ультразвукове опромінення чи накладення різниці потенціалів), разом зі збільшенням зазорів, коефіцієнтів газофазної та поверхневої дифузії чи концентрації активних часток, ефективно сприяє зменшенню зношування ріжучого інструмента і підвищенню продуктивності обробки. Багатокомпонентні твердоплівкові мастильно-охолоджувальні технологічні рідини вирізняються комбінованою дією механізмів граничного змащення та ефективного захисту під високим тиском. Їх основа – мономерні або олігомерні сполуки, які у зоні різання проходять реакції полімеризації чи поліконденсації (вулканізації), формуючи суху щільну захисну плівку на контактуючих поверхнях. Для створення таких складів використовується рідинна база, доповнена тонко диспергованими компонентами: графітом, політетрафторетиленом, найлоном-11, MoS₂, тіоантимонатами металів, металевими сплавами, неорганічними солями, оксидами тощо. При роботі за допомогою цих мастильних матеріалів на поверхні інструмента утворюється і постійно поновлюється полімерна плівка, що містить антифрикційні й протизносні добавки високого тиску. Застосовуючи багатокомпонентні МОТР, можна значно скоротити ступінь зношування інструментів, оптимально поєднуючи механізми змащення. Крім того, це покращує якість оброблюваної поверхні.

2.3. Функціональні і технологічні властивості

Мастильно-охолоджувальна технологічна рідина (МОТР) відіграє

ключову роль у процесі різання, впливаючи на його ефективність завдяки своїм функціональним характеристикам, серед яких виділяються мастильні, ріжучі (пластифікуючі), охолоджувальні, миючі та інші властивості. Оцінювати ці характеристики можна двома принципово різними способами: прямим, коли аналіз здійснюється безпосередньо в умовах реальної обробки заготовок на металорізальних верстатах, та непрямим, який передбачає використання спеціальних приладів і установок. Останні дозволяють відтворювати процеси, що відбуваються в зоні різання, без фізичного знімання стружки. Достовірне тестування функціональних властивостей МОТР є надзвичайно важливим етапом розробки нових складів і вибору найбільш ефективних варіантів для конкретних завдань. Правильний підбір компонентів МОТР за критеріями хімічного складу, фізико-хімічними та функціональними властивостями значно прискорює впровадження інноваційних розробок, а також здатний суттєво знизити витрати матеріальних і людських ресурсів. Для максимального виявлення функціональних властивостей МОТР та їхньої технологічної ефективності найдоцільніше проводити дослідження в реальних умовах різання, на тих типах металорізального обладнання, на яких заплановано застосування даної рідини. Водночас випробування в реальних умовах залежать від багатьох факторів, таких як якість виготовлення ріжучого інструменту, правильність його заточення та ступінь затуплення. Тестування МОТР на лабораторних пристроях — таких як машини тертя, мікротвердомери, розривні машини — забезпечує високу стабільність експериментальних результатів і їхню відтворюваність. Проте цей метод має певні обмеження: він не завжди точно передає сутність фізико-хімічних, механічних та інших процесів, які відбуваються безпосередньо в зоні різання. До мастильних властивостей МОТР належать такі важливі показники, як протизадирні, протизношувальні та антифрикційні характеристики (див. таблицю 2.1). Ці параметри мають вирішальне значення для забезпечення якісного процесу різання металів, оптимізуючи роботу обладнання і збільшуючи його продуктивність.

Таблиця 2.1. Мастильні властивості деяких МОТР для обробки металів
різанням і тиском [68]

МОТР	P_{CB} , кН	P_K , кН	I_3	$D_{нв}$, мм	f_c	$A_{нв}$, кДж/мм ³
Різання						
Аквол-10М (3 %)	1,12	0,75	37,7	0,88	0,12	1100
Аквол-11 (3 %)	1,12	1,06	41,6	0,77	0,13	2470
Штампування						
Укринол-2у	1,86	1,41	47,0	0,60	0,07	3925
Укринол-4	5,62	1,06	58,3	0,46	0,115	16250

Змащувальна дія мастильно-охолоджувальних технологічних рідин (МОТР) спрямована на зменшення захоплення, тертя, задирів, зношування та фрикційного нагрівання між контактуючими поверхнями інструмента і заготовки. Це досягається шляхом скорочення кількості і зниження міцності адгезійних зв'язків між взаємодіючими поверхнями, а також завдяки формуванню граничних плівок, що ізолюють контактні ділянки. Покращення мастильних властивостей МОТР позитивно впливає на майже всі аспекти процесу обробки: - Зменшується зношування інструмента, що підвищує його довговічність, знижує утворення задирів та засалювання алмазно-абразивних поверхонь; - Зростає продуктивність обробки завдяки покращенню умов роботи інструмента; - Поліпшується якість обробленої поверхні: знижується шорсткість і хвилястість, мінімізуються залишкові напруження завдяки більш ефективному екрануванню зон тертя, локалізації зсувів і послабленню адгезійних явищ; - Стабілізується процес утворення наросту: зменшується його розмір, міцність та сила зчеплення з інструментом; - Знижується фрикційне нагрівання та температура в зоні різання, що сприяє економії енергії за рахунок зменшення сил тертя. Посилення протизадирних властивостей МОТР сприяє запобіганню зварюванню між матеріалом інструмента і заготовкою, перешкоджає налипанню частинок на ріжучому інструменті та мінімізує пошкодження поверхні завдяки зменшенню кількості мікровиступів, на яких виникають процеси зварювання. Попри всі переваги, інтенсивне покращення

мастильних характеристик МОТР не є беззаперечно позитивним: - Висока змащувальна дія може викликати підвищене корозійно-механічне зношування ріжучих кромek або позбавляти захисного шару наросту, який протидіє руйнуванню робочих зон інструмента; - При обробці матеріалів із граничними плівками, що мають значно більшу міцність, ніж сама заготовка (наприклад, алюміній, свинець чи мідь), сили різання зростають. У таких випадках різання на повітрі може виявитися складнішим, ніж у вакуумі; - Ефективність алмазно-абразивної обробки може падати через недостатню жорсткість технологічної системи (наприклад, під час внутрішнього шліфування чи суперфінішування), що призводить до збільшення кількості зерен, які лише ковзають по поверхні, не беручи активної участі в процесі різання. Зі збільшенням швидкості різання та подачі вплив мастильних властивостей МОТР на якість обробки поступово знижується. Це пояснюється складністю проникнення рідини до відповідної контактної зони через менш сприятливі умови для утворення граничних плівок. З огляду на двояку природу тертя — молекулярну й механічну — для оцінки сили тертя зазвичай застосовується двочленний закон.

$$F_T = F_d + F_{mo}, \quad (2.2)$$

де F_d і F_{mo} — відповідно деформаційна і молекулярна (адгезійна) складової сили тертя.

Якщо між контактуючими поверхнями металу немає безперервної граничної плівки, то відповідно до формули Боудена і Тейбора

$$F_T = F_m \alpha + F_c (1 - \alpha), \quad (2.3)$$

де F_m — сила тертя на поверхнях контакту інструментального і оброблюваного матеріалів (без граничного змащення); α — частка від загальної поверхні, на якій здійснюється металевий контакт; F_c — сила тертя на площадках контакту із граничною плівкою.

При утворенні наросту на робочих поверхнях інструмента, що володіє більш високою твердістю, ніж оброблюваний матеріал, він проникає в оброблену поверхню і опорну поверхню стружки та створює додаткову силу

проорювання $F_{\text{пр}}$. Таким чином, в умовах наростоутворення сила тертя буде визначатися по формулі:

$$F_{\text{т}} = F_{\text{м}}\alpha + F_{\text{с}}(1-\alpha) + F_{\text{пр}}. \quad (2.4)$$

Частка контактуючих поверхонь між оброблюваним і інструментальним матеріалами, де формуються металеві зв'язки, залежить від співвідношення швидкостей утворення та руйнування граничної плівки, а також від можливості проникнення та адсорбції молекул мастил та середовища у зону контакту. Коли цей показник сягає критичного значення, відбувається злипання поверхонь, що може призводити до утворення так званих зварних містків, виривів чи руйнування контактуючих зон. Механізм змащувальної дії мастильно-охолоджувальних технологічних рідин (МОТР) має ключове значення. Воно полягає у зниженні реакційної здатності новоутворених ювенільних поверхонь, зменшенні кількості та міцності адгезійних зв'язків між матеріалами, створенні захисної граничної плівки, яка оберігає оброблюваний та інструментальний матеріали від фізико-хімічної й механічної деструкції, а також у мінімізації площі контакту між стружкою і передньою поверхнею інструмента. У процесі різання виникають фізично чисті ювенільні поверхні з високою хімічною активністю. Це зумовлено наявністю некомпенсованих зв'язків у поверхневих атомах. Механічна та термічна активація поверхневого шару активують валентні зв'язки, що призводить до появи активних центрів на контактуючих ділянках інструмента і заготовки. Пластичні деформації сприяють зближенню атомів різних матеріалів, відтак утворюються адгезійні зв'язки між ними, що змінюють властивості поверхні металу. У свою чергу, енергетична взаємодія між металом і мастильним середовищем впливає на властивості МОТР. Формування міцних металевих зв'язків між інструментом і заготовкою може негативно впливати на якість оброблюваної поверхні, посилювати пластичну текучість матеріалу і призводити до інтенсивного адгезійно-втомливого зношування інструмента, що перебільшує звичайний рівень зношування у

традиційних вузлах тертя. Процеси адсорбції молекул МОТР і середовища на новоутворених поверхнях значно змінюють характер адгезії та когезії. Залежно від умов обробки та властивостей активних речовин, граничні плівки можуть бути сформовані безперервними моношарами або складатися з кількох шарів молекул. За збільшення дипольного моменту молекул поверхнево-активних речовин (ПАР) їхній вплив на енергетичний стан поверхні металу зростає. Наприклад, при зниженні роботи виходу електронів пластичність металу підвищується, тоді як зростання цього показника сприяє утворенню твердих захисних плівок. Полярність молекул ПАР визначає їхню взаємодію із металом: речовини можуть виступати донорами чи акцепторами електронів. Електро-донорно-акцепторна взаємодія сприяє утриманню води на металевій поверхні завдяки валентним електронам кисню або водневим зв'язкам. Ювенільні елементи інструмента і заготовки можуть генерувати електрони та фотони (ефект Крамера), активуючи молекули мастильно-охолоджувальної рідини (вода, гідрокарбони, кисень, галогени) та утворюючи активні радикали, які ініціюють ланцюгові хімічні реакції. Утворення таких радикалів та вільних атомів також є результатом термічної чи механічної деструкції компонентів МОР. Електронна емісія ювенільними металевими

Для здійснення процесу хімічної адсорбції необхідна наявність відповідної вільної енергії. Після формування мономолекулярного шару подальше відбувається лише фізична адсорбція компонентів мастильно-охолоджувальної рідини (МОР) або їх хімічна взаємодія з поверхнею металу. Хемосорбція має відмінність від хімічної реакції у своїй оборотності. Під час хемосорбції часто утворюється зв'язок між поверхнею металу та одним із елементів молекули МОР, при цьому внутрішньомолекулярні зв'язки можуть залишатися незмінними або розриватися. У разі розпаду таких зв'язків утворюються вільні атоми та радикали. При контакті свіжостворених металевих поверхонь з елементами, що широко використовуються в МОР, такими як кисень, сірка, хлор або йод, відбуваються екзотермічні реакції, тобто реакції з виділенням

тепла. Пасивація активованих металевих поверхонь завдяки взаємодії з МОР та компонентами зовнішнього середовища сприяє зниженню інтенсивності адгезійно-дифузійних процесів. Утворені граничні плівки зменшують не лише адгезійний компонент зношування, а й дифузійні явища, що додатково впливають на довговічність інструмента. Загалом трибологічні процеси значною мірою залежать від температури контакту. У цьому контексті виділяють дві критичні температури. При першій відбуваються дезорієнтація і десорбція молекул граничної мастильної плівки. При другій— руйнування хімічно модифікованих шарів, яке супроводжується значним злипанням, інтенсивним зношуванням та руйнуванням взаємодіючих поверхонь. Максимальна критична температура працездатності МОР (T_k) обумовлюється складом рідини. Значення T_k для різних компонентів наведені у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2. Максимальна температура T_k працездатності компонентів МОР

Компоненти МОР	Температура T_k , °C
Рослинні масла	130
Тваринні жири	130
Синтетичні речовини	200
Вільна сірка	1000
Присадки:	
<u>Хлоровмісні</u>	500
Фосфоровмісні	800
Сірковмісні	900

Зіставлення температурних діапазонів у зоні різання з критичною температурою дозволяє правильно підбирати склад мастильно-охолоджувальних рідин (МОР). У процесі обробки багатьох матеріалів активні адгезійні процеси спричиняють утворення наростів на ріжучій кромці. Використання активних середовищ, таких як вода або чотирихлористий вуглець, дозволяє повністю ліквідувати ці нарости та забезпечити точне копіювання мікрогеометрії ріжучої кромки на обробленій площині. Неefективні середовища, навпаки, посилюють явища адгезії та формування

наростів, що значно збільшує шорсткість поверхні порівняно з ріжучою кромкою. Досліди показали, що застосування води цілком усуває наростоутворення при обробці сталі 20X за швидкості 0,75 м/хв із товщиною зрізу 0,1-0,3 мм. Використання олій, олеїнової кислоти чи етилового спирту у подібних умовах лише частково знижує процес формування наростів, але не ліквідує його повністю. Інертні рідини перешкоджають доступу кисню в робочу зону, що сприяє підвищенню адгезії, утворенню наростів і погіршенню шорсткості поверхонь. Кисень також відіграє важливу роль у формуванні поверхневих плівок. Так, робота у вакуумі активізує процес утворення налипів та наростів через нестачу кисню, чим значно ускладнює різання конструкційних і легованих сталей. Наприклад, у дослідах точіння сталі 40X за вакуумних умов (5×10^{-2} Па) різцями зі сталі P9K5 зі швидкістю 65 м/хв (перетином зрізу $0,07 \times 0,5$ мм), інтенсивність зношування інструмента збільшується в 4-7 разів, при цьому сила різання P_z зростає на 20-30%, а P_x – на 25-30%. У таких умовах амплітуда коливань сил різання також багаторазово зростає. Отримані нарости вирізняються високою міцністю та сильною адгезією до інструмента. З іншого боку, при точінні сталі 45 звичайними швидкорізальними різцями за швидкості різання 40-50 м/хв додавання кисню до МОР подвоює стійкість інструмента. Такий ефект зменшується зі зростанням швидкості різання. При цьому видалення кисню (дегазація МОР) під час різьблення скорочує її ефективність приблизно вдвічі. Аналогічно інертність бензолу та погане забезпечення киснем при обробці сталі підвищують адгезію та погіршують її оброблюваність. У процесах фізичної адсорбції та хемосорбції часто утворюються тонкі плівки, зокрема мономолекулярні. Наприклад, адсорбовані молекули стеаринової кислоти формують плівку завтовшки близько 1,9 нм. Хімічний склад і структура граничних плівок на металевих поверхнях аналізуються за допомогою методів електронно-емісійної спектроскопії, таких як рентгенівська фотоелектронна спектроскопія (РФЕС), електронна оже-спектроскопія (ЕОС), методи дифракції

повільних електронів тощо. У більшості робіт зазначається, що механізм дії мастильно-охолоджувальних технологічних рідин (МОТР), які містять активні хімічні елементи, має багато спільного в умовах різання та тертя важконавантажених поверхонь.

Нагромадження кисню в поверхневому шарі свідчить про інтенсивні окисні процеси, що відбуваються при різанні. Наявність окисних і вуглеводневих плівок сприяє зменшенню сил тертя і адгезійної складової між інструментом і заготовкою. Вміст елементів на поверхні змінювався в такій послідовності: найбільше вуглецю, потім кисень, сірка, хлор і найменше заліза. Кількість вуглецю, кисню, сірки і хлору в приповерхневих шарах (через 5-10 хв травлення) зменшується в кілька разів, а процентний вміст заліза різко зростає. Таким чином, на глибині декількох атомних шарів хімічний склад шліфованих зразків різко відрізняється від складу поверхні і основного металу.

Амплітуда оже-сигнала, відносні одиниці

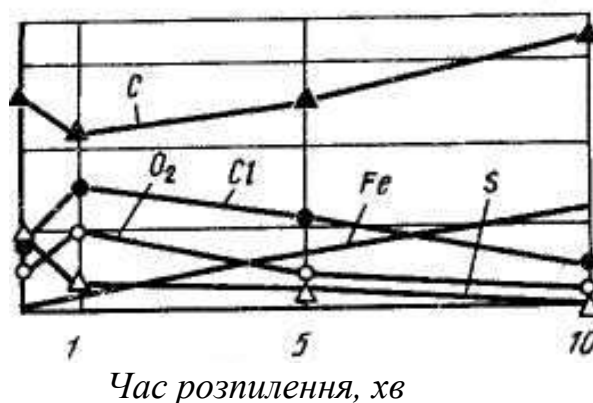


Рис. 2.5.

амплітуди оже-сигнала від часу розпилення поверхні, шліфованої з емульсією ИХП-45Е

Рентгеновський мікроаналіз, виконаний за допомогою сучасного рентгеновського мікроскопа, оснащеного інноваційним твердотільним енергодисперсним аналізатором, продемонстрував, що на глибині кількох мікрометрів хімічний склад шліфованих зразків відповідає вимогам, встановленим державним стандартом ГОСТ 801-78 для сталі марки ШХ15. Це підтверджує високу якість матеріалу, що дозволяє використовувати його в

складних технічних умовах. Для запобігання корозії деталей, обладнання та знарядь праці важливо, щоб присадка, яка входить до складу мастильно-охолоджуючої рідини (МОР), проявляла свої активні властивості лише за високих температур і тисків, характерних для процесів металообробки різанням. Водночас необхідно враховувати, що ця хімічна добавка не повинна створювати надмірного навантаження на інструмент у вигляді прискореного корозійно-механічного зношування. Для покращення робочих характеристик МОР широке застосування знаходять полімери різної молекулярної маси. При жорстких режимах різання зростає утворення ювенільних поверхонь, які володіють високою радикалоутворюючою здатністю через термомеханічну деструкцію полімерів. У цих умовах запускаються радикально-ланцюгові реакції, що сприяють утворенню граничних плівок. Такі плівки знижують адгезію матеріалів і зменшують зношування інструментів. Миюча здатність МОР має вирішальне значення під час видалення шламу, який формується в зоні різання. Шлам складається із частинок стружки оброблюваного металу, фрагментів карбідів, неметалічних включень та інструментального матеріалу. Ці часточки закріплюються на поверхні деталей та інструменту завдяки дії електростатичних сил, механічного скріплення або ефекту Ван-дер-Ваальса. Металообробний процес значно ускладнюється, якщо шлам достатньо дрібнодисперсний: такі частинки легше проникають у мікронерівності і більш міцно утримуються на поверхні. Недостатньо ефективного очищення поверхні від шламу може призводити до його осідання на оброблюваних деталях прямо з охолоджувальної рідини. Це не лише ускладнює контроль якості, а й сприяє забрудненню деталей, що негативно впливає на точність обробки. У зонах контакту інструмента і деталі тверді часточки шламу викликають посилене зношування робочих поверхонь та погіршують мікрогеометрію обробленої поверхні. Особливо це помітно під час обробки глибоких отворів, де недостатня миюча здатність МОР може викликати заклинювання стружки чи навіть ламання інструмента. Мастильно-охолоджуючі рідини, які

використовуються для свердління глибоких отворів або нарізання різьби в глухих отворах, повинні володіти високими миючими властивостями. Це особливо важливо за використання інструментів із дрібнозернистим абразивним покриттям: менші відстані між зернами сприяють їх швидкому забиванню шламом, що знижує ефективність роботи та збільшує зношування. Навіть під час грубих обробок вплив якості очищення на стан інструмента залишається значним. Ефективна миюча дія МОР забезпечується використанням поверхнево-активних речовин (ПАР), які покращують змочуваність і сприяють утворенню захисних плівок на границі.

Таблиця 2.3. Групові числа гідрофільних груп у системі ГЛБ.

Гідрофільні групи	Групові числа
SO ₄ Na	38,7
-COOK-	21,1
-COONa-	19,1
N (четвертинних амінів)	9,4
Ефір (сорбітанове кільце)	6,8
Ефір (вільний)	2,4
-O-	1,3
-COOH-	2,1
-ВІН- (вільний)	1,9
-ВІН- (сорбітанове кільце)	0,5
Ліпофільна група:	
-СН-, -СН ₂ -, -СН ₃ -	0,475
Похідні групи:	
-СН ₂ СН ₂ О-	0,33
-СН ₂ СН ₂ СН ₂ О-	0,15

Глобальний баланс гідрофільно-ліпофільних властивостей (ГЛБ) визначається за формулою $ГЛБ = \text{сума чисел гідрофільних груп} + \text{сума чисел гідрофобних груп} + 7$. Діапазон значень ГЛБ впливає на властивості рідин наступним чином: при значеннях 3,5–6,0 речовини діють як емульгатори для стабілізації емульсій типу «вода/масло»; значення 7–9 відповідають змочувачам; у межах 8–18 емульгатори стабілізують емульсії типу «масло/вода»; значення 13–15 характерні для миючих агентів; а показники 15–18 відносяться до

солубілізаторів. Миючі компоненти, які входять до складу мастильно-охолоджувальних рідин (МОР), поділяються на три групи: аніонні, катіонні та неіоногенні поверхнево-активні речовини (ПАР). До аніонних ПАР належать сульфати, сульфаноли, алкілсульфонати, солі жирних кислот (традиційні мила), які дисоціюють у воді з утворенням катіонів і аніонів. Катіонні речовини використовуються в МОР рідше порівняно з аніонними. Неіоногенні ПАР утворюють молекулярні розчини з довгими ланцюгами. Вони не є електролітами, проте мають молекули з полярними і неполярними групами. До неіоногенних ПАР, поширених у складі МОР, відносяться оксиетильовані вищі жирні спирти, поліетиленгліколи, алкілоламіді, синтаміді, синтаноли, змочувачі ОП-7 і ОП-10. Додавання в воду 0,15–0,2% змочувачів ОП-7 або ОП-10 здатне знизити її поверхневий натяг з 72 до 40 мН/м. При збільшенні концентрації ПАР початково їх миюча здатність зростає, але досягає максимуму і далі поступово знижується. Більшість миючих компонентів при концентрації понад 0,1–0,5% у воді спричиняють утворення піни, що є неприпустимим у використанні. Регулювання складу та кількості ПАР у МОР дозволяє варіювати їхні миючі властивості в широких межах. Змочувальна і проникаюча здатність мастильно-охолоджувальних технологічних рідин має ключове значення. Ефективне змочування поверхонь деталей і інструментів є необхідною умовою забезпечення таких функцій МОР, як змащувальна, охолоджувальна, миюча та диспергуюча. Якщо рідина погано змочує поверхню заготовки чи інструмента, може виникнути плівковий режим кипіння, що супроводжується утворенням парової плівки біля поверхні твердого тіла. Це суттєво знижує тепловіддачу. Особливо високі вимоги до змочувальної і проникаючої здатності МОР висувуються під час обробки металів з високою точністю. Наприклад, при розвертанні така здатність дозволяє уникнути наростів і налипання на ріжучій грані інструмента; при суперфінішуванні та хонінгуванні ефективно змочування запобігає засміченню пор брусків шламом і забезпечує належне видалення стружки.

Таблиця 2.4. Поверхневий натяг рідин на поверхні поділу рідина - ПАР.

Рідина	Температура, °С	Поверхневий натяг, мН/м
Вода	20	72,9
	30	71,4
Гліцерин 1 %-вий розчин ТМ*:	18	62,5
кислоти:	-	
бутанової	-	44,0
гексанової	-	44,0
октанової	-	46,5
нонанової	-	39,0
сумішей СЖК:	-	
С7-С9	-	37,2
С10-С12	-	41,8
С13-С16	-	38,7
5%-ві водні емульсії:	-	
Аквол-2	-	36,0
Аквол-6	-	31,6
Масляні МОР:	-	32,2
МР-1в	20	
МР-3	20	31,2
МР-6	20	33,2
МР-7	20	32,0
МР-10	20	25,7
ОСМ-3	20	30,3
И-20А	20	32,0
Масло касторове	18	36,4
Бензол	20	28,9
Олеїнова кислота	65	28,6
Бутиловий спирт	20	24,6
Гас	-	25,2
Чотирхлористий вуглець	25	26,4
Метали (у розплавленому стані):		
Ртуть	20	486,5
Нікель	1250	1850
Мідь	1300	1226
Золото	1300	1100
Залізо	При $T_{пл}$	1880
Свинець	При $T_{пл}$	1800

* ТМ – триетаноламінові мила аліфатичних карбонових кислот.

Ступінь змочування поверхні твердого тіла рідиною визначають за допомогою

поверхневого натягу рідини на межі поділу фаз тверде тіло–рідина (ст. ж) і крайового кута змочування (θ). Гарне змочування досягається при низькому поверхневому натязі і малому крайовому куті. Якщо крайовий кут перевищує 90° , рідина не змочує поверхню: її краплі не проникають у капіляри і тріщини. Зменшення змочувальної здатності молекули відбувається зі збільшенням кількості полярних груп, що знижують асиметрію молекули. Змочування поділяється на два типи: фізичне (оборотне), зумовлене молекулярними силами, і хімічне (необоротне), яке домінує при дії сил хімічної взаємодії. МОТР може проникати в зону різання через термодифузійні процеси, діючи по мікроканалах і тріщинах, що виникають у стружці внаслідок пластичних деформацій. Щільність металу в стружці стає на 2–3% меншою, ніж у вихідному матеріалі. Крім того, проникнення МОТР можливе через розриви контакту між інструментом, стружкою і деталлю, які виникають через різницю у частотах, фазах і амплітудах вібрацій (деталь зазвичай має низькочастотні коливання, тоді як інструмент — високочастотні). До того ж, вакуумна або насосна дія, обумовлена періодичним зривом частинок налипань і наростів з поверхонь інструмента, також сприяє перенесенню МОТР. Ще одним фактором є електричні сили, що виникають при ковзанні дислокацій під час процесу різання. Дія МОТР обмежується зоною поблизу площадки схоплювання, де контакт має переривчастий характер. Деякі технологічні середовища, такі як кисень повітря, суттєво скорочують площу пластичного контакту. У зону утворення стружки МОТР проникає переважно через бічну межу контакту стружки з передньою поверхнею інструмента. Якщо у процесі різання капля води потрапляє до цієї межі, вона миттєво проникає під стружку під дією хімічного змочування, яке є необоротним, на відміну від фізичного змочування, що базується на молекулярних силах. Рівень капілярного тиску в мікротріщинах із заданим радіусом чи еквівалентним йому обчислюють за відповідною формулою.

$$p_k = 2\sigma_{ж.г} \cos\theta / r . \quad (2.5)$$

Проникна дія мастильно-охолоджувальних рідин (МОР) підсилюється під час їх подачі струйно-напірним способом. Це пов'язано зі збільшенням різниці тисків на поверхні поділу фаз рідина-газ. Швидкість руху рідини в капілярах значно зростає під впливом високочастотних коливань, зокрема при застосуванні ультразвукових хвиль. На здатність проникнення МОР впливають розміри молекул, атомів, іонів, а також їхня мобільність. Максимальною проникною здатністю володіють аніони галогенів, таких як йод, фтор та хлор. На противагу їм, складні органічні молекули проникають значно гірше через великий розмір молекули й довжину зв'язків між атомами. Покращене змочування зони утворення стружки може бути зумовлене формуванням електричного поля в процесі обробки, величина потенціалу якого змінюється пропорційно до швидкості пластичної деформації зсуву й середньої довжини пробігу дислокацій. Роль змочувальних і проникних властивостей МОР у процесі різання полягає в тому, що зі зменшенням кута змочування та підвищенням швидкості розтікання рідини по твердій поверхні скорочується величина роботи диспергування, а разом із цим знижується й сила різання. На Рисунку 2.6 представлена динаміка зміни діаметра плям, що утворені нормованими краплями МОР під час їхнього розтікання по поверхні білого електрокорунду протягом 5 хвилин. Експериментальні дослідження проводилися зі синтетичними, напівсинтетичними, емульсійними та масляними видами МОР, а також із дистильованою водою. Було встановлено, що при глибині різання 0,015 мм сила різання зменшується в 1,75 раза для зернистості абразивного матеріалу 40, в 1,85 раза для зернистості 25 і вдвічі — для зернистості 16. Чим більша зернистість матеріалу, тим менш розвинена його поверхня і менша площа контакту, що своєю чергою знижує кількість рідини, яка адсорбується на ній. Підвищення швидкості різання від 5 до 25 м/с сприяло зменшенню сил різання у середньому в 1,6 раза.

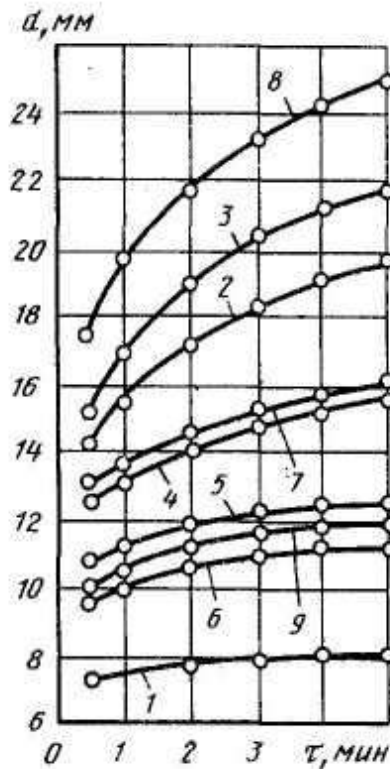


Рис. 2.6. Кінематика розтікання нормованої краплі МОР по поверхні абразивного матеріалу (d - діаметр плями; τ - час розтікання):

1 - дистильована вода; 2 - 1%-вий розчин кальцинованої соди; 3 - 1% кальцинованої соди і 0,5% нітрату натрію; 4 - 3%-вий розчин Аквол-10; 5 - 3%-вий розчин Аквол-11; 6 - 3%-ва емульсія Укринол-1; 7 - МР-2У; 8 - ОСМ-1; 9 - вазелінове масло.

Дослідження, яке присвячене вивченню впливу змочувальної здатності мастильно-охолоджувальних рідин (МОР) на процес диспергування матеріалу абразивного кола при його правці, показало важливі закономірності. Було встановлено, що зі збільшенням зернистості абразивного матеріалу вплив МОР на процес різання поступово зменшується. Експериментальні дослідження проводилися методом мікрорізання алмазним індентором абразивних кругів, виготовлених з білого електрокорунду. Виявлено, що змочувальні властивості МОР мають вагомий вплив на технологічні характеристики процесу суперфінішування, зокрема, деталей підшипників. Існує певний взаємозв'язок між фізико-хімічними параметрами МОР, такими як розтікання, поверхневий

натяг, крайовий кут змочування θ , робота адгезії та коефіцієнт розтікання S , і технологічними параметрами процесу обробки. Ці параметри стосуються показників продуктивності оброблення поверхні, зношування інструмента, об'єму металу, який знімається за одиницю часу, а також ріжучої здатності абразивних брусків. Особливе значення приділяється ріжучій та пластифікуючій дії МОР. Ріжучі властивості характеризують здатність технологічного середовища полегшувати руйнування зв'язків в оброблюваному матеріалі під час врізання інструмента. Це сприяє підвищенню стійкості інструмента, полегшує сам процес різання і дозволяє проводити операції обробки за інтенсивніших режимів. З іншого боку, пластифікуючі властивості полягають у здатності МОР забезпечувати ефективне пластичне деформування металів. Це досягається завдяки утворенню тонкого розм'якшеного шару на поверхні оброблюваного матеріалу. Цей шар виконує роль своєрідного мастила, що перешкоджає налипанню металу на інструмент і зменшує тертя між інструментом і деталлю або стружкою. За рахунок такого впливу пластифікуючої дії знижується надмірне тертя та деформації в зоні різання, що призводить до зменшення зусилля різання і покращення якості кінцевої поверхні. Особливе значення ця властивість відіграє під час обробки металів тиском, коли якість мастильної дії визначає не лише кінцевий результат обробки, але й ефективність процесу загалом. Базу для прояву ріжучої та пластифікуючої дії МОР складає так званий ефект Ребіндера. Цей ефект відображає сукупність явищ, що викликані зміною механічних властивостей твердих тіл під дією поверхневих фізико-хімічних процесів, які знижують поверхневу енергію матеріалів. Згідно з критерієм Гріффітса, міцність крихкого матеріалу (здатність протистояти розтягуванню) є пропорційною його поверхневій енергії у вигляді залежності $\sigma^2 \propto \sigma_0$. Коли поверхнева енергія σ_0 зменшується до значення σ_A , то початкова міцність матеріалу зменшується у пропорції $(\sigma_0/\sigma_A)^{1/2}$. Для пластичних матеріалів спостерігається така ж залежність: чим сильніше зменшено поверхневу енергію матеріалу, тим більше

знижується його міцність. На рівні мікроструктур цей ефект проявляється через полегшення руйнування міжатомних зв'язків або перебудову структури атомів і молекул матеріалу за участі сторонніх атомів. Останні здатні частково блокувати міжатомні зв'язки:

$$L_M - E_{Ma} \geq 0 \quad (2.6)$$

де L_M - енергія сублимації оброблюваного матеріалу; E_{Ma} — енергія розриву хемосорбційного зв'язку метал — адсорбована молекула.

Для значного зниження міцності більшості матеріалів, використовуваних у техніці, достатньо, щоб вільна енергія поверхневої взаємодії коливалася в межах 50–100 кДж/моль. Ефект Ребіндера проявляється у різних ступенях для всіх типів і структур твердих тіл. Явище зумовлене численними фізико-хімічними факторами, такими як хімічний склад матеріалу і середовище, що визначає характер та інтенсивність міжатомних взаємодій; реальна структура твердого тіла; умови його деформації і руйнування. Сукупність цих факторів спричиняє прояв ефекту Ребіндера у різноманітних формах — від полегшення пластичного деформування до значного зниження міцності, що може призвести до ламкості та навіть до спонтанного розпадання твердого тіла на колоїдні частки. Зниження поверхневої енергії твердої речовини, яке призводить до змін її механічних властивостей, можливо здійснити кількома способами: шляхом оборотної адсорбції поверхнево-активних атомів і молекул із навколишнього середовища, хемосорбції, електричної поляризації поверхні, запуску хімічних реакцій на поверхні або за допомогою нанесення рідких середовищ зі схожою молекулярною природою. Адсорбція. Орієнтовні розрахунки демонструють, що максимальне зменшення поверхневої енергії ($\Delta\sigma$) твердої речовини внаслідок фізичної адсорбції не перевищує 10% від початкової величини. Тому адсорбція органічних поверхнево-активних речовин істотно полегшує руйнування матеріалів із малою енергією зв'язків у їхній решітці, таких як молекулярні сполуки, деякі іонні кристали, легкоплавкі метали та полімери. У процесі деформації металів адсорбція органічних речовин спричиняє зниження границі

текучості й коефіцієнта зміцнення, що супроводжується скороченням відстані між дислокаційними лініями ковзання. Це, у свою чергу, сприяє значному пластифікуванню монокристалів і полікристалічних металів у низці випадків. Особливість таких процесів полягає в тому, що великі органічні молекули не здатні проникати в об'єм твердої речовини, дія залишається обмеженою лише її поверхнею; найбільший ефект забезпечує мономолекулярний шар ПАР.

Таблиця 2.5. Вплив добавок до нітритно-содового розчину на стійкість різального інструменту при точінні сталі X18H9T.

МОР	Стійкість T , хв, різального інструменту при наступних режимах різання	
	$v=0,1$ м/с; $S_0=0,07$ мм/об; $t=0,4$ мм	$v=0,27$ м/с; $S_0=0,074$ мм/об; $t=1,95$ мм
Нітритно-содовий розчин	29	75
Те ж, з добавкою олеата триетаноламіна	43	91
Те ж, з добавкою триетаноламінового ефіру олеїнової кислоти	55	130

Концентрація добавки в кожному випадку становила 0,5% (мас. частка).

У зазначених умовах експлуатації значно ефективніше виявляє себе ефір олеїнової кислоти, який сприяє суттєвому підвищенню зносостійкості різальних елементів. Як перспективна добавка до комерційних водо-емульсійних мастильно-охолоджувальних рідин (МОР), ефективною є суміш ефірів високомолекулярних кислот талового масла (олеїнової, лінолевої, ліноленої) з триетаноламіном, що випускається під назвою «Емультал». Використання такої суміші дозволяє не лише продовжити термін експлуатації обладнання, а й покращити антикорозійні властивості МОР. Хемосорбція виявляється більш енергетично доцільною в умовах механічної обробки. Під час різання металів відбувається постійне оголення новоутворених ювенільних поверхонь. Атоми цих поверхонь характеризуються високою реакційною здатністю та можуть взаємодіяти з молекулами органічних поверхнево-

активних речовин (ПАР), присутніх у технологічному середовищі. Оскільки енергія взаємодії, характерна для хемосорбції, значно перевищує показники фізичної адсорбції й може сягати десятків кДж/моль, це забезпечує ефективнішу компенсацію розриву зв'язків і суттєве зниження вільної поверхневої енергії твердого матеріалу. У результаті міцність оброблюваного матеріалу зменшується, а в процесі різання більш чітко проявляються пластифікуюча і ріжуча функції мастильно-охолоджувальної технологічної рідини (МОТР). Максимальна інтенсивність процесу різання досягається при певному значенні енергії хемосорбції $Q_{ат}$, яке відповідає поверхневій енергії см оброблюваного металу.

$$Q_{ат} = 2KT \ln \left(\frac{12D_0}{zv} \right) \quad (2.7)$$

де z — параметр, близький до розміру зерна в полікристалі; D_0 — передекспонент у коефіцієнті поверхневої дифузії, що залежить від будови матеріалу і швидкості міграції адсорбованих атомів по оброблюваній поверхні; v — швидкість переміщення інструмента відносно оброблюваної поверхні; T — температура; K — константа Больцмана.

Протікання хемосорбційних процесів часто супроводжується механохімічними явищами, що приводять до утворення активних часточок (радикалів). Звичайне протікання механохімічних процесів зв'язують із випускненням екзоелектронів.

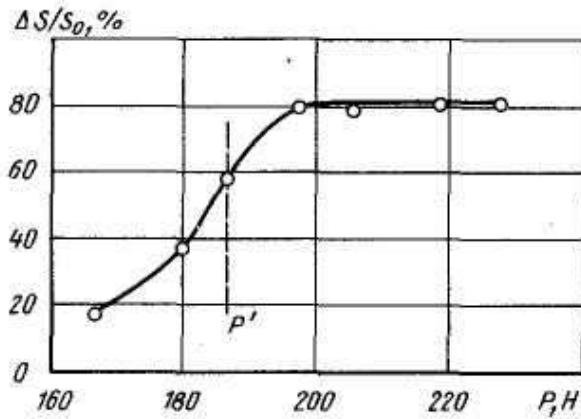


Рис. 2.7. Залежність відносної зміни поздовжньої подачі $\Delta S/S_0$ від навантаження P при точінні сталі 45 в α -хлортолуолі ($\Delta S = S_a - S_0$; S_a, S_0 — поздовжня подача відповідно на повітрі і в активному середовищі). Умови випробувань: $v = 2,9 \cdot 10^{-3}$ м/с; $t = 0,8$ мм.

Прояв ефекту Ребіндера зумовлений каталітичною активністю щойно відкритої металевої поверхні, на якій галогеновмісні поверхнево-активні речовини (ПАР), присутні у технологічному середовищі, піддаються хімічному розкладу. У процесі цього виділяються вільні атоми галогенів, які адсорбуються на поверхні оброблюваного матеріалу. Інтенсифікації таких реакцій сприяє наявність у робочому середовищі кисню та водяної пари. Водночас за умови надмірного вмісту кисню та підвищеної хімічної активності металу, що обробляється, ефективність середовища знижується внаслідок пасивації поверхні, що стримує розміцнюючу дію. Унаслідок подальших електрохімічних реакцій за участі води та продуктів її каталітичних перетворень можливе утворення атомарного водню. Останній сприяє полегшенню механічної обробки перехідних металів і їх сплавів. Значну роль відіграє виділення водню при каталітичному розкладанні органічних компонентів мастильно-охолоджувальних рідин (МОР) у процесі обробки напівпровідникових матеріалів, таких як кремній та арсенід галію. У цих випадках утворений водень сприяє підвищенню інтенсивності диспергування завдяки формуванню додаткових адсорбційних центрів на оброблюваній поверхні. При використанні органічних хлоро- та йодозаміщених

сполук як компонентів МОР формування активних часток може бути обумовлене іншими механізмами. Зокрема, вплив цих сполук на ефективність процесу токарної обробки за умов постійного навантаження на різальний інструмент (визначення ефективності МОР здійснювалось за показниками збільшення поздовжньої подачі порівняно з обробкою без застосування середовища) стає помітним лише після досягнення певного критичного навантаження (P'). Значення цього критичного навантаження залежить від хімічної структури молекули активної речовини. При сталій швидкості різання значення P' демонструє лінійну залежність від енергії руйнування зв'язку між атомами вуглецю і галогену через радикальний механізм. Розрахунки показують, що при досягненні критичного навантаження напруження у зоні різання стають достатніми для розриву молекули активної речовини. Це свідчить про початок механохімічних процесів, у результаті яких формуються активні частинки (радикали). Їх дія сприяє полегшенню руйнування та пластичної деформації оброблюваного металу. Варто зазначити, що пластифікуюча та різальна дії середовища не проявляються за умов напружень нижчих за критичні значення. Водночас змащувальний вплив МОР спостерігається у ширшому діапазоні контактних тисків.

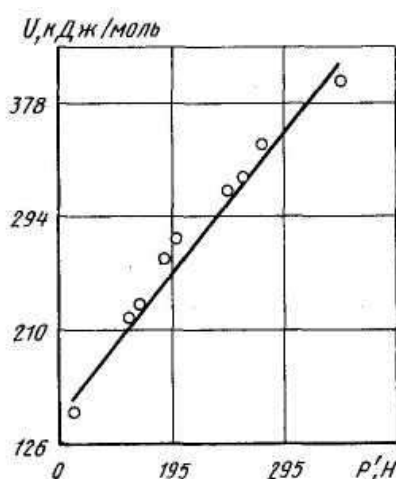


Рис. 2.8. Залежність критичного навантаження P' від енергії деструкції U молекул МОР при точінні сталі 45 (активні речовини: йод, йодистий гексил, йодистий метилен, йодбензол, чотирихлористий вуглець, хлороформ, хлористий метилен, хлорбензол). Умови випробувань: $v=2,9 \cdot 10^{-3}$ м/с; $t=0,8$ мм.

Процеси утворення поверхневих з'єднань за своїм характером і енергією взаємодії близькі до хемосорбції. Вони відбуваються через відносно низькоенергетичні хімічні реакції, такі як обмінні реакції, окисно-відновні процеси та утворення координаційних з'єднань. Зазвичай достатньо, щоб вільна енергія реакції становила 50-100 кДж/моль. Однак більш інтенсивний перебіг реакції не сприяє процесу обробки, оскільки активні частинки (атоми, іони, молекули) занадто сильно зв'язуються з поверхнею твердого тіла. У такому стані вони втрачають свою рухливість і не можуть проникнути у вершину зони руйнування. Наприклад, при свердлінні нікелю, поверхнева енергія якого становить близько 63 кДж/моль, найефективнішими виявилися хлориди ртуті та розчин йоду в етанолі. Для кварцу значний вплив демонструють лужні розчини та водний розчин плавикової кислоти. У випадку алюмооксидної кераміки найбільш ефективними є деякі неорганічні солі.

Таблиця 2.6. Вплив різних середовищ на параметри свердління нікелю.

Середовище	Концентрація активної речовини, с, моль/л	Поздовжня подача при свердлінні, мм/с		Відносна зміна поздовжньої подачі $(\Delta S/S_0)100$, %	Розрахована теплота передбачуваної реакції кДж/моль
		без охолодження	у досліджуваном у середовищі		
Вода	-	0,18	0,21	16	-
Етанол	-	0,18	0,20	11	-
Розчин I ₂ в етанолі	1	0,16	0,53	230	-88
Водні розчини:					
Hg(NO ₃) ₂	0,5	0,18	0,17	-5	-185
HgCl ₂	0,2	0,20	0,75	275	-92
HCl	1	0,12	0,13	8	29

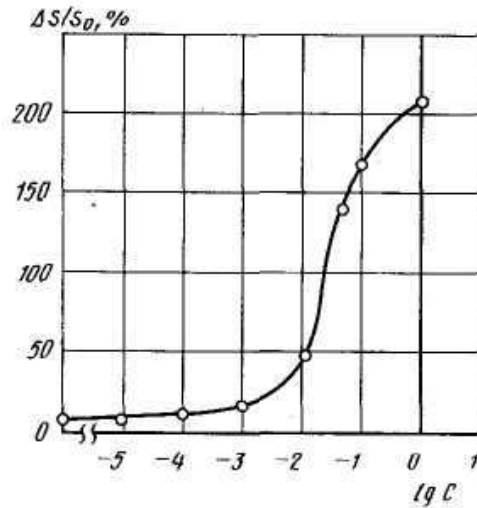


Рис. 2.9. Залежність відносної зміни поздовжньої подачі $\Delta S/S_0$ від концентрації C (вісь абсцис — $\lg C$ спиртового розчину йоду при свердлінні нікелю. Осьове навантаження $P=150H$).

Для досягнення оптимальної ефективності мастильно-охолоджувальних технологічних речовин (МОТР) потрібна достатньо висока концентрація активної речовини. Наприклад, під час свердління нікелю максимальну результативність демонструє насичений розчин йоду в спирті з концентрацією до 20%. Однак для досягнення швидкості проникнення свердла, що всього на 20% поступається максимальному показнику, достатньо використовувати розчин із концентрацією, меншою на порядок (див. рис. 2.9). Ефект змочування дозволяє значно знизити вільну поверхневу енергію, а отже, і міцність твердих тіл. Максимальний результат досягається за умов використання розплавів, близьких за фізико-хімічними властивостями до матеріалу обробки. Застосування таких поверхнево-активних розплавів сприяє суттєвому підвищенню інтенсивності обробки твердих матеріалів. Пластифікуюча та ріжуча дія МОТР проявляється лише за умови одночасного перебігу процесів розриву і перебудови зв'язків у матеріалі, компенсованих активними компонентами МОТР через фізико-хімічну взаємодію. Це передбачає необхідність присутності активного середовища безпосередньо в зоні різання. Подача МОТР у зону різання здійснюється двома механізмами. Основну

частину шляху від поверхні інструмента рідина долає завдяки капілярному проникненню по дефектах, що виникають між стружкою та інструментом. У безпосередній близькості до зони різання, де зазор зводиться до розмірів молекул, процес надходження МОТР забезпечується через поверхневу дифузію активного компонента. Максимальна швидкість міграції активної речовини з найближчого джерела може бути визначена формулою $v_{\max} = v_0 b \exp[-Q/(KT)]$, де Q – енергія активації поверхневої дифузії, v_0 – частота коливань атомів, b – параметр ґраток матеріалу, K – константа Больцмана. При обробці різанням із помірними швидкостями температура рідкого середовища лише незначно перевищує середню температуру в зоні різання. У таких умовах v_{\max} значною мірою залежить від інтенсивності взаємодії на межі поділу фаз. З підвищенням цієї інтенсивності максимальна швидкість обробки знижується: за таких умов час, необхідний для надходження середовища у зону руйнування, стає обмежуючим фактором. Наприклад, для йодистого гексила та йодистого метилену v_{\max} становить 17,5 і 13,5 см/с відповідно, і при перевищенні цих значень ефективність середовища помітно погіршується (див. рис. 2.10). Для практичного результату енергія активації міграції не повинна перевищувати 20–40 кДж/моль. У такому випадку поверхнева дифузія забезпечує оперативне постачання активних компонентів у зону різання. Однак при швидкостях понад 30 см/с вплив середовища знову збільшується, що може бути спричинено підвищенням швидкості дифузії через зростаючу температуру в зоні різання. Додатково подолання зовнішнього тиску, який притискає інструмент до деталі та ускладнює проникнення МОТР у зону різання, забезпечується завдяки двовимірному тиску адсорбційних шарів. Він утворюється різницею між поверхневою енергією чистого матеріалу і матеріалу, вкритого мономолекулярним шаром поверхнево-активної речовини (ПАР). У сильно активних середовищах згаданий тиск може досягати 1000 МПа

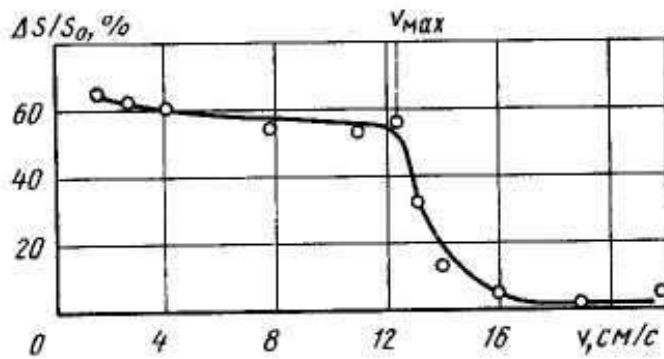


Рис. 2.10. Залежність відносної зміни поздовжньої подачі $\Delta S/S_0$ від швидкості різання v при точінні сталі 45 у йодистому метилені.

Технологічне середовище значно впливає на полегшення та прискорення процесів обробки металів різанням. Ефективність його пластифікуючої та ріжучої дії залежить не лише від правильного вибору матеріалу обробних середовищ (МОТР), які мають бути активними стосовно конкретного оброблюваного матеріалу, та режимів різання, що визначаються термодинамічними і кінетичними умовами. Значний вплив також має вибір інструмента: його геометричні параметри, якість заточення та гострота ріжучої кромки. Лише оптимальне поєднання всіх цих факторів дозволяє максимально проявити ефект Ребіндера при обробці металів різанням. Залежно від умов виконання операцій, середовище може або сприяти пластифікації поверхні, або полегшувати сам процес руйнування матеріалу. Відповідно, активні середовища по-різному впливають на пластифікаційні та ріжучі властивості МОТР. Наприклад, при таких процесах, як вигладжування чи протягування із застосуванням деформуючих протягів, більший акцент ставиться на пластифікуючих властивостях. У той час як при операціях, що супроводжуються утворенням стружки (точіння, свердління, фрезерування, шліфування), перевагу мають ріжучі властивості МОТР. Функціональні властивості МОТР залежать від його складу. Однак технологічні характеристики виявляються лише в ході реальної експлуатації або під час спеціальних технологічних випробувань. Основними експлуатаційними характеристиками МОТР є здатність до зменшення зношення та забезпечення

стійкості інструмента, підвищення продуктивності процесу металообробки, покращення якості оброблених поверхонь деталей та інші параметри. Вибір показників оцінки, їх кількісних характеристик та методів вимірювання визначається конкретними технологічними умовами, в яких застосовується даний тип МОТР.

2.4. Охолоджувальна здатність МОТР.

Основними джерелами тепловиділення в процесі різання виступають зона формування стружки, а також ті частини передньої і задньої поверхонь ріжучого інструмента, які контактують як із оброблюваним матеріалом, так і зі стружкою. Кількість виділеної теплоти збільшується зі зростанням швидкості різання і, хоча й меншою мірою, залежить від збільшення подачі та глибини різання. При обробці пластичних матеріалів, зокрема сталей, тепловиділення відбувається значніше у порівнянні з обробкою крихких матеріалів, таких як чавун. Охолоджувальні властивості мастильно-охолоджувальних технологічних рідин (МОТР) мають суттєвий вплив на довговічність інструмента, якість оброблюваної поверхні, зокрема її шорсткість, а також на точність механічної обробки. Особливо це стосується процесів наростоутворення, резидуальних напружень у поверхневих шарах і формування радіусу закруглення витків стружки. Властивості охолодження безпосередньо залежать від хімічного складу МОТР, їхніх фізико-хімічних характеристик і теплофізичних параметрів. Використання органічних і мінеральних солей може сприяти руйнуванню парової плівки, яка виконує функцію теплового бар'єра, а також змінювати температурні умови переходу з бульбашкового до плівкового режиму кипіння рідини. Ефективна змочуваність металевої поверхні за рахунок МОТР збільшує площу теплопередачі під час обробки різанням. На охолоджувальні властивості МОТР значний вплив мають такі показники, як в'язкість, теплопровідність, питома теплоємність і теплота випаровування. Вибираючи МОТР за її охолоджувальними характеристиками, необхідно

звертати увагу на те, що для кожного типу інструментального матеріалу існує оптимальна температура, при якій забезпечується максимальна зносостійкість ріжучого інструмента. Наприклад, для швидкорізальних сталей марок Р6М5, Р9 та Р18 підвищений термін експлуатації досягається при температурі 297 °С; для твердих сплавів, як-от ВК8 і Т15К6, оптимальні температури складають відповідно 197 °С та 777 °С. Покращення охолоджувальних властивостей МОТР сприяє підвищенню довговічності інструмента при роботі з матеріалами, які характеризуються значним тепловиділенням на високих швидкостях різання – особливо у випадках, коли температура різання наближається до критичних значень. Використання МОТР дозволяє суттєво знизити температуру в зоні різання при швидкостях обробки до 150 м/хв. При перевищенні цих швидкостей мастильно-охолоджувальні рідини виконують переважно стабілізаційну функцію для температури оброблюваної деталі. Стійкість інструмента T залежить від температури t у зоні різання за певною функціональною залежністю.

$$T = \frac{C}{t^n}, \quad (2.8)$$

де C - коефіцієнт.

Наприклад, під час проходження стали 9ХС різцями із твердого сплаву Т15К6 при товщині зрізу 0,1 мм зниження середньої температури стружки з 700 до 600 °С дозволило збільшити стійкість інструмента з 60 до 90 хвилин. Зменшення температури інструмента та оброблюваної деталі у процесі різання сприяє підвищенню точності обробки завдяки мінімізації температурних деформацій. Ефективний теплообмін за допомогою мастильно-охолоджувальних рідин (МОР) також знижує радіус завивання стружки, оскільки спричинює різницю теплових розширень між зовнішньою та внутрішньою сторонами стружки. Крім того, інтенсивне охолодження оброблюваної деталі запобігає приварюванню стружки до інструмента і значно знижує сили різання. Існують навіть спеціальні методи, наприклад, низькотемпературне шліфування міді, зануреної у рідкий азот при температурі -70 °С. Однак застосування МОР може

супроводжуватися й негативними впливами. Наприклад, у випадках переривчастого різання, як-от при фрезеруванні або струганні твердосплавними інструментами на високих швидкостях, використання МОР призводить до великих коливань температури ріжучої частини інструмента, що знижує його стійкість. Інтенсивне охолодження поверхні деталі часто викликає утворення внутрішніх розтягуючих напружень, які погіршують експлуатаційні характеристики деталі. Крім того, охолодження зони різання може збільшити сили різання через вплив температури на міцність оброблюваного металу. У зонах низьких швидкостей різання ступінь зношування інструмента значною мірою залежить від інтенсивності нарощування, яке визначається температурним режимом і фізико-механічними характеристиками матеріалу. В окремих випадках застосування МОР здатне погіршити ситуацію, зумовлюючи зміщення піка зношування у бік більших швидкостей різання.

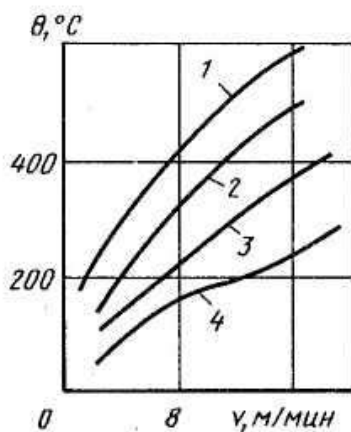


Рис. 2.11. Вплив способу підведення МОР на температуру свердління сталі 12Х11Н9Т при різних швидкостях різання ($d = 19$ мм; $S_0 = 0,19$ мм/об):
 1 - без МОР; 2 - подача емульсії поливом; 3 - подача МОР через внутрішні канали у свердлі при звичайному тиску; 4 - те ж, що і поз. 3, але при тиску 5 МПа.

Зниження температури різання при використанні мастильно-охолоджувальних рідин (МОР) відбувається здебільшого завдяки ефективному відведенню тепла з поверхонь інструмента, які не контактують зі стружкою, але

межують із зоною різання. У свою чергу, збільшення інтенсивності тепловіддачі від стружки має менший вплив через короткий час її контакту з інструментом. Для посилення тепловідведення в інструментах створюють внутрішні порожнини, заповнені рідинами чи матеріалами з низькою температурою плавлення й високою теплоємністю, такими як вода, фреон чи спеціальні метали. Застосування внутрішнього охолодження здатне підвищити ресурс різців із твердосплавними пластинами, які не заточуються, на 70-100% порівняно з інструментом без охолодження. Це особливо ефективно при таких процесах, як свердління, зенкерування або розгортання. Подавання МОР через канали всередині інструменту не тільки сприяє кращому видаленню стружки, але й зменшує тепловий вплив між стружкою та інструментом, що, в свою чергу, продовжує термін служби інструменту. На рисунку 2.11 зображено залежність температури різання сталі 12X18H9T від способу подавання МОР під час свердління. При цьому використовували свердла з діаметром 19 мм та подачею 0,19 мм/об. Результати свідчать, що внутрішнє охолодження істотно перевершує полив за ефективністю зниження температури. Зокрема, застосування високонапірного охолодження емульсією значно знижує температуру в процесі різання. Використання вуглекислого газу під високим тиском через канали поблизу ріжучої кромки дозволяє охолоджувати сопло до нульових температур, що знижує зношування твердосплавних інструментів при обробці титанових та інших важкооброблюваних матеріалів. Значне зростання стійкості різців спостерігалось при подачі стиснутого повітря, охолодженого до $-56\text{ }^{\circ}\text{C}$ (зі звичайних $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$), що при швидкості обробки сталі 30 м/хв збільшило їх ресурс у чотири рази. Аналогічні результати отримано при застосуванні рідкого азоту і вуглекислоти. Водночас дослідження методом природної термопари показали, що ефективність охолодження МОР зменшується зі збільшенням товщини стружки та швидкості різання. Інтенсивність охолодження значно підвищується при використанні розпиленних рідин, які подаються в робочу зону під тиском 0,2-0,4 МПа зі швидкістю

струменя кілька сотень метрів за секунду. Розпилення забезпечує охолоджувальний ефект не лише за рахунок теплообміну, але й через випаровування рідини, що робить цей метод особливо ефективним для обробки важких матеріалів або у випадках, коли потрібен постійний візуальний контроль за процесом. При шліфуванні профільних поверхонь абразивним кругом ПП 250x75x13 на плоскошліфувальному верстаті ЗЕ711В-1 із проектором використання розпиленої водної МОР дозволило в середньому на 65% зменшити температуру різання і на 50% скоротити кількість припалів. При застосуванні масляної МОР температура нагрівання знизилася на 23%, а кількість припалів – на 30%.

Застосування шліфування зі струменевою подачею мастильно-охолоджувальної рідини (МОР) на верстаті з проектором є недоцільним, оскільки це унеможлиблює візуальний контроль зони контакту шліфувального круга з оброблюваною деталлю. Охолодження здійснювали водяним розчином, що містив 0,5% триетаноламіну і 0,3% нітриту натрію, або маслом ОСМ-3. Швидкість різання становила 35 м/с, а поздовжня подача стола варіювалася в межах 15 м/хв; глибина шліфування складала 0,04-0,2 мм. Поперечна подача встановлювалася у діапазоні 0,4-1,2 мм на хід стола. Витрата водної МОР змінювалася від 0 до 450 г/год, тоді як витрата масляної МОР дорівнювала 5 г/год. У процесі шліфування використовувалися зразки прямокутної форми розміром 200x45x65 мм, виготовлені зі сталей ХВГ (59-63 HRCэ), 45 (42-46,5 HRCэ) та У10А (59-63 HRэ). Для забезпечення високої швидкості теплообміну у зоні різання застосовують рідкі метали як технологічне середовище. Вони мають чудову теплопровідність, більш високу температуру кипіння та значно кращий коефіцієнт тепловіддачі в порівнянні з водними й масляними МОР. Оцінити охолоджувальні властивості мастильно-охолоджувальних технологічних рідин (МОТР) без експериментів на металах можна шляхом аналізу швидкості зниження температури нагрітого зразка, зануреного у МОР. При проведенні експериментів використовують термопару, нагріту до високих

температур, а спеціальне безінерційне обладнання дозволяє реєструвати швидкість її охолодження у досліджуваній МОТР. Методика визначення охолоджувальних характеристик МОТР базується на розрахунках питомого теплового потоку q від твердого тіла з температурою t_t до рідини згідно з рівнянням Ньютона.

$$q = \alpha (t_t - t_{ж}), \quad (2.9)$$

де α - коефіцієнт тепловіддачі;

$t_{ж}$ – температура рідини.

Чим більше коефіцієнт тепловіддачі, тим краще МОТР відводить теплоту від різального інструменту, стружки і деталі. Тепловідвід при різанні відбувається внаслідок конвекції, теплопровідності, випромінювання і хімічних реакцій, що протікають із поглинанням теплоти, тобто процесів, що супроводжуються складним тепло- і масообміном.

Теплообмін випромінюванням $q_{и}$ стає значним при нагріванні твердого тіла понад 800 °С:

$$q_{и} = \varepsilon \sigma_0 t^4 \quad (2.10)$$

де ε – коефіцієнт чорноти, визначений експериментально ($0 \leq \varepsilon \leq 1$); σ_0 – константа випромінювання абсолютно чорного тіла; t – температура випромінюючої поверхні.

Електронний оже-аналіз свідчить, що хімічна взаємодія мастильно-охолоджувальної рідини (МОТР) з обробленою поверхнею обмежується лише найбільш поверхневими шарами матеріалу. При обробці металів методом різання із застосуванням МОТР теплові процеси, пов'язані з випромінюванням та хімічними реакціями, у більшості випадків є незначними. Виняток становлять деякі мастильно-охолоджувальні рідини з вмістом полімерів, у яких під час деструкції полімеру відбувається значне поглинання теплової енергії. Таким чином, при оцінюванні охолоджувальної ефективності МОТР зазвичай достатньо враховувати лише конвективний теплообмін, тобто той, що пов'язаний з рухом рідини та її теплопровідністю. На інтенсивність передачі тепла суттєвий вплив

має природа потоку рідини — чи він є ламінарним, чи турбулентним, причому цей характер визначається через число Рейнольдса.

$$Re = \frac{wD_{\text{ЭКВ}}}{\nu}, \quad (2.11)$$

де w – середня швидкість потоку рідини, м/с; $D_{\text{ЭКВ}}$ – еквівалентний діаметр, м; ν – кінематична в'язкість рідини, м²/с.

При $Re \leq 2000$ потік рідини залишається ламінарним. Еквівалентний діаметр залежить від площі s і периметра U поверхні твердого тіла (стружки, різця або деталі), омиваної МОР:

$$D_{\text{ЭКВ}} = \frac{4s}{U}, \quad (2.12)$$

середня швидкість потоку рідини

$$w = \frac{Q}{0,06s_0}, \quad (2.13)$$

де Q - витрата МОР, л/хв; s_0 - площа труби, по якій подається МОР, мм².

Кінематична в'язкість ν визначається відношенням динамічної в'язкості і щільності рідини:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}. \quad (2.14)$$

Конвективний теплообмін між рідиною і поверхнею твердого тіла визначається по числу Нусельта, що являє собою безрозмірний коефіцієнт тепловіддачі:

$$Nu = \alpha \frac{D_{\text{ЭКВ}}}{\lambda}, \quad (2.15)$$

де λ - теплопровідність рідини, Вт/(м. К).

Фізичні властивості рідини характеризуються числом Прандтля, що являється відношенням фізичних констант:

$$Pr = \frac{\nu}{a}, \quad (2.16)$$

де $a = c/\rho$ – температуропровідність (c – питома масова теплоємність).

Вплив температури на фізичні властивості враховують за допомогою поправки $Pr/Pr_{\text{п.с}}$. Число Прандтля Pr знаходять по температурі МОР, поданої в

зону різання, а $Pr_{п.с}$ – число Прандтля в прикордонному шарі – визначають по фізичних властивостях рідини при температурі твердого тіла в зоні контакту із МОР. Середній коефіцієнт тепловіддачі повітря або рідини можна визначити по формулі:

$$Nu = cRe^n Pr^m (Pr/Pr_{п.с})^{0.25} . \quad (2.17)$$

Узагальнення експериментальних досліджень коефіцієнтів тепловіддачі дротиків і трубок у поперечному потоці повітря, води, трансформаторного масла дозволили вивести наступні рівняння:

при $Re = (5...1)10^3$

$$Nu = 0,5Re^{0,5} Pr^{0,38} (Pr/Pr_{п.с})^{0.25} ; \quad (2.18)$$

для повітря ця формула спрощується і приймає вигляд:

$$Nu = 0,43Re^{0,5} ; \quad (2.19)$$

при $Re=1 \cdot 10^3...2 \cdot 10^5$

$$Nu = 0,25Re^{0,6} Pr^{0,38} (Pr/Pr_{п.с})^{0.25} ; \quad (2.20)$$

для повітря

$$Nu = 0,216Re^{0,6} .$$

Рівняння (2.18) і (2.20) дозволяють оцінити, як теплофізичні властивості мастильно-охолоджувальної рідини (МОР) впливають на коефіцієнт тепловіддачі. Зростання цього коефіцієнта відбувається за рахунок підвищення теплопровідності і швидкості руху рідини, тоді як його зниження спостерігається при збільшенні площі охолоджуваної поверхні, температуропровідності та динамічної в'язкості рідини. Коефіцієнт тепловіддачі знаходиться також у залежності від температури прикордонного шару. Із підвищенням щільності теплового потоку або збільшенням різниці температур між твердим тілом і рідиною на поверхні утворюються парові бульбашки, які позитивно впливають на процес тепловіддачі. У момент переходу від бульбашкового кипіння до плівкового відбувається їх злиття в неперервний паровий потік. Це спричиняє зниження коефіцієнта тепловіддачі, оскільки паровий шар характеризується відносно низькою теплопровідністю. Для визначення тепловіддачі під час кипіння застосовується формула:

$$\frac{\alpha_1}{\alpha} = \sqrt[n]{\left(1 + \frac{\alpha_{00}}{\alpha}\right)^n}, \quad (2.21)$$

де α_1 – коефіцієнт тепловіддачі киплячої рідини; α – коефіцієнт тепловіддачі при відсутності кипіння; $\alpha_{00} = Cq^{0,7}$ – коефіцієнт тепловіддачі при розвиненому кипінні, коли вже немає впливу швидкості плинну рідини (C – коефіцієнт пропорційності, що залежить від тиску; $C = 3,2$ при $p = 10 \cdot 10^{-5}$ Па для умов кипіння води в чистій трубі; q – тепловий потік).

Теплофізичні характеристики рідин при високих температурах мало вивчені, що ускладнює розрахунок коефіцієнта тепловіддачі по формулах (2.18) і (2.20). Відношення в цих рівняннях $(Pr/Pr_{п.с})^{0,25}$ можна представити у вигляді поправочного коефіцієнта K_1 , значення якого при обробці різанням змінюються від 1,5 до 2. У цьому випадку при плинні рідини з $Re = (5 \dots 1)10^3$

$$Nu = 0,5K_1 Re^{0,5} Pr^{0,38}; \quad (2.22)$$

з $Re=1.103 \dots 2.105$

$$\text{Nu} = 0,25K_1 \text{Re}^{0,6} \text{Pr}^{0,37} ;$$

(2.23)

Розрахунки за наведеними залежностями демонструють, що використання масляних мастильно-охолоджувальних рідин (МОР) замість водних призводить до зменшення коефіцієнта тепловіддачі у 5-8 разів. Однак при застосуванні водних МОР підвищуються сили тертя та пластичні деформації під час різання металу, що, своєю чергою, зумовлює збільшення теплових потоків, які виникають у процесі. Тому температура в зоні різання знижується не пропорційно коефіцієнту тепловіддачі, а за більш складною залежністю. Підвищення температури в зоні різання через кілька секунд після початку подачі МОР можна пояснити переходом від стадії бульбашкового кипіння до плівкової. Як показали експерименти з точіння заготовок із сталі 30ХГСА твердосплавним різцем ВК8, температура різання в момент першої подачі МОР зменшувалася з 830-850 °С до 600-650 °С. Однак уже через 3-4 секунди вона підвищувалася до 780-800 °С, після чого стабілізувалася на цьому рівні. Суцільний паровий шар можна усунути шляхом подачі струменя МОР під тиском, механічного руйнування плівки або застосування ультразвукових коливань.

3. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ І ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МОТР ДЛЯ ПРОЦЕСІВ РІЗАННЯ МЕТАЛІВ

Триботехнічні випробування мастильних матеріалів спрямовані на визначення їхніх протизношувальних, протизадирних та антифрикційних властивостей. Для цього використовуються різноманітні лабораторні прилади та установки із зразками простої геометричної форми (площини, циліндри, сфери), а також імітуючі машини, що працюють із серійними деталями машин або спеціально виготовленими компонентами, такими як зубчасті колеса, елементи поршневої групи двигунів, підшипники ковзання чи кочення тощо. Також випробування можуть проводитися безпосередньо в реальних вузлах машин та механізмів за умов їхньої експлуатації. У ході таких експлуатаційних випробувань важливі параметри, такі як відносна швидкість руху поверхонь, тиск і температура, взаємодіють із різноманітними зовнішніми факторами. Наприклад, часті зупинки та запуски машин, зміни навантаження та швидкості, наявність вологи, корозійних речовин або абразивних частинок у навколишньому середовищі. У таких умовах складно визначити єдиний вирішальний параметр, що впливає на поведінку мастильного матеріалу. Щоб мінімізувати ці впливи, дослідження в реальних умовах повинні тривати довгий час і включати випробування на кількох однотипних машинах. Однак такі випробування є досить витратними за часом та ресурсами. Тому в більшості випадків експлуатаційні дослідження використовуються для остаточної перевірки мастильних матеріалів, які пройшли попередній відбір під час лабораторних і стендових експериментів. Стендові випробування проводяться на імітуючих машинах й дають змогу оцінити трибологічні характеристики мастильних матеріалів у реальних умовах тертя окремих деталей. При цьому можна контролювати усі ключові параметри, що впливають на результати. Однак такі дослідження також часто є затратними за часом та фінансовими ресурсами. Їх використовують головним чином для аналізу протизношувальних і протизадирних властивостей масел для зубчастих коліс або для комплексної оцінки моторних мастильних олив на різного типу стендах (одно- і багаточиліндрових установках, тестових стендах для підшипників ковзання або кочення). На відміну від вищезгаданих методів,

лабораторні випробування є менш затратними за часом і дозволяють значно точніше змінювати умови тертя та виділяти головний параметр, що впливає на трибологічні характеристики мастильного матеріалу. Хоча умови в лабораторії суттєво відрізняються від реальної роботи машин, цей метод широко використовується завдяки можливості контролювати такі фактори, як навантаження, швидкість і температура, а також вимірювати силу тертя й зношування. Крім того, лабораторні випробування потребують мінімальної кількості досліджуваного мастильного матеріалу, що робить цей підхід особливо корисним при розробці нових присадок та композицій. Лабораторні випробування мастильних матеріалів поділяють на два основних види: 1) прямі – проводяться на спеціальних приладах і машинах у реальних умовах тертя твердих тіл; 2) непрямі – оцінка мастильної дії здійснюється через фізико-хімічні параметри без безпосереднього моделювання тертя між поверхнями. Під час оцінки триботехнічних властивостей мастил і пластичних змазок за допомогою лабораторних установок часто використовується принцип варіювання основного параметра, що впливає на поведінку мастильного шару у фрикційних контактах. Зношування сполучених деталей або інші ушкодження поверхонь тертя виникають внас

Чотирикулькова установка моделі ЧМТ-1, представлена на рис. 3.2, є сучасним інструментом для проведення випробувань. Її шпиндель, оснащений патроном для фіксації верхньої кульки, працює при частоті обертання в межах 1420-1450 оборотів за хвилину. Для експериментів використовуються стандартизовані кульки діаметром 12,7 мм відповідно до вимог ГОСТ 3722-81, які повинні мати не нижче другого ступеня точності та виробляються із сталі марки ШХ 15.

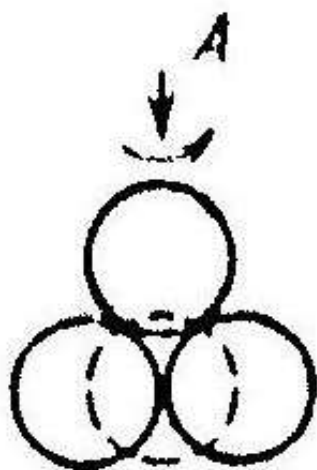


Рис 3.1. Схема тертя ковзання в чотирикульковій машині ЧМТ-1.

У цьому методі тестування три нерухомі кульки фіксуються всередині чаші, наповненої випробуваним мастильним матеріалом. Для забезпечення необхідної температури передбачений електронагрівач, який підігріває мастильний продукт. Крім того, встановлено пристрій для автоматичного відключення електродвигуна при досягненні критичного моменту тертя між кульками. Стандартизована методика випробувань регулюється згідно з ГОСТ 9490-75 та застосовується як до рідких, так і до пластичних мастильних матеріалів. Під час тестувань проводяться два типи експериментів. Короткочасні включають ступінчасте підвищення осьового навантаження, тоді як довготривалі розраховані на 4 години за постійного навантаження. У першому випадку тривалість кожного етапу дорівнює $10 \pm 0,2$ секунди. Для кожного заданого навантаження використовується нова проба мастила разом із чотирма свіжими кульками. По завершенні дослідів вимірюється діаметр плям зношування на трьох нижніх кульках з подальшим розрахунком середнього значення. Для забезпечення точності дослідів при однаковому навантаженні повторюються двічі.

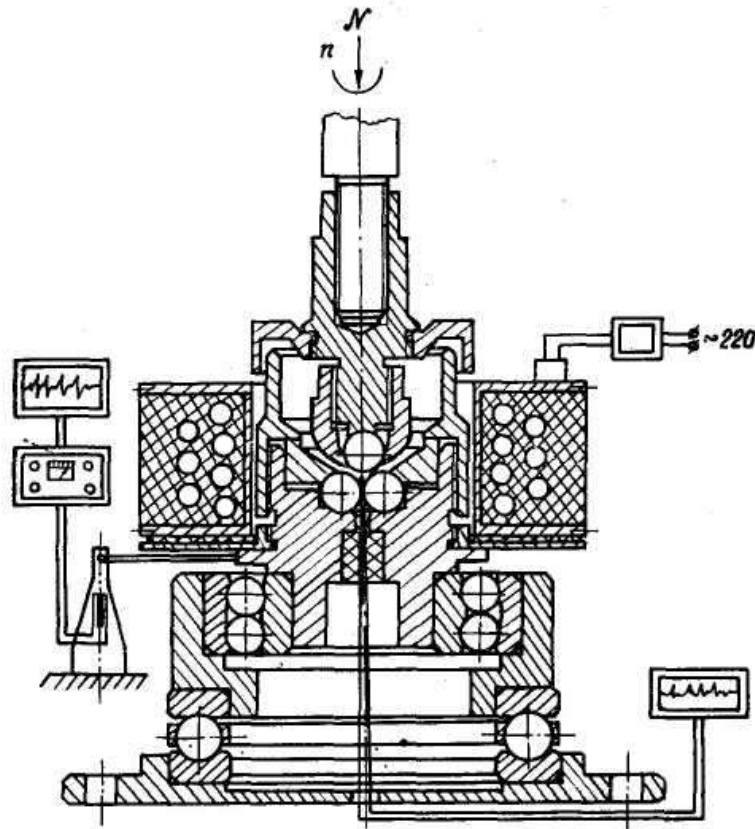


Рис. 3.2. Чотирикулькова машина тертя.

Короточасні випробування покликані визначити здатність мастильного матеріалу запобігати пошкодженню контактуючих поверхонь тертя, а також виявити його граничну навантажувальну спроможність. Основними критеріями оцінки вважаються: критичне навантаження R_k , за якого спостерігається різке збільшення діаметра плями зношування на нижніх кульках (понад 0,1 мм); навантаження зварювання R_s , при якому машина автоматично зупиняється через досягнення моменту тертя 1200 Н·м або через зварювання кульок; індекс задирання I_z – безрозмірний показник, що обчислюється на основі даних про знос кульок у діапазоні від початкового навантаження до навантаження зварювання. У випадку тривалих випробувань визначають показник зношування D_n , який описує вплив мастильного матеріалу на процес зношування контактних поверхонь при постійному навантаженні, значення якого є нижчим за критичне. Як показник зношування використовується середнє значення діаметра плям зношування нижніх кульок після завершення

випробувань 4 годинного випробування.

Таблиця 3.1. Технічна характеристика машини ЧМТ-1

Частота обертання шпинделя з верхньою кулькою, хв ⁻¹	1470±70
Радіальне і осьове биття верхньої кульки, мм	0,05
Осьова сила, Н	60-10000
Граничний момент тертя для автоматичного вимикання машини, Н·м	1,2
Діапазон регулювання температури, °С	20-220
Тривалість випробувань при заданому навантаженні в дослідках на заїдання, с	10
Тривалість випробувань в дослідках на зношування, хв	240
Напруга мережі змінного струму, В	380/220
Споживана потужність, кВт	2
Габаритні розміри установки, мм	1730×975×600
Маса, кг	230

Згідно з методичними рекомендаціями, визначеними в РД 50.531-85, під час досліджень на чотирикульковій установці використовується методика оцінки експлуатаційних характеристик мастильних матеріалів в умовах зношування. У рамках цього методу критеріями, що дозволяють визначити протизношувальні властивості мастильних матеріалів, є параметри лінійної апроксимації коефіцієнтів K та ρ_0 , які описують залежність інтенсивності зношування від контактної тиску між кульками, а також значення тиску, при якому процес зношування практично припиняється. Експеримент триває протягом 4 годин, що відповідає пробігу верхньої кульки приблизно 8-103 м по доріжці тертя за умови навантаження, яке не перевищує критичне для досліджуваного мастильного матеріалу. Під час випробувань замірювання діаметру плям зношування на нижніх кульках здійснюється через кожні 15 хвилин роботи. Отримані результати експериментів необхідно представляти у вигляді залежності інтенсивності зношування ($I = \Delta h / \Delta S$) від тиску в зоні контакту зразків. Висоту h , що відповідає зношеності об'єму кульок діаметром 12,7 мм із сталі марки ШХ 15, розраховують за допомогою відповідної формули, що враховує геометричні параметри та характер зношення зразка.

$$h = (39,4^2 - 2,732 \cdot 10^{-3} W/d) 10^{-3} \text{ мм,}$$

де d – середній діаметр плям зношування нижніх кульок, мм; W – осьове навантаження, Н; Δh – зношування нижньої кульки за шлях тертя ΔS (за 15 хв випробувань).

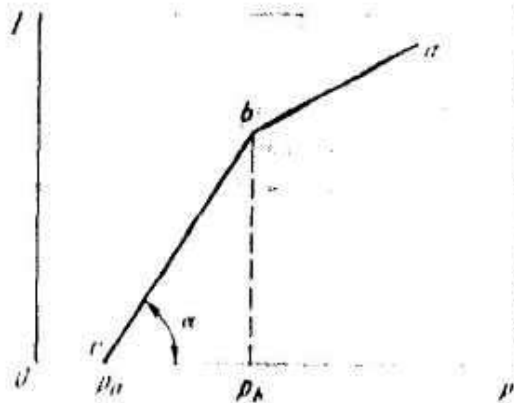


Рис. 3.3. Залежність інтенсивності зношування I від тиску p у контакті при випробуваннях на чотирикульковій машині.

Тиск у контакті p , обчислюють для кожного 15-хвилинного випробування

$$p = 1,0389W/d^2 .$$

Лінійна апроксимація залежності інтенсивності зношування від тиску має дві гілки (див. Рис. 3.3). У міру зношування в умовах граничного змащення (гілка ab) тиск падає до p_b . Подальше зношування відбувається в умовах напіврідинного змащення (гілка bc), і інтенсивність зношування падає практично до нуля при тиску p_0 у результаті поділу поверхонь тертя мастильним матеріалом. Чим більше величина p_0 й менше тангенс кута нахилу лінії bc до осі абсцис ($K = \operatorname{tg} \alpha$), тим вище протизношувальні властивості мастильного матеріалу: $I = K(p - p_0)$.

4. НАУКОВА НОВИЗНА РОБОТИ І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дане дослідження вперше системно аналізує процеси хімічної модифікації ріпакової олії та підтверджує можливість створення на її основі цілого ряду нових якісних і практично значущих продуктів. Встановлено, що такі продукти, зокрема базові масла як основа для дисперсійних середовищ та мастильно-охолоджувальних рідин для обробки металів, за експлуатаційними характеристиками не поступаються аналогам із нафтопродуктів. Ріпакова олія пропонується як перспективна поновлювана, екологічно безпечна, доступна сировина, хоча і з певними недоліками за якісними показниками. Актуальність хімічної модифікації ріпакової олії обґрунтована кількома факторами. По-перше, технічна ріпакова олія містить небажані домішки, серед яких до 6-8% масових біохімічних компонентів (вуглеводи, ліпіди, фосфоліпіди тощо). Вони несумісні з мастильними матеріалами і погіршують їх характеристики. По-друге, фізико-хімічні властивості мастильних матеріалів залежать від будови молекул та надмолекулярних структур, що вимагає модифікації триацилгліцеринів для покращення експлуатаційної ефективності. По-третє, необхідність у хімічній зміні викликана потребою усунення негативних властивостей ріпакової основи для досягнення конкурентоспроможності продукції. Одним із успішних прикладів продукції на основі модифікованої ріпакової олії є емульсія «Рапломол-ЕП2». Вона характеризується екологічною безпечністю, біорозкладаністю у водному середовищі та відсутністю шкідливого впливу під час експлуатації. Продукт майже повністю витрачається під час технологічних операцій (різання, свердління, шліфування), а залишки можуть змиватись у каналізацію через водорозчинну структуру і низьку концентрацію осаду. У рамках дослідження було випробувано як масляні, так і водні мастильно-охолоджувальні технологічні рідини (МОТР). Серед масляних розчинів аналізували індустріальне масло И-50, веретенне та трансформаторне масла, хоча їх частіше використовують у вигляді сульфатованих продуктів. На жаль, сульфозфрезол для досліджень отримати не вдалося. В групі водних

емульсій випробування проводилися з такими продуктами: СОЖ Э2-ЕД, «Унізор-М», Castrol Syntilo-R4, «Ферробетол-М» і «Рапломол-ЕП2». Результати тестування показали суттєві недоліки окремих продуктів: концентрат СОЖ Э2-ЕП не продемонстрував жодних мастильних властивостей — при контакті металевих поверхонь спостерігалось задирування поверхні через відсутність захисної масляної плівки. Він також проявляв властивості звичайної води при вимірюванні кінематичної в'язкості в розведеному стані, через що був виключений зі списку потенційно придатних МОТР. Концентрат «Унізор-М» також виявив недоліки: у нерозведеному вигляді поверхневі розшарування були помітні навіть при інтенсивному перемішуванні. У розведених розчинах (3-20%) помічено виділення масляної фракції у вигляді бульбашок, які блокують капіляр віскозиметрів, через що цей продукт теж не було рекомендовано до використання. Таким чином, проведені дослідження підтвердили значний потенціал хімічно модифікованої ріпакової олії як сировини для створ

Ми зупинились на таких водних МОТР: Castrol Syntilo-R4, «Ферробетол-М» і «Рапломол-ЕП2».

4.1. Дослідження зносостійкості антифрикційних властивостей МОТР в лабораторних умовах

Триботехнічні дослідження нових мастильних композицій на основі ріпакової оливи для змазування пар тертя сталь-сталь проводилися за допомогою чотирикулькової машини тертя (ЧКМТ) моделі ХТІ-72 (Рисунок 4.1). Вивчення мастильних властивостей мастильно-охолоджувальних технологічних рідин (МОТР) на подібних машинах має здебільшого порівняльний характер, оскільки такі пристрої не можуть повноцінно відтворити всі робочі умови технологічних середовищ при металообробці. У зв'язку з цим їхнє використання актуальне переважно на етапах розробки нових композицій МОТР або під час підбору рідин для подальших технологічних випробувань. Водночас тестування протизадирних властивостей є ефективним методом

контролю якості мастильних матеріалів під час виробництва. Протизношувальні властивості МОТР визначають здатність зменшувати інтенсивність зношування інструментів. Вони оцінюються за показником зношування, представленим через діаметр плями зносу (D_z), який вимірюється за допомогою чотирикулькової машини. Конструкція ЧКМТ передбачає наявність основи, до якої кріпляться вузол підшипника та шпindelна головка. Шпindel приводиться в рух електродвигуном через клинопасову передачу. За допомогою регулювання ременів на трируч'євих шківках електродвигуна й шпindelної головки задається необхідне передаточне число, що змінює частоту обертання вала вузла тертя. Частота регулюється магнітним переносним тахометром. Рух патрона для закріплення верхньої кульки забезпечує сферова опора, прикріплена до шпindelної головки. Верхня кулька примусово притискається до трьох нижніх нерухомо закріплених у чашці з МОТР за допомогою важільної системи й підвісних вантажів. Перед проведенням досліджень використовувані кульки очищають бензином декількома порціями. Далі в ЧКМТ встановлюють чашку з мастильним матеріалом, прикладають задане навантаження та вмикають електродвигун. Щоб уникнути деформації кульок, навантаження прикладають поступово. Середній діаметр плями зносу (D_z) визначають після 4 годин роботи за наступних умов: нормальне навантаження на верхню кульку дорівнює 400 Н (на одну нижню кульку — 200 Н), а швидкість обертання верхньої кульки становить 1470 об/хв. Кількість повторних тестів — 5. По завершенню кожного дослідження двигун вимикають і після охолодження вузла тертя до температури 40 °С з поверхонь контакту змивають залишки мастильного матеріалу. Потім за допомогою мікроскопа МПБ-2 із 24-кратним збільшенням визначають діаметри плям зносу на трьох нижніх кульках у двох взаємоперпендикулярних напрямках. Остаточні розраховується середні значення діаметра плям зносу по всіх трьох кульках.

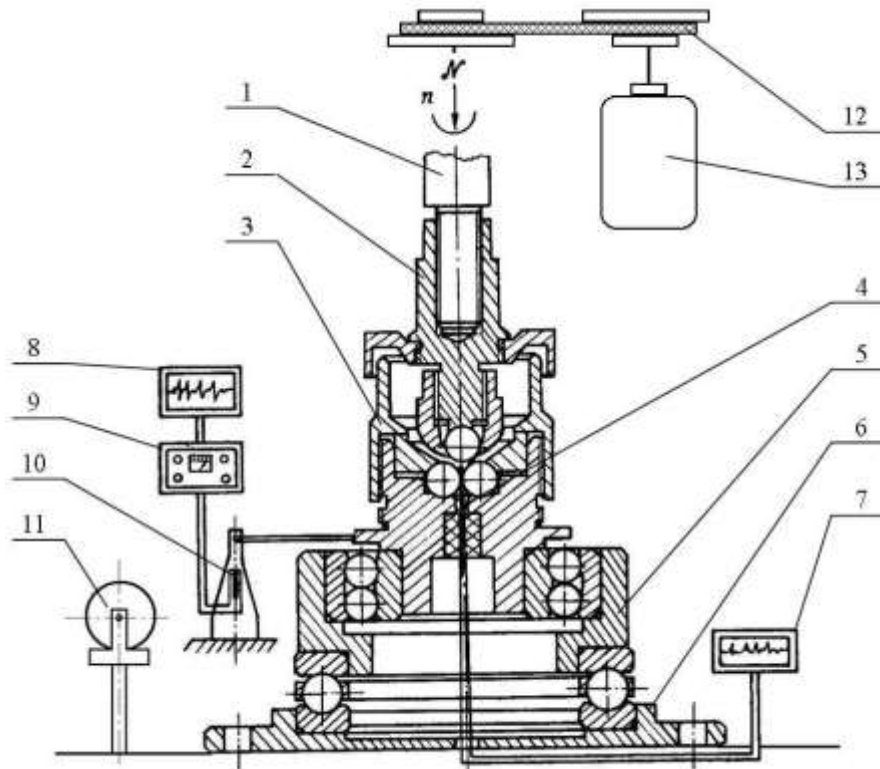


Рис. 4.1. Будова чотири кулькової машини тертя.

- 1 – хвостовик; 2 – шпindelна головка; 3 – чашка; 4 – термopарa;
 5 – підшипниковий вузол; 6 – основа; 7 – потенціометр ПСР-1-02;
 8 – потенціометр КСП-4; 9 – підсилювач; 10 – тензодатчик; 11 – кронштейн; 12
 – клинопасова передача; 13 – електродвигун.

Протизадирні властивості Текст характеризує здатність середовища запобігати утворенню задирів і захоплюванню між контактуючими поверхнями металу та інструмента. Для оцінки таких властивостей використовують такі показники: $R_{св}$ (навантаження зварювання), $R_{к}$ (критичне навантаження) та I_3 (індекс задира), які визначаються за допомогою чотирикулькової машини тертя (ЧШМ) згідно з ГОСТ 2490-75 [77]. Критичне навантаження ($R_{к}$) та навантаження зварювання ($R_{св}$) визначаються при ступінчастому збільшенні навантаження на 20 Н протягом 15 секунд при частоті обертів верхньої кульки 660 об/хв, а також протягом 60 секунд при частоті обертів 1470 об/хв. Навантаження зварювання ($R_{св}$), яке вимірюється в Ньютонах (Н) або кілограмах-сили (кгс), визначається як найменше навантаження, за якого

відбувається автоматична зупинка ЧШМ через досягнення критичного моменту тертя в (1180 ± 25) Н·см або через факт зварювання кульок. У випадках, коли навантаження зварювання не може бути встановлено, його значення приймають як навантаження, за якого утворюються зони зношування з діаметром 4 мм і більше. Одержані результати представлені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1. Змащуючі властивості (по ГОСТ 9490-75*) масляних і водних МОТР.

МОТР	P_k , кН	$P_{ср}$, кН	$D_{н}$, мм
Масляні МОТР			
II-50	0,606	1,236	0,32
Трансформаторне	0,492	1,014	0,93
Веретенне	0,392	1,098	0,75
Ріпакове	0,49	1,234	0,73
Водні МОТР			
Castrol Syntilo-R4	1,22	1,80	1,38
Ферробетол-М	1,41	1,78	1,27
Рапломол-ЕП2	1,12	1,58	1,24

Ефективність застосування мінеральних масел є меншою, ніж у рослинних. Через свою полярну структуру молекули рослинних масел формують більш міцні захисні плівки порівняно з мінеральними аналогами. Додавання ріпакової олії до веретенного масла позитивно впливає на його протизадирні властивості, сприяючи їх покращенню. Температурний діапазон працездатності мастильного складу визначається на основі значень коефіцієнта тертя. Антифрикційні показники характеризуються коефіцієнтом тертя ковзання (f_c), який залежить від швидкості, навантаження та температури й оцінюється з використанням машин ЧШМ. Зокрема, за залежністю коефіцієнта тертя від температури можна визначити робочий температурний інтервал мастильного матеріалу. Під час проведення випробувань встановлюють важіль горизонтально за допомогою рівнеміра, піднімають вантаж і запускають машину, натискаючи кнопку "пуск" ліворуч на станині. У журнал записують марку мастильного матеріалу (МОТР) та час запуску. Сам тест проводиться

протягом чотирьох годин. Момент тертя, що виникає при контакті тестованого зразка, прагне повернути чашку. Йому протидіє закріплений на підшипниковому вузлі тонкий сталевий тросик, який передає силу моменту тертя на пружний елемент консольної балочки зі сталі ХВГ (твердість HRC 60-65). Балочка закрита кожухом, а на її поверхні встановлені тензодатчики, об'єднані в мостову схему. Сигнали від цих датчиків проходять через підсилювач 8АНЧ-7м і надходять на самописний потенціометр КСП-4. По завершенні тесту піднімають важіль і натискають кнопку "стоп", зупиняючи машину. У конструкції машини передбачений тарувальний механізм, котрий включає кронштейн із підшипником та тросиком. Один кінець троса фіксується на тензобалочці, а до іншого прикріплюються вантажі для попереднього калібрування пристрою.

Як переписати текст: 5 порад, щоб перефразуват

Коефіцієнт тертя розраховують по формулі:

$$\mu = \frac{L \cdot f \cdot 9,81 \cdot 10^{-6}}{R_{тр} \cdot N} \quad (4.1)$$

де L – відстань від центра обертання до тяги тензобалочки, мм;

$R_{тр}$ – радіус тертя, мм;

N – нормальне навантаження на зразки, Н;

f – сила, що згинає тензобалочку, кгс, вимірюється в мм стрічки самописця і шляхом тарування переводиться в кгс.

У спрощеному вигляді формула визначення коефіцієнта тертя виглядає так:

$$\mu = 18,444 \cdot \frac{f}{P_{осев}} \quad (4.2)$$

де $P_{осев} = N$ – осьове навантаження.

Таблиця 4.2. Результати досліджень.

МОТР	D _н , мм	f, мм	Тарувальне навантаження f _{тар} , мм		
			Q=0,3кг	Q=0,5кг	Q=0,7кг
Водозмішувані					
Castrol Syntilo-R4	1,38	9	13,4	28,4	42
Рапломол ЕП-2	1,24	1,7	9,5	18,5	27,5
Масляні					
Трансформаторне	0,93	19,5	16,4	32,4	49
И-50	0,32	14	15,8	32,6	48,2
Веретенне	0,63	16	13,4	24	34,6

Водозмішувані МОТР

$$\mu = 18,444 \cdot \frac{f}{P_{\text{осев}}}$$

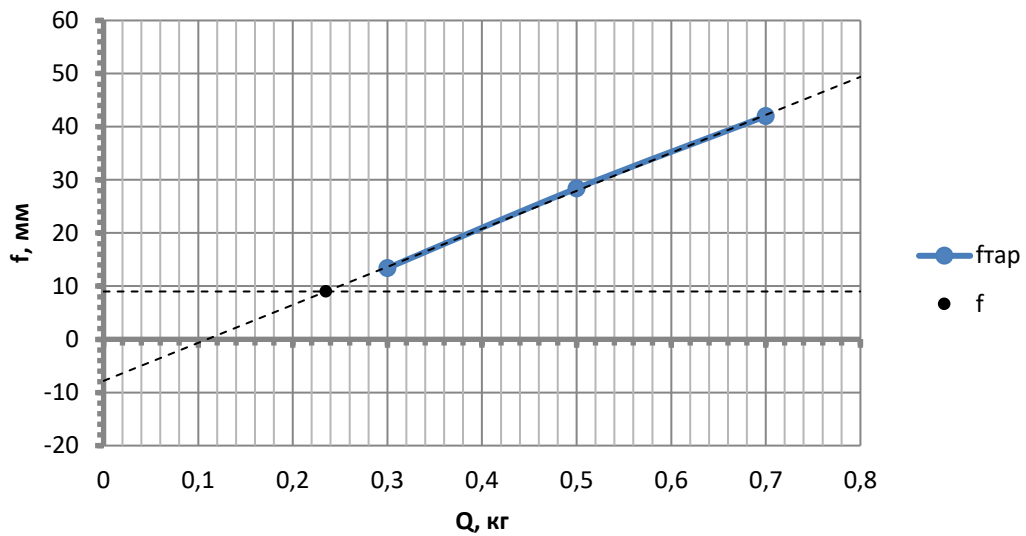


Рис. 4.2. Сила f при випробуванні Castrol Syntilo – R4.

$$P_{\text{осев}} = N = 200\text{Н} = 20,394\text{кгс}; \quad f = 0,235\text{кг}; \quad \mu = 18,444 \cdot \frac{0,235}{20,394} = 0,213$$

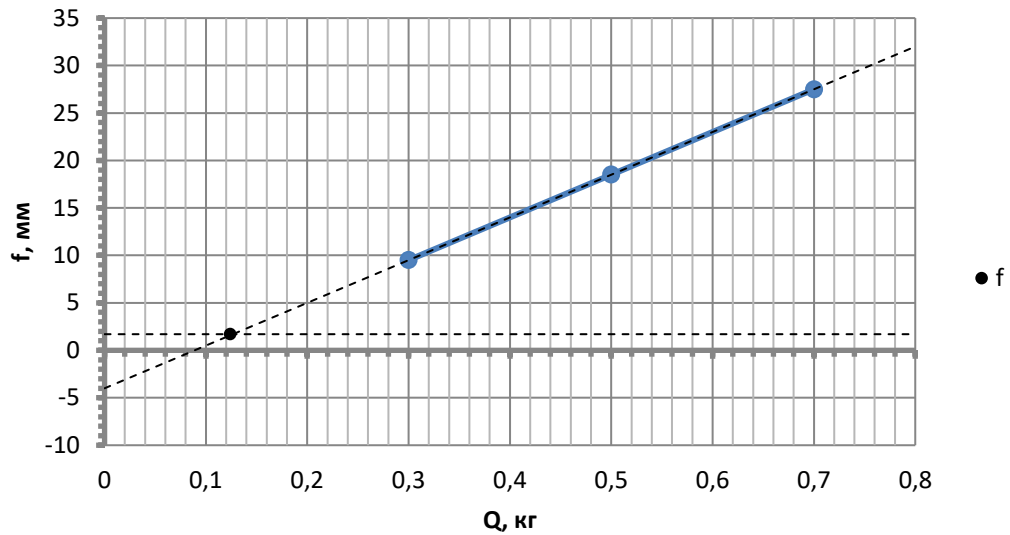


Рис. 4.3. Сила f при випробуванні Рапломол ЕП-2.

$$P_{\text{осев}} = N = 200\text{Н} = 20,394\text{кгс}; \quad f = 0,124\text{кг}; \quad \mu = 18,444 \cdot \frac{0,235}{20,394} = 0,112$$

Масляні МОТР

$$\mu = 18,444 \cdot \frac{f}{P_{\text{осев}}}$$

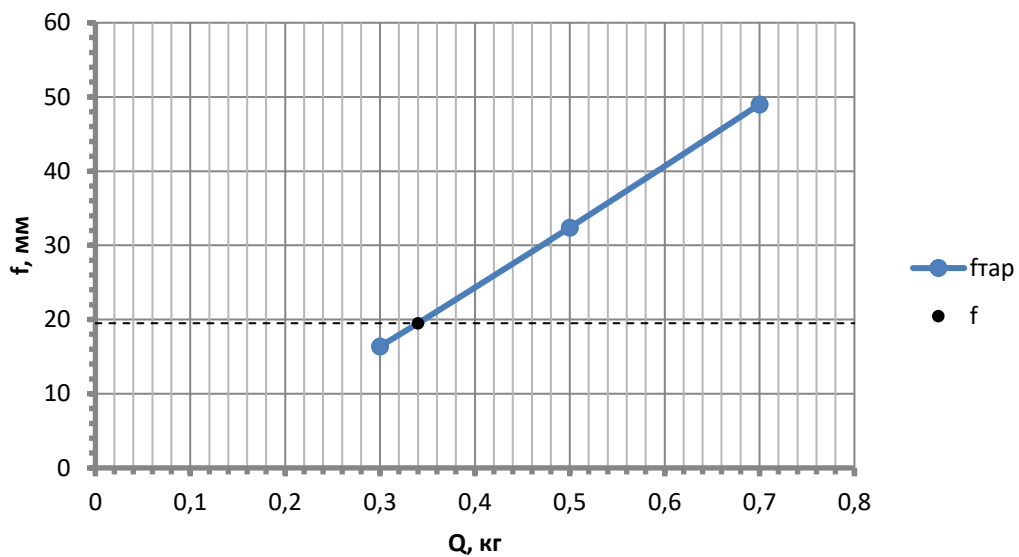


Рис. 4.4. Сила f при випробуванні трансформаторного масла.

$$P_{\text{осев}} = N = 200\text{Н} = 20,394\text{кгс}; \quad f = 0,34\text{кг}; \quad \mu = 18,444 \cdot \frac{0,34}{20,394} = 0,307$$

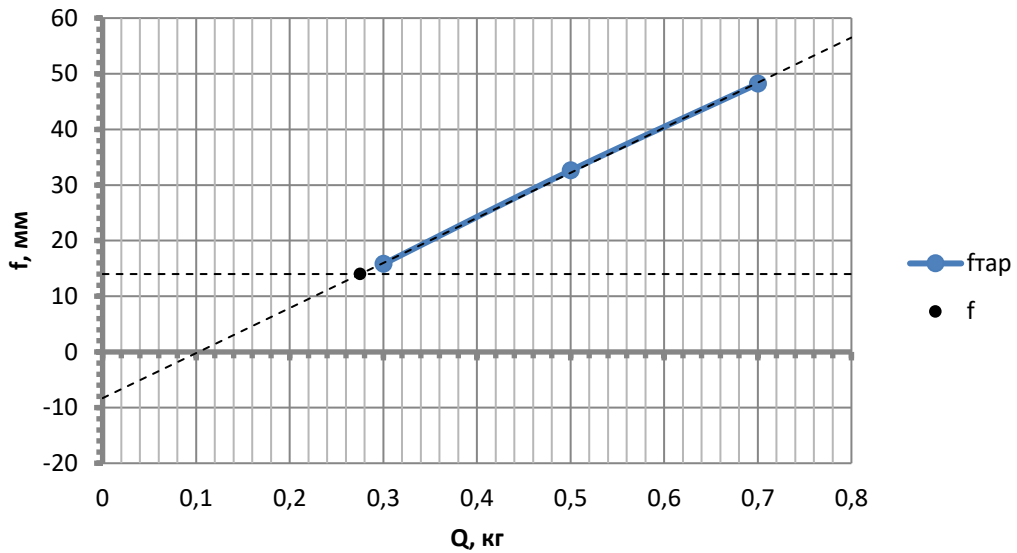


Рис. 4.5. Сила f при випробуванні індустриального масла И-50.

$$P_{\text{осев}} = N = 200\text{Н} = 20,394\text{кгс}; \quad f = 0,275\text{кг}; \quad \mu = 18,444 \cdot \frac{0,275}{20,394} = 0,249$$

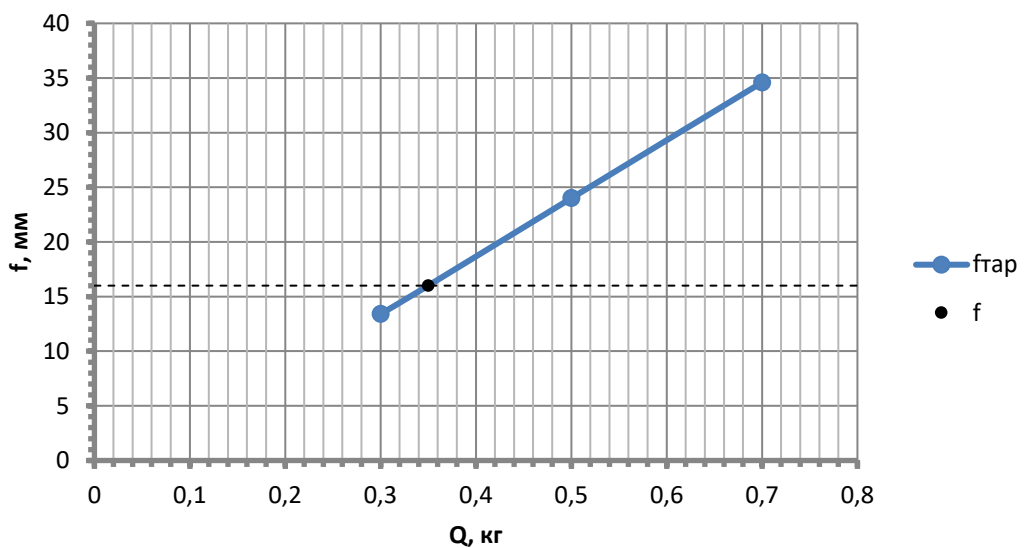


Рис. 4.6. Сила f при випробуванні веретенного масла.

$$P_{\text{осев}} = N = 200\text{Н} = 20,394\text{кгс}; \quad f = 0,35\text{кг}; \quad \mu = 18,444 \cdot \frac{0,35}{20,394} = 0,316$$

Таблиця 4.3. Результати обчислень коефіцієнта тертя.

МОТР	$D_{\text{и}}, \text{мм}$	$f, \text{кг}$	μ
------	---------------------------	----------------	-------

Водозмішувані			
Castrol Syntilo-R4	1,38	0,235	0,213
Рапломол ЕП-2	1,24	0,124	0,112
Масляні			
Трансформаторне	0,93	0,34	0,307
И-50	0,32	0,275	0,249
Веретенне	0,63	0,35	0,316

4.2. Дослідження тепло-фізичних властивостей і охолоджуючої здатності МОТР

Процеси пластичної деформації, тертя, зношення та руйнування, які протікають у зоні контакту між інструментом і заготовкою, є ключовими складовими складного механізму різання металів. При ортогональному різанні лінія ріжучої кромки зорієнтована перпендикулярно до напрямку відносної швидкості заготовки і різального інструмента у випадку протікання безперервного стружкоутворення і відсутності утворення наросту на різці. Умовна модель ортогонального різання із розвинутою зоною пластичної деформації схематично показана на рисунку 4.7. За певних умов, наприклад зі збільшенням швидкості різання, ця зона може звужуватися і трансформуватися у своєрідну квазіплощину ковзання. Зона деформації загалом характеризується множинністю поверхонь ковзання, проєкції яких на площину креслення утворюють поле ліній ковзання, представлене сегментами СА, СА1, СА2 тощо.

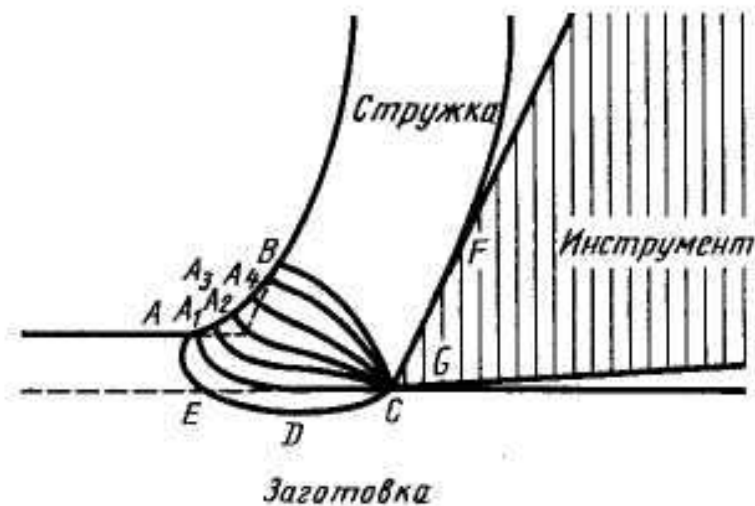


Рис. 4.7. Схема ортогонального різання з розвинутою зоною пластичної деформації.

Пластична деформація у заготовці починається вздовж лінії AEDC, розташованої нижче сліду ріжучої кромки, що пояснює значну зміну структури поверхневого шару металу після проходження різця. Стійка зміна знака напружень у цьому шарі з обох боків від ріжучої кромки може в рамках втомного механізму призводити до утворення численних поверхневих мікротріщин. Ці мікротріщини послаблюють напругу в зоні зсуву під час повторного проходу різця. Зона пластичної деформації поширюється також на частину стружки до лінії BF. Основою пластичної деформації під час різання є процеси переміщення дислокацій, самодифузія і дифузія. У полікристалічному металі дислокаційна пластична деформація супроводжується збільшенням щільності дислокацій з наступною їх анігіляцією всередині матеріалу, виходом на поверхню та релаксацією на границях зерен. Також спостерігається утворення хімічно чистої (ювенільної) поверхні зі значним зростанням її енергії. Характерною рисою такої поверхні є висока концентрація вільних валентностей, що може досягати 10^{15} на один квадратний сантиметр. Зниження хімічної активності ювенільної поверхні за допомогою пасивуючих агентів, здатних взаємодіяти із вільними валентностями, є одним з методів зменшення

зношування різального інструменту. Наприклад, сорбція продуктів перетворення МОТР на ювенільній поверхні забезпечує такий ефект. Переважна частина механічної енергії, затраченої на процес різання металу, переходить у теплову енергію.

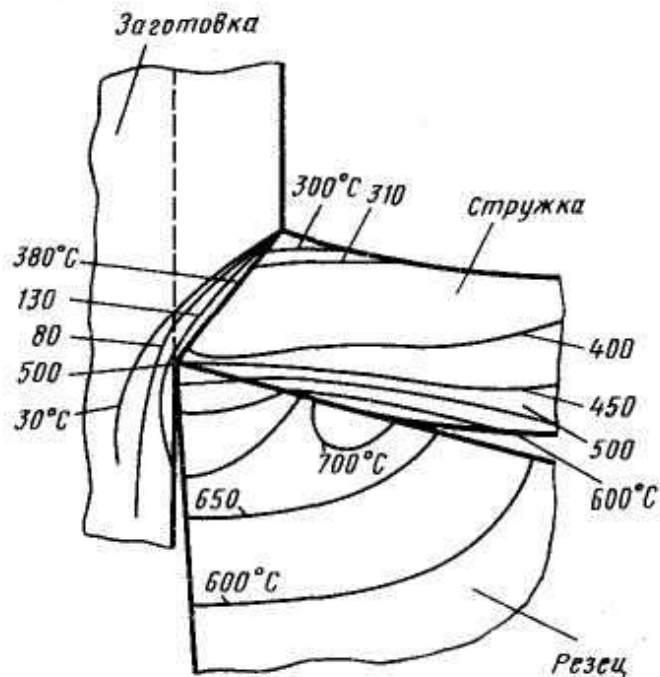


Рис. 4.8. Температурне поле в зоні різання (швидкість різання 60 м/хв; глибина різання 0,32 мм; кут різання 10°).

Процес найбільш активно відбувається у зонах пластичної деформації матеріалу заготовки, а також у місцях тертя робочих поверхонь інструменту. Це призводить до значного підвищення температури. На рисунку 4.8 наведено температурне поле в зоні різання. Варто зазначити, що температура на поверхнях тертя суттєво перевищує температуру в зонах пластичної деформації матеріалу заготовки. Підвищення температури має як позитивний, так і негативний вплив на процес різання. Серед його переваг — зменшення опору зсуву під час пластичної деформації матеріалу, зростання швидкості дифузії домішкових атомів та підвищення ймовірності переходу матеріалу до пластичної текучості в процесі утворення евтектичних фаз. Натомість негативні ефекти включають прискорення дифузійного зношування та втрато-

адгезійного руйнування інструменту. Головною метою використання мастильно-охолоджувальних технологічних рідин (МОТР) є зменшення зношування ріжучого інструменту, покращення якості обробленої поверхні та підвищення продуктивності операцій. Це досягається шляхом цілеспрямованого впливу на базові фізико-механічні й механохімічні процеси різання металу. До ключових методів належать правильний вибір базової основи МОТР (наприклад, вода, мінеральні оливи тощо), додавання до неї присадок із необхідними хімічними та механохімічними властивостями, а також регулювання умов подачі рідини у зону різання. Що стосується охолоджувального ефекту, то в переважній більшості випадків охолодження знижує знос ріжучого інструменту та сприяє підвищенню якості обробленої поверхні. Цей ефект застосовується, зокрема, у технологічних процесах, що використовують холодне повітря або вуглекислий газ як охолоджувальний агент. Охолоджувальні характеристики МОТР залежать не лише від її теплоємності та теплопровідності, але й від здатності змочувати металеві поверхні та запобігати пароутворенню. Наприклад, при високих швидкостях різання й високих температурах рідина може не контактувати з поверхнею інструмента через недостатню змочуваність або утворення парової подушки. Тому немає прямої залежності між теплофізичними властивостями МОТР та її охолоджувальною здатністю. Цікаво відзначити, що охолодження не завжди має позитивний вплив. Наприклад, при використанні МОТР на основі мінеральної оливи та водної емульсії було встановлено, що кількість отворів, які свердло може зробити до його затуплення, значно більша у випадку оливи порівняно із водною емульсією, незважаючи на те, що температура в зоні різання відповідно становила 280 °С та 101 °С. У деяких випадках температура в зоні різання навмисно підвищується за рахунок зовнішніх джерел тепла для забезпечення умов гарячої обробки металів. Проте в більшості ситуацій підвищення охолоджувальних характеристик МОТР є бажаним. Найбільш очевидним рішенням є перехід на водну основу — створення МОТР у вигляді

водних розчинів або синтетичних рідин. Однак це викликає певні труднощі через необхідність введення у водний розчин гідрофобних молекулярних фрагментів для забезпечення антизносних, антизадирних, антифрикційних та інших функціональних властивостей. Цю проблему можна вирішити за допомогою хімічного поєднання гідрофобних фрагментів із водорозчинними молекулами, наприклад, шляхом МОТР.

Підвищення ефективності охолодження в зоні різання можливе за рахунок удосконалення методів подачі мастильно-охолоджуючих технологічних рідин (МОТР). Це може бути досягнуто шляхом використання таких технологій, як туманне охолодження, ультразвуковий вплив або подача рідини під високим тиском. Гідродинамічне змащення сприяє зниженню сили тертя за рахунок утворення рідкої плівки, яка розділяє поверхні, що труться. У зоні різання при значних навантаженнях (~ 102 МПа і більше) та високих температурах (до декількох сотень градусів Цельсія) товщина рідкої плівки для звичайних ньютонівських рідин із в'язкістю до $0,01$ Н·с/м² є мізерно малою в порівнянні з висотою мікронерівностей на поверхнях. Це свідчить про обмежений вплив гідродинамічного змащення безпосередньо в умовах різання. Проте цей процес набуває ваги в зонах пружно-пластичного контакту, наприклад, при глибокому свердлінні, зменшуючи сили тертя напрямних. Реологічні ефекти також відіграють важливу роль. Більшість використовуваних МОТР належать до класу неньютонівських пружно-в'язких середовищ, в'язкість яких змінюється залежно від напружень та швидкості зсуву. У процесі різання в'язкість таких рідин підвищується через зростання швидкості деформації зсуву і гідростатичного тиску при русі до ріжучої кромки. Хоча проникнення самої рідини до області безпосередньо біля ріжучої кромки мало ймовірно, реологічний поділ трутьсичих поверхонь мінімізує тертя й сприяє зменшенню теплового впливу та зношування інструмента. Покращення охолоджувальних властивостей МОТР значно підвищує довговічність інструментів, особливо при обробці металів за високих швидкостей різання, коли тепловиділення досягає

критичних рівнів. МОТР суттєво знижують температуру різання за швидкостей до 150 м/хв; при більш високих швидкостях їхня основна функція полягає у стабілізації температури оброблюваної заготовки. Однак охолодження в зоні різання може опосередковано збільшувати сили різання через те, що зниження температури сприяє підвищенню міцності металу. При низьких швидкостях різання прискорення зношування інструмента пов'язане зі збільшеним утворенням наростів (внаслідок температури різання і властивостей матеріалу). Є обставини, коли застосування МОТР може навіть підвищувати рівень зношування інструмента — зокрема, через зміщення піку інтенсивності цього процесу в область вищих швидкостей різання. Зменшення температури різання завдяки МОР (мастильно-охолоджувальним рідинам) основним чином досягається через відведення тепла з тих поверхонь інструмента, які не покриваються стружкою. Інтенсифікація відведення теплоти від стружки позначається на загальній температурі в зоні різання, хоча контакт стружки з інструментом залишається нетривалим. Для посилення теплопровідності інструменти можуть бути обладнані внутрішніми порожнинами, заповненими водою, фреоном або металами з низькою температурою плавлення та високою теплоємністю.

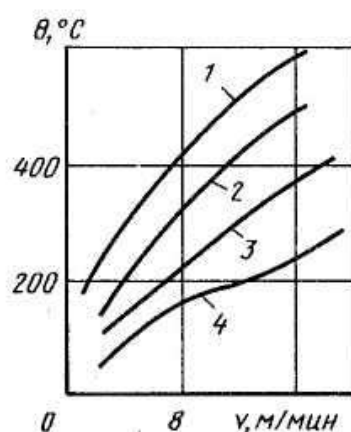


Рис. 4.9. Вплив способу підведення МОР на температуру свердління сталі 12Х11Н9Т при різних швидкостях різання ($d = 19$ мм; $S_0 = 0,19$ мм/об):
 1 - без МОР; 2 - подача емульсії поливом; 3 - подача МОР через внутрішні

канали у свердлі при звичайному тиску; 4 - те ж, що і поз. 3, але при тиску 5 МПа.

Основна частина теплової енергії, яка виникає під час процесу різання металів, відводиться завдяки конвективному теплообміну між охолоджувальним середовищем (МОТР) та металевими поверхнями таких елементів, як інструмент, стружка чи деталь. Інтенсивність цього процесу охолодження визначається коефіцієнтом тепловіддачі, який є ключовим показником ефективності охолоджувальних властивостей МОТР. Найточніші показники коефіцієнта тепловіддачі отримують за допомогою прямих досліджень теплообміну у процесі різання металів. Як модельний приклад використовують схему обтікання стержня певної геометричної форми поперечним потоком МОТР при його нагріванні. Це дозволяє максимально наблизити дослідження до реальних умов різання. Для аналізу як реальних умов роботи, так і модельного процесу, було обрано рівняння теплообміну спеціальної форми [78]:

$$Nu = icRe^m Pr^n, \quad (4.3)$$

де Nu , Re , Pr – критерії Нуссельта, Рейнольдса, Прандтля.

Критерій Рейнольдса – визначає інтенсивність теплопередачі (характер руху рідини ламінарний або турбулентний).

$$Re = \frac{wD_{\text{екв}}}{\nu},$$

де w – середня швидкість потоку рідини, м/с; $D_{\text{екв}}$ – еквівалентний діаметр; ν – кінематична в'язкість рідини, м²/с.

Критерій Нуссельта – безрозмірний коефіцієнт тепловіддачі, який характеризує конвективний теплообмін між рідиною і поверхнею твердого тіла.

$$Nu = a \frac{D_{\text{екв}}}{\lambda},$$

де λ – теплопровідність рідини, Вт/(м·к).

Число Прандтля – характеризує фізичні властивості рідини.

$$Pr = \frac{\nu}{a},$$

де $a=c/\rho$ – теплопровідність; ρ – питомий масовий теплоємник.

Усі змінні, що фігурують у формулі (4.3), вважаються за умов температури вхідного потоку теплоносія з високою швидкістю. У вираз включається коригувальний множник $i = (\frac{Pr_{\rho}}{Pr_n})^{0.25}$, котрий, згідно з відомостями з джерел [79, 80], варіюється у діапазоні від 1,4 до 2 (Pr_{ρ} та Pr_n – числа Прандтля відповідно, для рідини, що набігає, та при середній температурі охолоджуваної площини). Параметри c, m, n добираються з огляду на форму об'єкта, який омивається цим теплоносієм з високою швидкістю, та залежно від величин числа Рейнольдса [81], наприклад:

	Re	c	m	n
Циліндричний стержень	$5 \cdot 10^3$ $10^3 - 2 \cdot 10^5$	0,5 0,25	0,5 0,6	0,38 0,38
Ріжучий інструмент	$5 \cdot 10^2 - 10^6$ $10^4 - 10^6$	0,6 0,15	0,6 0,7	0,35 0,35

Відомо, що критерій Рейнольдса в процесі різання досягає значень $Re > 5 \cdot 10^3$ [79]. Відповідно до цього вибираємо значення констант: $m=0,7$ і $n=0,35$. Константи підставляємо в рівняння коефіцієнта тепловіддачі α :

$$\alpha = ci (C_p \rho / \nu)^{0,35} \lambda^{0,65} (\omega^{0,7} / D_{\text{екв}}^{0,7}), \quad (4.4)$$

де ρ, ν, C_p, λ – відповідно густина, кінематична в'язкість, масова ізобарна теплоємність і коефіцієнт теплопровідності охолоджувального середовища; ω – швидкість потоку набігаючої рідини; $D_{\text{екв}}$ – еквівалентний діаметр стержня.

Аналіз рівняння (4.4) показує, що за умови рівних швидкостей подачі МОР і розмірів різального інструменту коефіцієнт тепловіддачі α визначається комплексом величин позначених буквою K [81]:

$$K = \lambda^{0,65} (C_p \rho / \nu)^{0,35} \quad (4.5)$$

який залежать тільки від теплофізичних властивостей МОР і тому може служити мірою її охолоджувальної здатності.

Порівняльний аналіз показників комплексу К, розрахованих за формулою (4.5) за умов 20°C (додатки 4.4, 4.5), демонструє наступне: якщо охолоджувальні характеристики машинних оливних рідин (МОР) на олійній основі здебільшого зумовлені характеристиками базових мастил і знижуються відносно них незначно — не більше ніж на 5–10 відсотків, то для водних розчинів це зниження є суттєвішим — аж до 50 відсотків. При цьому величина цього падіння залежить як від кількості емульсолу, так і від його компонентного складу. Отже, у процесі створення нових МОР та модернізації наявних рідин слід проводити оцінку їхньої охолоджувальної потужності також і для визначення найбільш дієвих рецептур.

Використання формули (4.5) передбачає володіння теплофізичними характеристиками МОР, дані про які доступні не завжди, особливо при розробці абсолютно нових сумішей; до того ж, як ми вже зазначали, їхнє визначення пов'язане з відчутними експериментальними складнощами. Дослідження складових рівняння (4.5) засвідчує їхню взаємозалежність, що робить доцільним виведення кореляційного зв'язку для комплексу К щодо одного з параметрів. Як такий може бути обраний показник кінематичної в'язкості, оскільки саме його значення зазнає найбільших коливань для МОР на олійній основі відносно базових мастил при додаванні присадок, а для водних розчинів — відносно води при зміні концентрації емульгаторів. Відповідно, залежності, які ілюструються на рисунку 4.10 та 4.11, виглядають наступним чином для олив та олійних МОР:

$$K = 1,6 \cdot 10^3 \exp(-2,8 \cdot 10^4 \nu) + 9 \cdot 10^2 \quad (4.6)$$

для води й водних МОР

$$K = 3,2 \cdot 10^4 \exp(-10^6 \nu) + 9 \cdot 10^3 \quad (4.7)$$

Таблиця 4.5. Комплекс $K \cdot 10^{-3}$ [$\text{Вт} \cdot \text{с}^{0,7} / (\text{К} \cdot \text{м}^{2,4})$] Для води* і водних МОТР.

Масовий вміст емульсола в воді, %	Castrol Syntilo-R4	Ферробетол-М	Рапломол ЕП-2
3	17,922	17.942	18.447
5	17,313	16.387	17.835
10	15,892	13.982	17.002
20	12,739	10.407	9.805

* Для води $K = 18,76 \cdot 10^{-3}$

Отже, рівняння (4.6) та (4.7), котрі узагальнюють значення комплексу K із похибками 1% та 4% відповідно, дають змогу з прийнятною точністю визначити охолоджувальну спроможність як уже наявних, так і новостворюваних масляних МОТР, а також емульсій на водній основі, використовуючи лише одну вимірювану характеристику — кінематичний показник в'язкості.

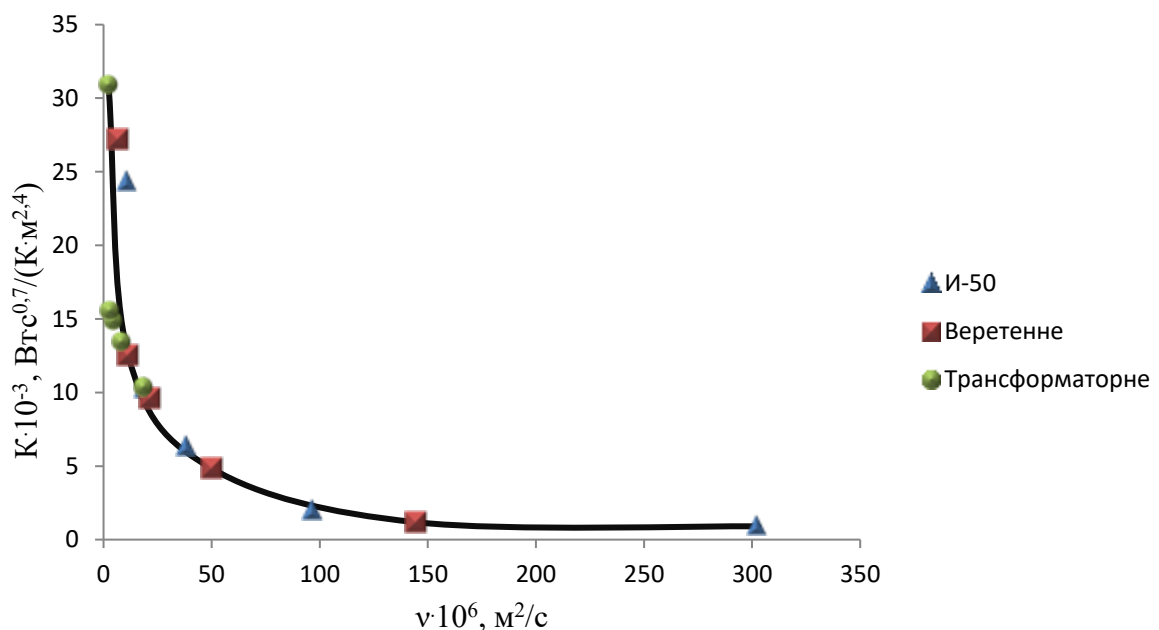


Рис. 4.10. Залежність комплексу K від кінематичної в'язкості ν для масел і масляних МОТР.

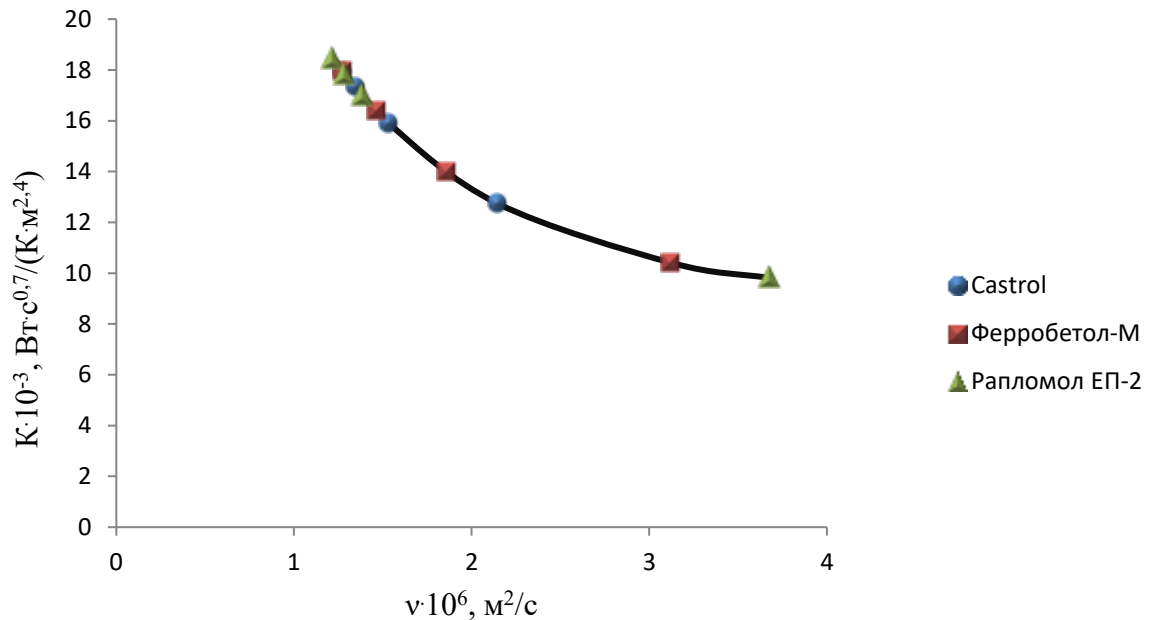


Рис. 4.11. Залежність комплексу К від кінематичної в'язкості ν для води й водних емульсій емульсолів.

Здатність рідин до змащування та охолодження (МОТР) забезпечує постійне видалення відходів формування та продуктів зносу інструменту із зони його обробки. При шліфуванні миюча дія МОТР також виявляється у попередженні прилипання та обволікання абразиву та зв'язуючої речовини шліфувального круга, а також у чищенні зв'язуючого при відкритті пор круга [76].

Механізм миючого ефекту є досить заплутаним і ще не доведений до кінця. Проте з'ясовано, що для прояву миючої дії середовище повинно мати виражену змащувальну активність, високий ступінь поверхневої активності та здатність формувати навколо твердих частинок достатньо пружні та стійкі плівки [76]. Миючі характеристики МОТР надзвичайно важливі при виконанні багатьох фінішних операцій. Лише обмежена кількість складів МОТР задовольняє вимогу високої миючої спроможності.

Якщо функціональні показники описують сам склад МОТР, то технологічні властивості стають очевидними лише під час практичного застосування або

спеціальних випробувань. Технологічна, або ключова експлуатаційна, характеристика МОТР визначається зносом та довговічністю інструменту, ефективністю процесу обробки металу, якістю поверхні оброблених елементів та іншими параметрами. Обрання відповідних критеріїв, їхніх кількісних значень та методик оцінки залежить від конкретного технологічного процесу, де використовується МОТР.

Для проведення порівняльного аналізу ми обрали лінійку масляних МОТР: И-50, веретенне, трансформаторне, та серед водних емульсій: «Castrol Syntilo-R4», «Ферробетол-М», «Рапломол-ЕП2». Масляні МОТР мають слабку охолоджувальну здатність і майже не використовуються для цієї мети. Для підвищення їхньої ефективності додають спеціальні присадки на базі фосфору та сірки. Наявність таких присадок сприяє формуванню в зонах контакту плівок сульфідів та фосфідів, що запобігають зварюванню та утворенню задирів матеріалів.

Серед емульгованих у воді МОТР (емульсолів) ми дослідили новітній склад «Рапломол-ЕП2». Його отримали шляхом неповного лужного гідролізу (у межах 30-65 %) оптимально підібраної суміші ріпакової олії та продуктів її сульфування РОС-6 або РОС-8. До складу цієї сполуки, яка є мастильною пастою, додається необхідна кількість дистильованої води (залежно від запланованого використання пасти чи емульсолу). Саму пасту можна використовувати як мастило у процесах, пов'язаних із тиском (штампування, волочіння, прокатні операції тощо). На базі цієї пасти виробляється емульсол «Рапломол-ЕП2». Аналіз отриманих експериментальних даних демонструє, що охолоджуюча спроможність емульсолу «Рапломол-ЕП2» в середньому у 3-4 рази вища, ніж у існуючих на графіках 4.10 та 4.11 робочих МОТР обох типів. Емульсол «Castrol Syntilo-R4» (виробництва Німеччина) демонструє кращу охолоджувальну здатність, ніж «Рапломол-ЕП2», проте його виробнича вартість суттєво вища. Іншим мінусом «Castrol Syntilo-R4» є його менш виражені змащувальні, протизношувальні, протизадирні та антифрикційні

властивості. Діаметр плям зносу «Castrol Syntilo-R4» ($D_{\text{и}}=1,38$ мм) більший, ніж у емульсолу «Рапломол-ЕП2» ($D_{\text{и}}=1,24$ мм). Також, коефіцієнт тертя «Castrol Syntilo-R4» ($\mu=0,213$) вищий за показник «Рапломол-ЕП2» ($\mu=0,112$), що вказує на менший температурний діапазон стабільної роботи матеріалу «Castrol Syntilo-R4» порівняно з «Рапломол-ЕП2». Щодо емульсолу «Ферробетол-М», то всі його характеристики поступаються емульсолу «Рапломол-ЕП2», про що свідчать результати досліджень у таблиці 4.5.

Технологічна ефективність нових МОТР була перевірена у реальних умовах експлуатації та оцінена як низький рівень зносу, висока надійність інструменту, значна продуктивність у процесах металообробки та відмінна якість поверхні оброблених деталей. Технологічні переваги МОТР виражені у середньому коефіцієнті збільшення ресурсу ріжучого інструменту, який досягає значень у 1,3-1,5 рази порівняно з якісними наявними на ринку МОТР.

4.3. Технологія одержання емульсола концентрата «РАПЛОМОЛ-ЕП2» і пасти концентрата «РАПЛОМ-ЕП1»

Технологія термоуцілювання і сульфидування ріпакової оливи. Двадцять кілограмів добре промитої та висушеної ріпакової олії (РО) завантажують у реактор 1 (див. Рис. 4.12). Цей апарат оснащено елементами для забезпечення контролю над ключовими параметрами процесу:

- температурою реакційної суміші (за допомогою вбудованого електричного нагрівача або теплоносія, що циркулює через сорочку апарату);
- інтенсивністю перемішування, що досягається завдяки лопатевій мішалці з електричним приводом.

РО спершу доводять у реакторі 1 до температури 130 °С при постійному перемішуванні, після чого порціями додають сірку, попередньо ретельно подрібнену (використовується млинок 3, показаний на Рис. 4.12), у кількості, визначеній розрахунком для досягнення бажаного відсотка сірки у кінцевому продукті — сульфидованій ріпаковій олії. Було розроблено градацію

сульфидованої ріпакової олії (РОС) за масовою часткою хімічно зв'язаної сірки (у %): від 0,5 % до 7–8 % (маркуються як, наприклад, РОС-0,5, РОС-3,5, РОС-6 відповідно).

Процес плавлення сірки (який відбувається приблизно при 110–120 °С) викликає тимчасове зниження загальної температури реакційної суміші. Надалі продовжують нагрівання зі швидкістю 0,5 °С за хвилину, підтримуючи помірне перемішування, доки не буде досягнута температура 185 °С (це займає приблизно 2,5 години).

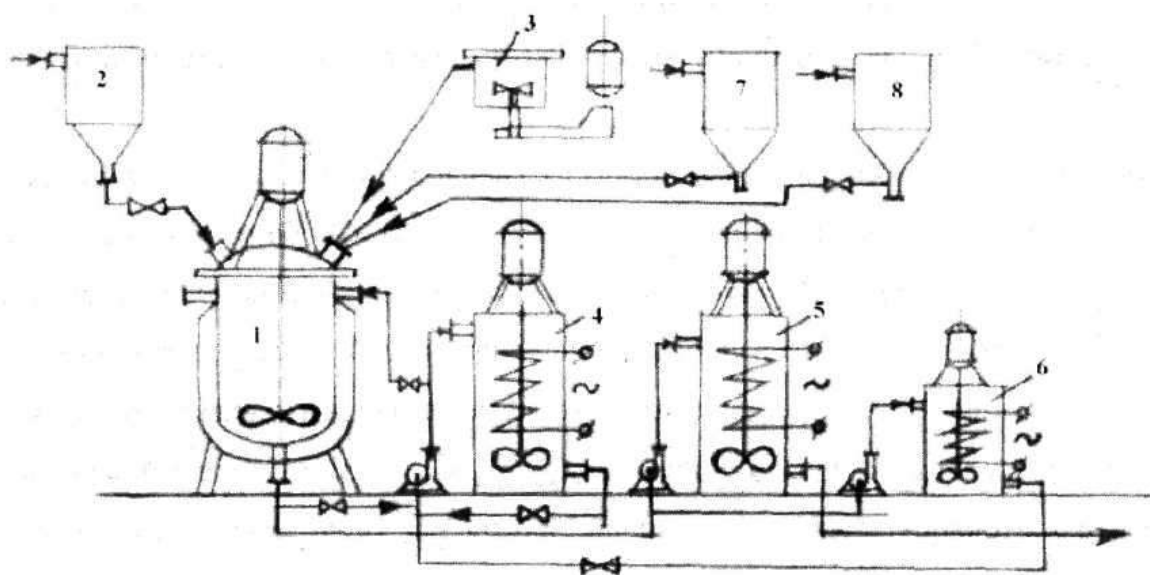


Рис. 4.12. Технологічна схема виробництва модифікованої ріпакової олії (РО), універсальної присадки та мастильних композицій на її основі: 1- реактор; 2,7,8 - дозатори, відповідно, РО; ТФФ; базових мінеральних олій від И-5А до И-20А; 4,5,6 - збірники-підігрівачі продуктів, відповідно: РОС (від РОС-0,5 до РОС-6); мастильних композицій (наприклад, трансмісійної олії тощо); присадки.

З моменту досягнення позначки 175 °С розпочинається досить активне виділення газів, у зв'язку з цим необхідно обладнати витяжний пристрій над зоною реактора та забезпечити роботу з увімкненою витяжною тягою (вентиляцією). На позначці 185 °С слід припинити подальше нагрівання суміші, оскільки процеси термоуцільнення та сульфидування є екзотермічними. Завдяки цьому температура реакційної маси продовжить зростати, досягаючи

200 °C і більше. Ідеально зупиняти обігрів реактора на такій стадії процесу, коли самочинне підвищення температури завершиться у межах 205-207 °C. Обидва реакційні етапи супроводжуються помірним спіненням маси (спричиненим виділенням газів), тому важливо здійснювати контроль за цим процесом, аби запобігти викиданню вмісту з реактора. Після цього необхідно продовжувати перемішування суміші, утримуючи температуру в діапазоні 200-205 °C протягом півтори години. Далі має відбутися поетапне охолодження до 100 °C протягом години при збереженні перемішування, після чого перемішування вимикають, і при температурі 50-70 °C отриману реакційну масу (що відповідає РОС) перекачують насосом у приймальну ємність 4.

Створення технології для виробництва рідин, що охолоджують та змащують, і засобів для металообробки. Аналіз процесу гідромеханічного розкладання ріпакової олії з метою отримання мастильно-охолоджувальних субстанцій (МОЗ: пастоподібних матеріалів та емульсійних розчинів) для обробки металів дозволив визначити найперспективніші шляхи для розробки технологічного циклу. Як уже зазначалося, ці раціональні вектори обумовлені об'єктивними вимогами, які висуваються до кінцевих продуктів — МОЗ:

Для того, щоб якісно виготовлені МОЗ забезпечували належні експлуатаційні показники ефективності, необхідно дотримуватись наступних критеріїв: [54,82,83,84,85].

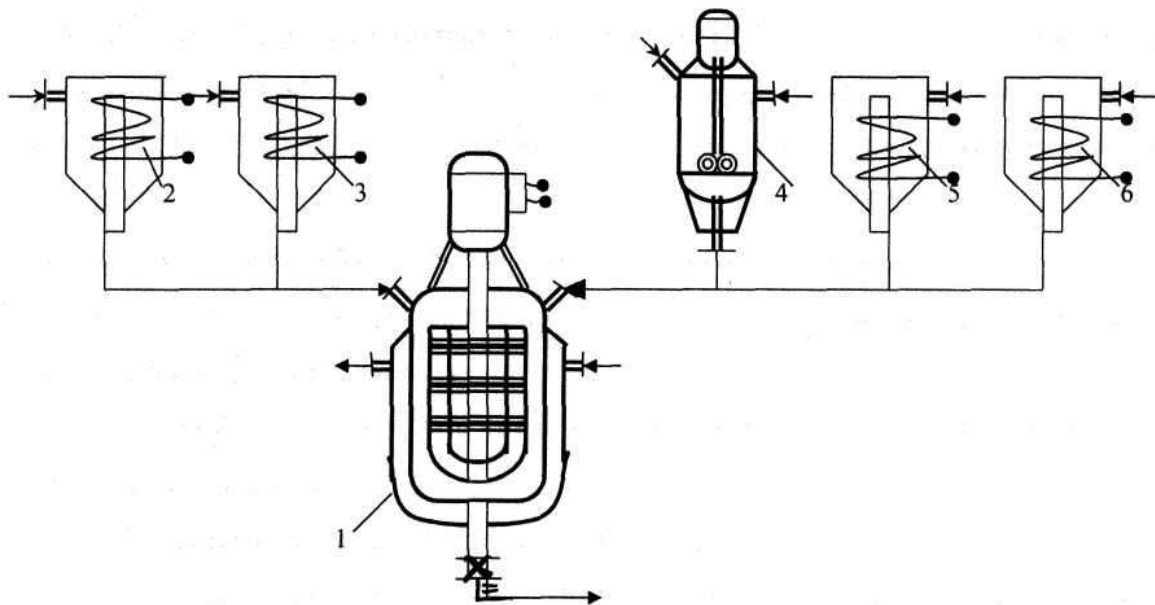


Рис. 4.13. Технологічна схема одержання концентрат-пасти подвійного призначення: 1 - реактор-змішувач з нагрівальною «рубашкою»; 2, 3, 4, 5, 6 - дозатори з нагріванням; 2 - для ріпакової олії; 3 - для сульфидованої ріпакової олії; 4 - для приготування і дозування розчину NaOH; 5 - для мінеральної оливи (И-20А); 6 - для води.

1) Надання ефективного змащення різальній або штампувальній поверхні може бути досягнуте шляхом формування стабільної емульсії, що складається з доступної за ціною мінеральної оливи, емульгованої у водному розчині мила (натрієвого типу) та вищих жирних кислот (наприклад, C16, C18, C20). Таким чином, очевидно, що ціль гідролізу полягає в отриманні суміші натрієвого мила (у кількості 30-50% від маси вихідної олії) разом із вищими карбоновими кислотами. Цей результат досягається проведенням гідролізу у лужному середовищі, з мінімальною часткою води та при температурі в межах 90-95 °С.

2) Забезпечення інтенсивного охолодження у зоні механічної обробки металів має на меті уникнення небажаного злипання (зварювання) як оброблюваного металу, так і ріжучого інструменту. Це, своєю чергою, сприятиме досягненню високої чистоти та точності обробленої поверхні, а також подовжить термін служби дорогого інструментарію. Тривалість

охолодження залежить від оптимальних значень певних параметрів: в'язкості МОР (мастильно-охолоджуючої рідини), густини МОР, а також коефіцієнта теплопередачі.

3) Важливою є наявність у МОР ефективних очищувальних (миючих) властивостей у зоні обробки металів, що повинно запобігати накопиченню металевої стружки на інструменті та оброблюваній поверхні, забезпечуючи своєчасне її змивання.

4) Необхідні й ефективні протизносні якості МОР під час металообробки, яких досягають, додаючи до складу МОР спеціальну присадку – це сульфидована ріпакова олія (у варіантах РОС-6 або РОС-8). Реалізація цього технологічного процесу відбувається згідно зі схемою, наведеною на Рис. 4.13.

Окрім переліченого, МОР мають демонструвати фізико-хімічну стабільність складу та стадії, не допускаючи розшарування на водяну та олійну фракції, а також володіти обмеженою здатністю до піноутворення.

Було розроблено найкращу технологію отримання таких МОР, використовуючи як сировину ріпакову олію, через процес лужного гідролізу [84,86]:

а) Концентрат-пасти подвійного використання:

1) Для процесів механічної обробки металів тиском (штампування, волочіння, прокатні операції тощо);

2) Для приготування емульсолів із заданими характеристиками та функціональним призначенням.

б) Емульсоли – це емульсійні мастильно-охолоджуючі рідини для процесів різання металів, типу «олива у воді».

Розрахунок технологічного циклу виробництва нових МОР передбачає отримання 37 кг концентрат-пасти, яка потім може застосовуватися або напряму як готовий продукт, або як проміжний матеріал для виробництва емульсолу (МОР). Вихідною сировиною є ріпакова олія (РО), а проміжні компоненти включають: ріпакову олію, сульфидовану до вмісту сірки 6-8% за

масою (РОС-6 чи РОС-8); мінеральну оливу з низькою чи середньою в'язкістю, без додаткових присадок (наприклад, I-5A, I-8A, I-20A). Хімічним реагентом для запуску реакції гідролізу служить концентрований водний розчин гідроксиду натрію (NaOH) з концентрацією близько 33-35% за масою.

Сировину – 21 кг РО – нагрівають у дозаторі 2 (Рис. 4.13) до 100 °С та подають до реактора-змішувача. Туди ж додають 3 кг РОС-6 чи РОС-8, попередньо нагрітих до 100 °С. Реакційну суміш нагрівають під постійним перемішуванням. У спеціальному реакторі 4 готують розчин, використовуючи 5,8 кг водного розчину NaOH шляхом розчинення 1800 г лугу у 4 літрах води. Отриманий розчин NaOH невеликими порціями по 500 г поступово перекачують у реактор 1, забезпечуючи інтенсивне перемішування (бажано підтримувати режим турбулентного руху). Весь обсяг лугу вносять протягом 60 хвилин, після чого перемішування продовжують ще 60 хвилин. Далі, не припиняючи перемішування, у реактор 1 додають 7,2 кг промислової оливи (наприклад, "веретена"), попередньо підігрітої до 110 °С, вносячи її порційно протягом 30 хвилин. Перемішування триває ще 60 хвилин. В результаті отримують в'язку, текучу пасту коричневого кольору типу квазі-рідини, яка після охолодження стає більш щільною та пластичною, втрачаючи текучість.

Створення емульсолу-концентрату відбувається у дві фази:

- У реактор-перемішувач об'ємом 75 літрів заливають 37 літрів питної води помірної жорсткості, нагрітої до 70°C, а потім порціями, при безперервному перемішуванні, додають усю отриману концентрат-пасту (37 кг) і перемішують до моменту досягнення однорідної, в'язкої емульсії (Рис. 4.13).

- Далі цю в'язку емульсію розбавляють ідентичною за складом питною водою до об'єму 150 літрів (зменшують концентрацію вдвічі). Такий емульсол-концентрат постачається кінцевим споживачам, які самостійно готують робочу емульсію на його основі, відповідно до технологічних вимог та ступеня теплового навантаження обробки.

4.4. Промислові випробування нових мотр та їх експлуатаційні характеристики

Концентрована паста та емульсійний концентрат під назвою «Рапломол-ЕП2» виготовляються відповідно до такої нормативно-технічної документації:

1) Патент України № 37 362А. Назва: «Двоцільова концентрована паста для операцій з обробки металів». Опубліковано 15 травня 2001 року у збірнику «Промислова власність», випуск № 4.

2) Технічні Умови ТУ У 38.101.02071234-98, схвалені Держстандартом та введені в дію з 1 березня 1999 року.

3) Токсиколого-гігієнічний паспорт, засвідчений Інститутом медицини праці, розташованим у місті Києві.

4) Висновок санітарно-гігієнічної експертизи, затверджений Головним санітарно-епідеміологічним управлінням МОЗ України.

5) Висновок щодо екологічної безпеки експертизи.

За даними МОЗ, ці продукти є екологічно чистими, демонструють біологічну стабільність (не піддаються бродінню чи скисанню) протягом року зберігання, а також є фізіологічно інертними стосовно людського організму; вони мають ледь помітний мильний запах та гарні очищувальні властивості.

Емульсійний концентрат «Рапломол-ЕП2» повинен відповідати критеріям та нормам, зазначеним у таблиці 4.6, щодо своїх фізико-хімічних параметрів.

Робочий розчин емульсії «Рапломол-ЕП2» готується шляхом змішування емульсійного концентрату з питною водою, що відповідає вимогам ГОСТ 2874-82, із загальною жорсткістю не більше 5-6 мекв/л. Процес змішування здійснюється у вертикальному циліндричному змішувачі з перемішуванням

протягом 10-15 хвилин. Розведення концентрату водою необхідно виконувати у визначених межах залежно від інтенсивності тепловідведення у процесах обробки: співвідношення становить від 1:5 (за масою) для високоінтенсивних операцій до 1:8 (за масою) для менш інтенсивних, при цьому температура не має бути нижчою за 10-15 °С.

Таблиця 4.6. Характеристика емульсола-концентрата.

Назва показника	Значення показника	Метод випробувань
1. Зовнішній вигляд	Непрозора стабільна емульсія від жовтувато-сірого до жовто-коричневого кольору зі слабким запахом мила	За ГОСТ 6243-75, розд.1.
2. Концентрація,%	23-25 %	Лабораторний.
3. Густина за температури (20±5) °С, кг/м3	982-987	За ГОСТ 3900-85
4. Водневий показник, рН	8,2-9,0	За ГОСТ 6243-75, розд. 4.
5. <u>Піноутворення</u>	<u>Середньоінтенсивне</u> , $V_{\text{піни}} = 15\%$ об'єму, зникнення піни через 20 хв	Метод ASTM D 892-58T.
6. Корозійна стабільність (за відношенням до сталі і кольорових металів)	Витримується на пластинах із сталі, міді М1, свинцю	За ГОСТ 859 або за ГОСТ 9.080

Робоча емульсія, виготовлена з концентрацією у межах від 1% (у масових частках) до 3,5-4 % (у масових частках), повинна за своїми фізико-хімічними характеристиками відповідати тим вимогам, що окреслені у Таблиці 4.7.

Перевірку якості як самого емульсола-концентрату, так і робочої емульсії на відповідність критеріям, зазначеним у Таблицях 4.6 та 4.7, здійснюють одразу після їх підготовки, а далі – у ході експлуатації з інтервалом у п'ять діб. Нагляд за дотриманням санітарно-гігієнічних норм регулюється згідно з ГОСТ 9.085 і має проводитися мінімум раз на тиждень. Період використання робочої

емульсії під час операцій із металообробки визначається, виходячи з якісних параметрів самого технологічного процесу [83,84,85]:

* якість оброблених поверхонь та різьбових з'єднань; надійність та тривалість служби використовуваного інструменту;

* відсутність небажаних ефектів, таких як прилипання стружки, пригорання чи оплавлення на поверхні, що обробляється, а також корозійних проявів на металах.

Таблиця 4.7. Фізико-хімічні показники робочої емульсії.

Назва показника	Значення показника	Метод випробувань
1. Зовнішній вигляд	Непрозора стабільна емульсія світло-жовтуватого кольору	За ГОСТ 6243-75, <u>розд. 3.</u>
2. Концентрація, %		За ГОСТ 6243-75, <u>розд. 3.</u>
3. Стабільність: кількість олії, що виділяється на протязі 4 год., %, не більше	в межах від 1% до 4%. 1,5-2,0	
4. Водневий показник, <u>pH</u>	7,5+8,3	За ГОСТ 6243-75, <u>розд. 4.</u>
5. Корозійна стабільність за відношенням до сталі і кольорових металів.	Витримується на пластинах із сталі 45 і з міді М2, свинцю.	За ТУ 14-1-708, за ГОСТ 859 або за ГОСТ 9.080.

Засоби безпеки і санітарно-гігієнічні вимоги. Згідно з токсикологічно-гігієнічним паспортом, який був затверджений Інститутом медицини праці Академії медичних наук України, нововведені МОР (мастильно-охолоджувальні рідини) віднесені до IV класу небезпеки (речовини з низьким ступенем небезпеки) відповідно до вимог ГОСТ 12.1.007-76. Засоби індивідуального захисту для персоналу, який обслуговує ці речовини, мусять

відповідати положенням ГОСТ 12.4.011-87 та ГОСТ 12.3.025-80; спеціальний одяг — вимогам ГОСТ 12.4.103-83; захист для шкіри — нормам СанПіН 3935-85 та ГОСТ 12.4.068-79. Новопризначені МОР є цілком безпечними щодо пожежної небезпеки, оскільки не містять складових, які легко випаровуються, займаються чи є вибухонебезпечними.

Стійкість до зношування нової емульсії встановлювалася шляхом виявлення функціональної залежності між змінами контактної різниці потенціалів (КРП), що проявляється на сталевій поверхні, змащеній цією емульсією, та рівнем зносу інструменту обробки. На початковому етапі вивчався характер зміни контактної різниці потенціалів (Δ КРП) протягом певного часу. Значення Δ КРП вимірювалися на пластинах зі сталі 10 після їхньої обробки послідовним застосуванням декількох емульсій (як загальновідомих, так і нових) [87,88,89]. Результати цього дослідження відображено графічно на рисунку 4.14.

Як демонструє рис. 4.14, усі емульсії виступають донорами електронів, що призводить до суттєвого зростання значень Δ КРП на початковій стадії їх контакту з поверхнею. Однак, вже за 5–10 хвилин відбувається різке зниження значень Δ КРП [84].

Наприклад, для відомої імпортової емульсії «Дромус-Б» спостерігається значне зменшення Δ КРП з часом, що свідчить про відсутність тривалого ефекту «покращення» потенціалу завдяки хемосорбційним процесам або пасивації. Найбільшу зміну КРП демонструють емульсія ОЕ/С, яка добре себе зарекомендувала, а також нова емульсія, особливо в перші хвилини вимірювань. Проте, на відміну від досить якісної емульсії ОЕ/С, у випадку «Рапломол-ЕП2» фіксується майже повна стабілізація високого рівня Δ КРП у часі (рис. 4.14).

Отже, стабільні протягом тривалого часу високі показники Δ КРП, отримані для «Рапломол-ЕП2», мали б забезпечити його високі протизношувальні характеристики протягом усього циклу металообробних операцій. Для підтвердження впливу значень Δ КРП на якісні аспекти емульсій, їхню зносостійкість оцінювали на чотирикульовій машині тертя (ЧКМТ) за таких умов: діаметр дисків зі сталі 3 мм, швидкість обертання 60 об/хв, прикладене навантаження 20 Н/см². Діаметр зон зносу (d_{zn}) вимірювався за допомогою мікроскопа. Як і очікувалося, найкращі показники протизношувальності продемонстрували емульсії ОЕ/С ($d_{zn} = 0,07$ мм) та новий «Рапломол-ЕП2» ($d_{zn} = 0,07$ мм), тоді як «Дромус-Б» показав суттєво гірші результати ($d_{zn} = 0,12$ мм).

Водночас, дослідження виявили, що кореляція між Δ КРП та властивостями проти зносу є помітною лише в емульсіях, які мають схожий механізм дії з традиційними поверхнево-активними речовинами [88,89,83,84].

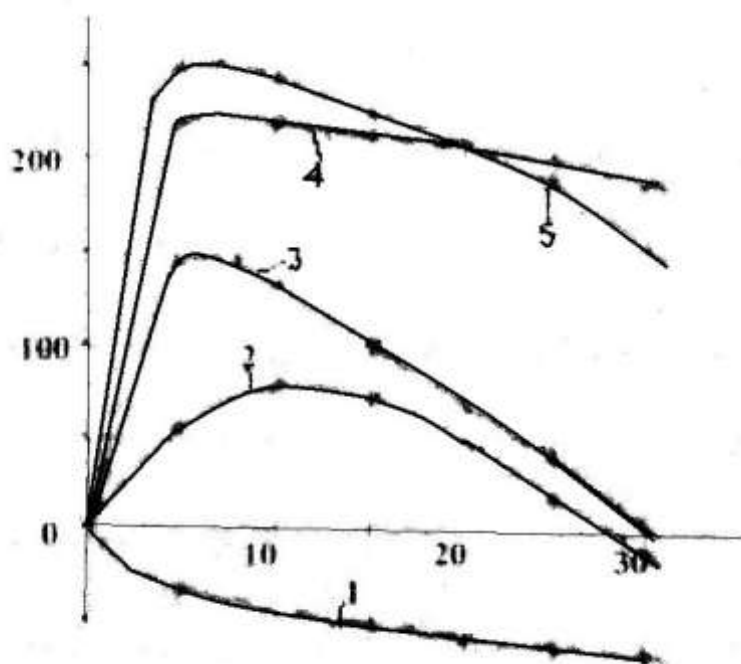


Рис. 4.14. Характер зміни контактної різниці потенціалів (Δ КРП) в часі, вивчений на пластинках із сталі 10 після їх контактування з такими середовищами:

1 - чиста пластинка на повітрі; 2 - та ж після контакту з дистильованою водою;
3 - оброблена емульсолем «Дромус-Б»; 4 - оброблена новим емульсолем
«Рапломол-ЕП2»; 5 - оброблена емульсолем ОЕ/С.

Стійкість до руйнування нової емульсії оцінювалася шляхом фіксації змін у ємності подвійного електричного шару на поверхні сталі марки 10, коли вона вступала в контакт із чавунною стружкою у середовищі емульсолів (за відпрацьованою методикою ФІАТ) [88,83].

Загальновідомо, що для кожної комбінації «обробний інструмент – деталь, що піддається обробці» існує певний діапазон параметрів обробки, у межах якого та чи інша змащувально-охолоджувальна рідина (ЗОР) демонструє найбільш сприятливий та результативний вплив на кінцеву якість обробки. Дослідження того, як швидкість обробки впливає на температурний режим та знос ріжучого інструменту під час точіння жароміцного сплаву (в умовах значного теплового навантаження процесу), проводилося за різних умов теплообміну та змащування. Ці дослідницькі дані візуалізовано на рисунку 4.15.

Розгляд представлених на рисунку 4.15 графічних залежностей дає змогу сформулювати такі наші висновки [84].

1. Застосування емульсолів не порушує екстремального характеру залежності темпів зносу інструменту від швидкості різання, а також відносно оптимальної температури обробки.

2. Включення до складу емульсолів поверхнево-активних компонентів майже не змінює їхньої дії на температуру під час обробки.

3. Оптимальна швидкість різання при використанні емульсолів є помітно вищою, ніж при обробці без них. При цьому, якщо дві вже відомі емульсії («Єра-90» та емульсол на базі олеату моноетаноламіну) дозволяють наростити швидкість різання приблизно на чверть (25%), то нова емульсія «Рапломол-

ЕП2» забезпечує ще більший приріст – на 30–35%.

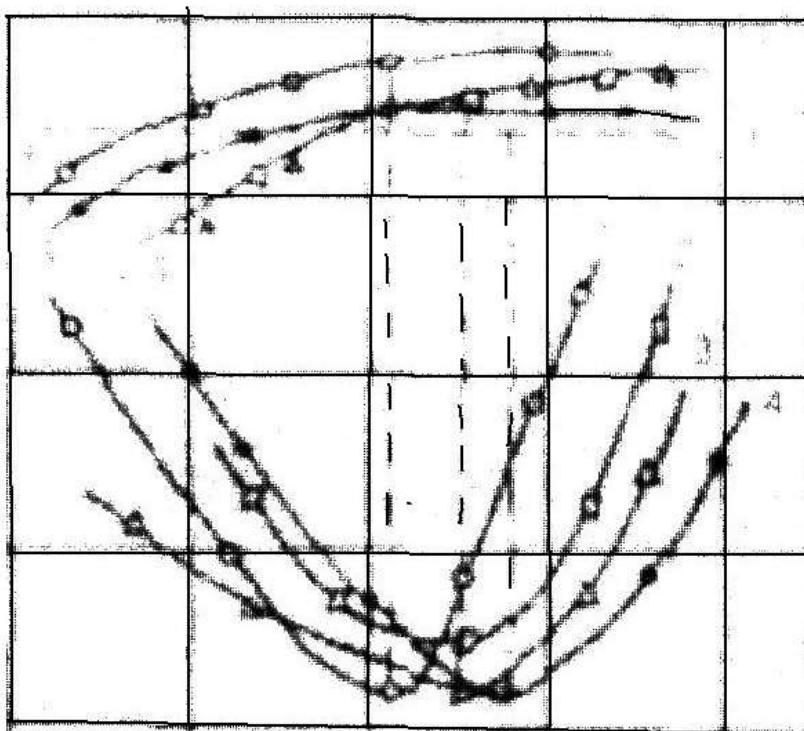


Рис. 4.15. Вплив швидкості обробки на температуру та зношування різця із сплаву ВК8 в перебігу точіння жароміцного сплаву ХН77ТЮР за різних умов тепловідведення і мащення: без охолодження (1) і з використанням різних емульсій (2, 3, 4): 2-5 % емульсія «Єра-20»; 3-5 % емульсія на основі олеата моноетаноламіна; 4-5 % емульсія «Рапломол-ЕП2» ($t = 0,5 \text{ mm}$; $S = 0,08 \text{ мм/об}$).

У процесі як лабораторних експериментів, так і промислових тестів, великий акцент було зроблено на ключових технологічних моментах застосування свіжоствореного емульсолу під назвою "Рапломол-ЕП2". Це включало:

- визначення найкращих параметрів (діапазону) для обробки металевих заготовок;
- формування інструкцій та порад для виконання різноманітних технологічних етапів обробки;
- оцінку того, як варіанти подачі рідини впливають на фінансові результати виробничого процесу.

Тестування емульсолу продемонструвало його придатність для застосування при дуже різноманітних швидкостях різання, що наочно ілюструється даними, наведеними на графіку у вигляді рисунку 4.15 (включно зі швидкістю майже до 80 метрів за хвилину).

Таблиця 4.8. Характеристика способів подавання емульсола «Рапломол-ЕП2» в зону обробки.

Спосіб подавання	Витрати, г/хв	Технічні показники
Поливання вільно падаючим струменем в перебігу процесів: - точіння - свердлення - фрезерування - нарізання різьби	10-15 8-10 7-20 2-3	Простота і висока надійність. Проте, сильне розбризкування; підвищена витрата МОЗ; утруднений нагляд за зоною обробки.
Струменем з боку задньої поверхні інструмента під тиском: - низьким (1-2 кгс/см ²) - високим (15-20 кгс/см ²)	1,0-1,5 0,3- 0,5	Порівняно не велика витрата МОЗ. Підвищується охолоджуючий і змащувальний ефект. Необхідне ретельне очищення МОЗ.
Подавання розпилюванням: - сульфозфрезола - емульсії	0,5-3,2 г/год 200-400 г/год	Найменша витрата МОЗ; зручним є нагляд за зоною обробки. Достатній охолоджуючий і змащувальний ефект. Необхідна вентиляція приміщення.

Ключовим моментом, що визначає, наскільки добре працюють МОР, як загалом, так і новітні різновиди, є те, яким чином ця рідина потрапляє у зону, де відбувається обробка металу. Опис різних методів подачі емульсії та те, як вони позначаються на металообробних процесах, можна знайти у Таблиці 4.8.

Завдяки серії експериментів з використанням цих новостворених МОР у різних процесах обробки металу, вдалося сформувавши практичні настанови щодо їхнього використання (див. Таблицю 4.9).

Таблиця 4.9. Деякі рекомендації з питань застосування нових МОЗ.

Вид технологічних операцій	Умови в ділянці контакту	Основні вимоги до МОЗ	Рекомендовані МОЗ
Чорнові операції з пониженими швидкостями різання на станках-автоматах і напівавтоматах	Мала інтенсивність тепловиділення	Добрі змащувальні властивості	Новий <u>сульфозфрезол</u> на основі <u>сульфірованої ріпакової олії</u>
Чорнові операції з підвищеними швидкостями різання	Велика <u>теплонапруженість</u>	Охолоджуючий і змащувальний ефект	Новий <u>емульсол</u> типу «масло у воді» 5-8 % (мас.) на основі ріпакової олії
Чорнові і чистові операції при обробці високоміцних і жароміцних сталей і сплавів	Підвищені контактні тиск і температура	Збільшення опору захисних плівок нормальним контактним напруженням	Новий <u>емульсол</u> «Рапломол-ЕП2» з присадкою і поверхнево-активними речовинами (ПАР)
Чистова фасонна обробка за малих і середніх швидкостей різання: нарізання різьб, зубчастих коліс тощо	Мала інтенсивність тепловиділення	Змащувальна і м'яюча дія	Новий <u>сульфозфрезол</u> , активований присадкою
Чистова фасонна обробка з високими швидкостями різання, в тому числі і чавуну	Висока <u>теплонапруженість</u> , <u>налипання стружки</u> , абразивність	Охолоджуюча і м'яюча дії та змащування	<u>Емульсол</u> «Рапломол-ЕП2» з ПАР і присадкою, 5-10 % (мас.)

ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРНИХ ПОСИЛАНЬ.

1. Р.Н. Омер "Производство и применение смазочно-охлаждающих жидкостей". Москва, Гостоптехиздат, 1963г.
2. МИ. Клушин "Смазочно-охлаждающие жидкости при резании металлов". М. , 1961г.
3. А.С. № 1 169981, кл. С 10 М 173/02.
4. А.С. № 95115038 опуб. 1.07.97. Бюл. № 5.
5. А.С. № 1097649, МКМ С10М 1/06,1984, Бюл. №22.
6. А.С. № 94032488 опуб. 29.03.96. Бюл. №1.
7. А.С. № 97062695 опуб. 30.10.98. Бюл. №5.
8. А.С. № 97062696 опуб. 30.10.96. Бюл. №5.
9. А.С. №93111441 опуб. 25.12.96. Бюл. №4.
10. А.С. №97062697 опуб. 20.10.98. Бюл. №5.
11. А.С. №1169981 кл. С10М 173/02.
12. А.С. №95 1 15038 опуб. 31.10.97.
13. А.С. №4136854/31-04 опуб. 30.07.88. Бюл. №28.
14. А.С. №.4193204/23-04 опуб. 15.11.88. Бюл. №42.
15. А.С. №4127308/23-04 опуб. 30.03.88. Бюл. №12.
16. А.С. №4614348/04 опуб. 23.07.92. Бюл. №27.
17. А.С. №4834942/04 опуб. 07.10.92. Бюл. №37.
18. А.С. №4383428/04 опуб. 07.10.92. Бюл. №37.
19. А.С. №3473780/23-04 опуб. 23.08.89. Бюл. №31.
20. А.С. №4609461/31-04 опуб. 07.10.90. Бюл. №37.
21. А.С. №3972533/31-04 опуб. 30.07.87. Бюл. №28.
- А.С. №4422386/3 1-04 опуб. 28.02.90. Бюл. №8.
- А.С. №4290068/23-04 опуб. 30.10.89. Бюл. №44.
22. А.С. №94062800/ опуб. 25.12.96. Бюл. №4.
- А.С. №4253 181/31 -04 опуб. 07.09.88. Бюл. №33.
- А.С. №4915417/04 опуб. 30.1 1.92. Бюл. №44.

23. А.С. №931 1 1427 опуб. 30.06.97. Бюл. №3.
А.С. №95083984 опуб. 30.09.96. Бюл. №3.
24. А.С. №4775365/04 опуб. 07.02.92. Бюл. №5.
А.С. №93006218/ опуб. 25.12.96. Бюл. №4.
А.С. №9602041 5/ опуб. 25.12.98. Бюл. №6.
А.С. №95020794 опуб. 25.12.98. Бюл. №6.
25. А.С. №1643596 кл.С. 1017 173/02. 1983. Бюл. №3.
26. А.С. №95020794 опуб. 25.12.98. Бюл. №6.
27. А.С. №1641870 С 10М 173/02 опуб. 1991. Бюл. №44.
28. А.С. №1715836 кл.С 10М 173/02 опуб. 1992. Бюл. №8.
29. А.С. №1384609 кл. С10М 173/02 опуб. 1988. Бюл. №12.
30. Смазочно-охлаждающие технические средства для обработки металлов резанием. Справочник. М. Машиностроение. 1989. С.100-120.
31. А.С. №96020415 опуб. 25.12.98. Бюл. №6.
32. А.С. №11323564 С 10М 125/02 1987 опуб.
33. Заявка Японії №58-1 79295, кл. С10М 1/32,1983.
34. А.С. №4659533/04 опуб. 15.04.91. Бюл. №14.
35. Курчик Н.Н. и др. Смазочные материалы для обработки металлов резанием. М. "Химия", 1972, с.131-143.
36. Избирательный перенос в тяжело нагруженных узлах трения. Под. ред. Д.Н. Гаркупова, М. "Машиностроение" 1982, с. 105-111.
37. А.С. №595363, кл. С 10М 3/02, 1978.
38. Применение СОЖ для обработки металлов резанием. М. из-во Мин-ва станкостроительной и станкоинструментальной промышленности СССР, 1971. С.9.
39. А.С. 3661357/23-04 опуб.23.04.85. Бюл. №15.
40. А.С. 595363, кл. С 10М 3/02, 1978.
41. А.С. 3661357/04, кл. С10М 3/02, 1983.
42. А.С. 3749505/23-04 опуб. 07.08.85 Бюл. №29.

43. Кремнев В.А. и др. Водная смазочно-охлаждающая жидкость для шлифования шариков взамен дизельного топлива. Подшипниковая промышленность, 1983, №11, с. 10-14.

44. А.С. №1049526, кл. С10М 173/02, 1981.

45. А.С. 4223389/23-04 опуб. 30.06.89. Бюл. №24.

46. А.С. 1335563, кл. С10М 173/02, 1998.

47. А.С. 1 384608, кл. С10М 173/02, 1987.

48. А.С. 4481320/04 опуб. 15.10.91. Бюл. №38.

49. А.С. 1456461 кл. С 10М 173/02, 1988.

50. Патент СРР №86667 кл. С10М 1/14. 1985.

51. Патент России №1300930, опуб. 20.02.95.

52. А.С. 96062335 опуб. 31.08.98. Бюл. №4.

53. А.С. 95052500 опуб. 30.08.98. Бюл. №2.

54. Кламанн Д. Смазки и родственные продукты. Москва, "Химия", 1988 с.

55. Нифактаев Е. Химия фосфорорганических соединений, Из-во МГУ, 1971.

56. Сравнительное исследование трибологических свойств моторных масел на типовой машине трения. Путинцев С. В., Пронин М. Д., Точенов М. Н. Изв. вузов. Машиностр. 2005, № 12, с. 23-28. Рус.; рез. Англ.

57. Исследование эксплуатационных свойств синтетической СОТС СБ-1. Беликова М. А., Болотников В. С., Бурлакова В. Э., Кужаров А. А. Вести. Дон. гос. техн. ун-та. 2005. 5, № 5. с. 721-726, 1 ил Библ. 7. Рус.; рез. Англ.

58. Повышение качества и срока службы СОЖ. Längere Standzeit — bessere Oberflächen. Werkzeuge. 2005, № 2, с. 54-55, 4 ил. Нем.

59. Производственные испытания новой смазывающе-охлаждающей жидкости (СОЖ) при шлифовании элементов подшипников. Коган Б. И., Джигирей А. В. Вестн. Кузбас. гос. техн. ун-та. 2006, № 4, с. 90-91, 191. Рус.

60. Экологически чистые рабочие и смазочные жидкости. Multifunctional

fluids for environmentally friendly machining: Combination of a synthetic ester and effective lubrication additives. Suda S., Yokota H., Wakabayashi T. Tribology and Lubrication Engineering: 14 International Colloquium Tribology, Ostfildern, Jan. 13-15, 2004. Vol. 2 Ostfildern: Techn. Akad. Esslingen. 2004, с 779-784, 7 ил. Библ. 9. Англ.

61. Виды и особенности смазочных материалов. Фукунага Итирог. Puranto enjinia – Plant Eng 2005, 37, Ns 6. с. 44-47, Табл 6. Яп.

62. Физиологически и пожаробезопасные СОЖ. Gesundheitsand Brandschutz groB geschrieben. Werkstatt and Betr. 2005 138, № 12 с 82-83, 3 ил Нем.

63. Смазочно-охлаждающая жидкость безвредная для окружающей среды. Environmentally acceptable metalworking fluid. Matei G. M., Cira L., Popescu D., Ion M., Icerp S. A. Tribology and Lubrication Engineering: 14 International Colloquium Tribology, Ostfildern, Jan. 13-15, 2004 Vol. 2 Ostfildern: Techn Akad Eislingen 2004. с 785-788 Библ 5 Англ.

64. Влияние загрязнителей окружающей среды на технологические свойства смазочно-охлаждающих жидкостей. Impact of environmental contaminants on machining properties of metalworking fluids. Greeley M., Rajagopalan N. Tribol. Int. 2004 37, № 4, с 327-332 Англ.

65. Универсальная смазка. Universal fluidum Last Werkzeugmaschinen sicher Laufen Mschinenmarket 2005 №23. с52, 1 ил. Нем.

66. Смазочно-охлаждающие жидкости для механической обработки магния и его сплавов. Modern cooling lubricants for effective magnesium machining. Schlindwein H. J. (Rhenus Lub GmbH & Co KG, Mönchengladbach, Germany). Tribology and Lubrication Engineering: 14 International Colloquium Tribology, Ostfildern, Jan. 13-15, 2004. Vol. 2. Ostfildern: Techn. Akad. Esslingen. 2004, с 849-860, 8 ил. Библ. 14. Англ.

67. СОЖ для механической обработки магния. Wassermischbere KSS furdire MG-Zerspanung. Rinderproduktin 2003 №49-50, с 17 Нем.

68. Темненко В. П. — В кн.: Смазочно-охлаждающие технологические среды: Сб. научн. тр. М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1982, с. 86 — 91.
69. Ребиндер П. А. Поверхностные явления в дисперсных системах: Избранные труды // Физико-химическая механика. М.: Наука, 1979. 381 с.
70. Перцов Н. В., Яковлев В. М. Роль поверхностных химических взаимодействий в проявлении эффекта Ребиндера при обработке металлов в галогеносодержащих средах // Физика и химия обработки материалов. 1985. № 3. С. 14-20.
71. Рутман П. А., Лобанцова В. С., Файнштейн И. З., Антонова Н. Г. Способ улучшения эксплуатационных свойств водоземulsionных СОЖ // Вестник машиностроения. 1987. № 12. С. 49-51.
72. Рутман П. А., Лобанцова В. С., Файнштейн И. З. Исследование влияния эмульгатора на эксплуатационные свойства СОЖ // Вестник машиностроения. 1990. № 4. С. 54-56.
73. Перцов Н. В., Яковлев В. М., Лобанов А. В. Повышение эффективности шлифования за счет применения абразивного инструмента с активным наполнителем // Обзорная информация ВНИИТЭМР. Технология, оборудование, организация и экономика машиностроительного производства. Сер. 6. Прогрессивные технологические процессы в машиностроении. М., 1987. 36 с.
74. Лазюк Ю. Н. Влияние поверхностно-активных смазочно-охлаждающих технологических средств на механическую обработку кремния и арсенида галлия: Автореф. дис. ...канд. хим. наук. М., 1989. 18 с.
75. Гриневич Р.В. Цасюк В.В. Смирнов А.С. «Специализированные машины трения. Сб. Применение синтетических материалов» издательство Картя Моловенска. Кишинев 1975. С. -33...35.
76. Технологические свойства новых СОЖ для обработки резанием/Под ред. М. И. Клушина. М.: Машиностроение, 1979. 192 с.
77. ГОСТ 9490-75. Материалы смазочные жидкие и пластичисеие .

78. Бакалейников М.Б. Шехтар Ю.Н. Фуукс И.Г. Нефтепереработка и нефтехимия, ЦНИИЭФнефтехим 1974. № 4 с. 16-17.
79. Резников А. Н. Теплообмен при резании и охлаждении инструмента. М.: Машгиз, 1963. 200с.
80. Бердичевский Е. Г., Бровин И, Л., Остафьев В. А. - Нефтеперераб. и нефтехим. Киев: Наукова думка, 1974, вып. 11, с. 60-64.
81. Смазочно-охлаждающие технологические среды для обработки металлов резанием: справочник/Под ред. С.Г. Энтелеса, Э.М. Берлинера. – М.: Машиностроение, 1986. 352 с., ил.
82. Топлива, смазочные материалы, технические жидкости. Ассортимент и применение. Спр. издание под ред. В.М. Школьников. «Химия», М. 1989.
83. Курчик М., Вайншток В.В., Шектер Ю.Ю. Смазочные материалы для обработки металлов резанием. – М.: Химия. с. 312.
84. Кириченко Л.М., Сіренко Г.О. Оптимізація технології мастильних матеріалів на основі хімічно-модифікованої ріпакової оливи. Журнал «Бюлетень наукового та професійного товариства ім. М. Міхновського», №8, 1998, с. 40-47.
85. Кириченко Л.М., Кириченко В.І., Свідерський В.П. Нові мастильно-охолоджуючі засоби для механічної обробки металів: проблеми одержання і застосування. Наук. журнал: Вісник Технологічного університету Поділля. №3, част. 1, 2001, с. 95-99.
86. Кириченко Л.М., Сіренко Г.О, Кириченко В.І., Свідерський В.П. Мастильна композиція. – Патент України на винахід 21510А. – Промислова власність, бюл. №2, 1998р.
87. Хайнике Г. Трибохимия. М.: «Мир», 1987, с. 486.
88. Олександренко В.П., Ковтун В.В., Першина Л.І. Дослідження хімічних і фізико-хімічних модифікації структури технічних рослинних олив з метою створення перспективних базових компонентів для нових паливно-мастильних матеріалів. Звіт про науково-дослідну роботу. 2001, 125 с.