

## РЕФЕРАТ

ПЗ: \_63\_с, \_19\_рис, \_4\_табл., \_3\_додатка, \_34\_літературних джерел.

Мета роботи: Оцінка впливу зшитого сополімеру акрилата та акриламід у складі МОТЗ на ефективність плоского шліфування конструкційних сталей.

Предмет дослідження: Визначення показників ефективності плоского шліфування конструкційних сталей з подачею у зону шліфування МОТЗ, складовою зшитого сополімеру акрилата та акриламід у воді стані в порівнянні з абразивною обробкою з подачею води.

У роботі було виконано :

- проведено аналіз літературних даних з використання полімерів під час механічної обробки;
- розроблено методологію визначення ефективності використання МОТЗ з полімерною складовою під час плоского шліфування сталей;
- визначено зміну експлуатаційних показників плоского шліфування сталей з використанням МОТЗ з додаванням розчину зшитого сополімеру;
- визначено механізм зміни ефективності шліфування з використанням МОТЗ з полімерною складовою;
- розроблено рекомендації по практичному впровадженню результатів роботи.

СИЛИ РІЗАННЯ, ПОЛІМЕР, МОТЗ, РЕЖИМИ РІЗАННЯ, МАКРОРАДИКАЛИ, ТЕМПЕРАТУРА, ДИСПЕРСІЯ, ШЛІФУВАННЯ, ВЕРСТАТ.

## REPORT

Software: \_58\_ with, \_19\_ Fig, \_4\_ tab., \_3\_ appendix, \_34\_ literary sources.

The goal of the work: Evaluation of the influence of the cross-linked copolymer of acrylate and potassium acrylamide as part of MOTZ on the efficiency of flat grinding of structural steels.

The subject of the research: Determination of the efficiency indicators of flat grinding of structural steels with feeding into the MOTZ grinding zone, a component of the cross-linked copolymer of acrylate and potassium acrylamide in a state dissolved in water in comparison with abrasive treatment with water feeding.

The work was carried out:

- an analysis of literature data on the use of polymers during mechanical processing was carried out;
- a methodology for determining the efficiency of using MOTZ with a polymer component during flat grinding of steels was developed;
- the change in operational parameters of flat grinding of steels using MOTZ with the addition of a cross-linked copolymer solution was determined;
- the mechanism of changing the grinding efficiency using MOTZ with a polymer component is determined;
- recommendations for practical implementation of work results were developed.

CUTTING FORCES, POLYMER, MOTZ, CUTTING MODES, MACRORADICALS, TEMPERATURE, DISPERSION, GRINDING, MACHINE.

## ЗМІСТ

Реферат.....	4
Вступ.....	7
1. Літературний огляд.....	10
2. Обґрунтування необхідності проведення дослідження.....	28
3. Методика проведення дослідження.....	30
3.1 Вимірювання і оцінка отриманих результатів.....	35
3.2 Вимірювання і оцінка отриманих результатів при випробуванні тертя.....	41
4. Розрахунок параметрів процесу різання.....	45
5. Результати досліджень.....	50
6. Оцінка сили тертя ковзання та сили тертя спокою.....	53
Висновки.....	56
Перелік літературних джерел.....	58
Додаток А.....	61
Додаток Б.....	62

## ВСТУП

У сучасних умовах, коли науково-технічний прогрес набуває все більшого розмаху і актуальності, розробка та впровадження нових технологічних засобів, зокрема мастильно-охолоджуючих технологічних засобів (МОТЗ), стає надзвичайно важливим етапом у підвищенні продуктивності промислових процесів. Ця актуальна проблема стає все більш важливою в контексті підвищення продуктивності праці, покращення використання обладнання та впровадження нових передових методів обробки в промисловості.

Важливим елементом вдосконалення МОТЗ є введення функціональних присадок у їх склад. Застосування сучасних МОТЗ стає більш різноманітним та складним з урахуванням вимог сучасного виробництва. Розумний вибір МОТЗ під час металообробки різанням дозволяє підвищити тривалість служби різального інструменту, покращити якість оброблюваних деталей та забезпечити високу ефективність процесу. Необхідно також зазначити, що МОТЗ мають значний вплив на умови праці, забезпечуючи створення сприятливих санітарно-гігієнічних умов.

Серед сучасних напрямків вдосконалення МОТЗ виділяється використання полімерів як присадок. Полімери широко використовуються в машинобудуванні як мастильні засоби для вузлів тертя деталей машин. Використання полімерів як присадок в МОТЗ базується на їх властивостях при термічній деструкції, коли вони виділяють складні органічні радикали з підвищеною хімічною активністю, особливо відносно молодих поверхонь металів.

Під час операцій, таких як шліфування, органічні полімери створюють на контактних площинах круга та обробленої поверхні пластичні плівки, які значно зменшують тертя та знос. Навіть невелика кількість полімерних присадок може призвести до утворення мономолекулярних захисних плівок, що забезпечують високу ефективність обробки.

З урахуванням прогресу у сфері хімії високомолекулярних з'єднань та застосування різних видів полімерів у різних галузях промисловості виникає потреба у виборі найбільш ефективних полімерних присадок для досягнення максимальних результатів в конкретних умовах металообробки.

**Мета роботи:** Оцінка впливу зшитого сополімеру акрилата та акриламід у складі МОТЗ на ефективність плоского шліфування конструкційних сталей.

**Об'єкт дослідження:** Водний розчин зшитого сополімеру акрилата та акриламід у складі МОТЗ в якості мастильно-охолоджувальної рідини під час шліфування конструкційної легированої сталі 40Х.

**Предмет дослідження:** Визначення показників ефективності плоского шліфування конструкційних сталей з подачею у зону шліфування МОТЗ, складовою зшитого сополімеру акрилата та акриламід у складі МОТЗ в розчиненому у воді стані в порівнянні з абразивною обробкою з подачею води.

**Наукова новизна:** Розроблено методик у дослідження та аналізування показників ефективності шліфування конструкційної сталі при плоскому шліфуванні з використанням мастильно охолоджувальної рідини з полімерною складовою. Показано що використання МОТЗ з складовою зшитого сополімеру акрилата та акриламід у складі МОТЗ під час абразивної обробки забезпечує зменшення шорсткості обробленої поверхні, температури шліфування при збільшенні складової сили різання  $P_z$ .

**Практична цінність:** Підвищення ефективності шліфування конструкційних сталей з використанням МОТЗ з полімерною складовою.

**Публікації:** Тези доповідей на щорічних конференціях «Тиждень науки» за 2022 та 2023 роки.

Робота впроваджена НУ «Запорізька політехніка» на кафедрі «Металорізальні верстати та інструменти» при підготовці бакалаврів на курсі «Теорія різання» спеціальності 133 «Галузеве машинобудування».

Задачі:

- провести аналіз літературних даних з використання полімерів під час механічної обробки;
- розробити методологію визначення ефективності використання МОТЗ з полімерною складовою під час плоского шліфування сталей;
- визначити зміну експлуатаційних показників плоского шліфування сталей з використанням МОТЗ з додаванням розчину зшитого сополімеру;
- визначити механізм зміни ефективності шліфування з використанням МОТЗ з полімерною складовою;
- Розробити рекомендації по практичному впровадженню результатів роботи.

## 1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

Вплив мастильно-охолоджуючих технологічних засобів (МОТЗ) на процеси шліфування є актуальною проблемою в області обробки матеріалів. Шліфування визнається одним із ключових процесів для отримання високоякісних поверхонь деталей та виробів, і ефективне використання МОТЗ може значно покращити результати цього процесу. Особливу увагу приділяють МОТЗ з полімерною складовою, оскільки ці нові матеріали відкривають широкий спектр можливостей для покращення результатів шліфування та виготовлення високоякісних деталей та виробів.

Основними завданнями використання (МОТЗ) є забезпечення змащувальної, охолоджуючої, диспергуючої та демпфуючої функцій. Змащувальна дія сприяє зменшенню тертя та, відповідно, кількості виділеної теплоти. Для досягнення цілей зменшення або усунення тертя потрібно створити роздільний плівковий шар. Плівка з рідини не завжди може вирішити це завдання через високий тиск на одиницю поверхні, який не дозволяє плівці проникати між виступами поверхонь, що стикаються і лишатися там. Отже, у цьому випадку завжди виникає так званий стан граничної змазки. Таким чином, однією з вимог до змащувальних властивостей МОТЗ є те, що за конкретних умов різання вона забезпечує змащувальний ефект у зоні граничного тертя [1, 2, 3].

Ефективне охолодження зони різання може бути досягнуто, якщо охолоджувальна рідина має високу теплопровідність і більшу питому теплоємність. Вода відповідає цим вимогам і водночас має незначну вартість. Вода як рідина для мащення поверхонь має наступні недоліки: слабкі змащувальні властивості та сильний вплив на прояв корозії на поверхнях. До того ж вода вимиває мастило з окремих вузлів та механізмів верстата, що може призвести до підвищеного тертя та зносу його елементів та зниження

довговічності. Потрапляння води в резервуар для мастила також є небажаним явищем [4].

На відміну від води мінеральна олія має гарні змащувальні та антикорозійні властивості, змащує вузли тертя верстата, але має нижчу теплопровідність, і питому теплоємність.

Таблиця 1.1 Змащувально-охолоджувальні властивості води і Мінеральної олії

Змащувально-охолоджувальні властивості	Вода	Мінеральна олія
теплопровідність	+	-
антикорозійні властивості	-	+
змащувальні властивості	-	+
питому теплоємність	+	-

Ефективність охолодження мінеральними маслами може бути до певної міри підвищена зменшенням їх в'язкості, так як мало в'язка олія має більшу плинність і може відводити велику кількість теплоти. З додаванням присадок до цих олій ефективність охолодження не підвищується [4].

Змащувальні властивості мінеральних масел покращуються шляхом додавання присадок, які зменшують тертя між стружкою і передньою поверхнею ріжучого інструменту і цим полегшують відведення стружки, призводять до зниження ступеня деформації стружки і, звичайно, зменшують тепловиділення.

Охолоджувальну властивість води може бути використана, якщо усунути недоліки які вказані вище (табл.1.1). Одним із способів полягає у формуванні масляних емульсій додаванням у воду олій.

## **Масляні емульсії**

Оснoву масляних емульсій становить суміш води, мінеральної олії та емульгатора. Перемішування масла з водою за умови наявності емульгатора призводить до утворення масляної емульсії. При цьому утворюються краплі діаметром від 0,005 до 0,002 мм. Сучасні масляні емульсії мають складну структуру і містять не тільки емульгатори, але й інші речовини, які покращують змащуваність, зменшують спінюваність та підвищують зносостійкість. Вода за умов впливу зовнішніх кліматичних умов (вологість, температура тощо) сприяє розмноженню бактерій в емульсії, для уникнення цього ефекту можливе додавання до складу відповідних бактерицидів. Додаванням продуктів на основі сірки, хлору і фосфору отримують емульсії з виключно хорошими властивостями, що змащують, звані ПАР-емульсіями [4].

## **Хімічні (синтетичні) МОТЗ**

Перша хімічна (синтетична) МОТЗ була призначена для шліфування і складалася з води з розчиненими в ній антикорозійними інгібіторами. Ця рідина, створювалася з метою усунення негативних явищ при шліфуванні (прилипання стружки до абразивних інструментів та труднощі, пов'язані з видаленням металевих частинок з масляної емульсії). Хімічні МОТЗ являють собою розчини неорганічних або органічних речовин у воді або ж розчини, збагачені присадками, які знижують поверхневе натяг води і впливають на формування колоїдного стану між поверхнево-активними молекулами. МОТЗ цього типу дуже чиста і прозора, а при збагаченні присадками на основі сірки, хлору або фосфору набуває і високих поверхнево-активних властивостей. Масляні емульсії та хімічні МОТЗ містять у собі, крім води та основних компонентів, ряд інших хімічних сполук, необхідних для отримання МОТЗ з необхідними характеристиками [4].

Ефект Ребіндера - це утворення нової поверхні при пластичній деформації або руйнуванні металу перед розривом металевих зв'язків з великими енерговитратами. Адсорбція або хемосорбція молекул з газової або

рідкої фази на знову утворюються поверхнях в момент їх зародження знижує вільну поверхневу енергію, зменшуючи тим самим опір зсуву. Пластифікуюча дія середовища в процесі різання металу є позитивним фактором: по-перше, полегшується розвиток пластичної деформації в зоні переходу матеріалу заготівлі в стружку; по-друге, умови пластичного контакту інструменту з заготівлею і стружкою досягаються при менших нормальних напругах через зниження межі плинності від у плямах контакту; по-третє, зменшується опір зсуву при пластичній деформації виступаючих мікронерівностей на поверхні контактуючих тіл, а отже, і сила тертя. Всі ці фактори сприяють зниженню сил різання та зношування інструменту [5].

Полімеровмісні середовища можуть створюватися на основі розчинів і дисперсій високомолекулярних з'єднань. Використання полімерів у різних технологічних процесах обробки твердих тіл, у тому числі як активні компоненти МОТЗ для різання, обумовлено здатністю полімерів активувати процес поверхневого деформування та диспергування твердих тіл. Ефективність дії полімеру містять МОТЗ при різанні залежить від специфічних фізико-хімічних процесів в зоні різання, що протікають в результаті деструкції макромолекул полімеру з утворенням різноманітних активних продуктів, що взаємодіють з оброблюваною поверхнею і матеріалом різального інструменту. Активуюча дія полімервмісних середовищ визначається хімічною природою, молекулярною масою і концентрацією полімеру в середовищі. Встановлено, що ефективність дії полімервмісних МОТЗ істотно залежить від режимів різання і більшою мірою проявляється при їх посиленні. Розроблено полімервмісні мастильно-охолоджуючі середовища на водній та масляній основі з використанням полімерних латексів, синтезованих сополімерних продуктів і порошкоподібних полімерів для різних видів механічної обробки металів. Таких як МОТЗ МХО-60, МХО-62, МХО-70.

При використанні (МОТЗ) у механічній обробці, особливо при високих контактних тисках між інструментом і оброблюваним матеріалом, наявність в

МОТЗ поверхнево-активних компонентів, таких як органічні кислоти, мила, спирти та інші речовини, що адсорбуються на молодих поверхнях, грає важливу роль у забезпеченні їх не витискання.

Запобігання витискання таких поверхнево-активних компонентів є важливим аспектом для забезпечення ефективності процесу обробки та забезпечення якості обробленої поверхні. Ця властивість МОТЗ сприяє зниженню тиску та мінімізації тертя під час механічної обробки при високому тиску.

Ці поверхнево-активні компоненти допомагають утворити тонку плівку або шар на контактних поверхнях інструмента та оброблюваного матеріалу. Цей шар сприяє зменшенню тертя та зносу, а також забезпечує змащення і захист поверхонь від зносу при високому тиску під час механічної обробки.

Погана оброблюваність сучасних конструкційних матеріалів під час різання обумовлена як їх високими фізико-механічними властивостями, так і тим, що через хімічні характеристики оброблюваних і інструментальних матеріалів на контактних поверхнях виникає адгезія. Це призводить до того, що інструментові доводиться подолати великі сили тертя, крім опору відокремлення знімного шару [6].

Зробити процес різання легше можливо шляхом застосування звичайних (МОТЗ) з невеликими додатками (1-1.5%) високомолекулярного сполуки, такої як поліетилен.

Дослідження, проведені в цьому напрямку М. И. Подольским і А. В. Музикою, показали, що деякі гази, що виділяються під час піролізу полімерної домішки на гарячих поверхнях стружки та інструменту, проявляють трибологічну активність. Ця активність проявляється в зменшенні обертального моменту, що виникає при точінні сталеві заготовки в атмосфері відповідного газу [6].

Оскільки перетворення полімерної присадки піролітичного характеру спрямовані на утворення вуглецю та водню в їх атомарних та активних формах, таких як радикали, іони та іон-радикали, під час процесу різання

відбувається збагачення зрізаного шару металу та активна участь водню в механо-хімічному процесі. Тимчасом, на поверхнях ріжучих кромки інструменту накопичується вуглець у формі графіту, яке виступає як ефективне мастило, сприяючи також термічній карбонізації леза інструменту [6].

З'ясувалося, що додавання полімерної домішки до (МОТЗ) допомагає зменшити енерговитрати на процес механічної обробки різання і підвищує стійкість ріжучого інструменту [6].

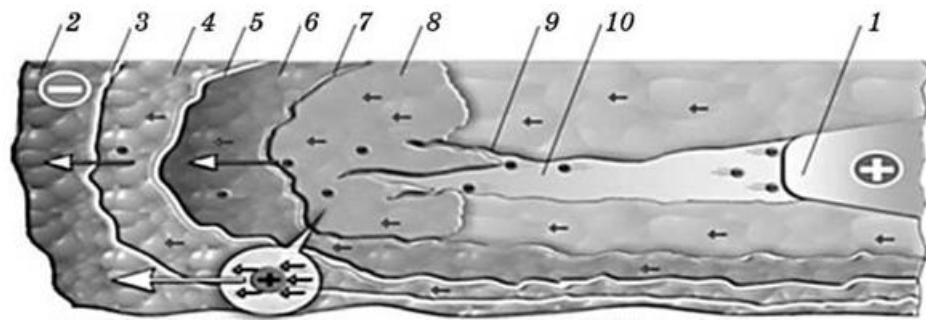
В роботі, обґрунтування механоплазмового ефекту, що виникає у процесі механічної обробки металу у мастильно-охолоджуючих технологічних засобах авторами якої є А. И. Сошко, В. А. Сошко, запропоновано модель перетворення у зоні різання поверхнево-активного мастильно-охолоджуючого технологічного засобу МОТЗ в радикально активну водневу плазму. Таке явище є особливо яскраво вираженим, коли до складу МОТЗ додається високомолекулярна сполука певного хімічного складу та концентрації. Оскільки ланцюг піролітичних перетворень полімерної присадки до МОТЗ приводить до появи водню та вуглецю в атомарній та інших активних формах, авторами було висунуто гіпотезу про активну участь протонів у механохімічному процесі при металообробленні й одночасну перманентну карбонізацію різальних кромки інструменту. Сукупність експериментальних даних показує, що різні контактні взаємодії матеріалу із середовищем, а також фізико-хімічні процеси, що відбуваються в результаті руйнування металу, пов'язані, в першу чергу, з електрично активною реальною структурою матеріалу, що виникає внаслідок механічного впливу. Показано вирішальну роль утворення та зростання тріщини як чинника, що ініціює та пришвидшує різні фізико-хімічні процеси і явища, які мають місце у щілині між клином інструменту і вершиною тріщини та приводять до утворення водневої плазми. На підставі досліджень [7,8,9], присвячених різним фізико-хімічним явищам, що виникають у момент руйнування твердого тіла, зроблено спробу розглянути зниження енерговитрат на процес

різання металу з МОНЗ як результат сукупного механічного і теплового впливу. Додатковим джерелом тепловиділення є рекомбінація йона Гідрогену в ультрамікроскопічних областях безпосередньо в зоні подолання зчеплення між атомами оброблюваного металу. Запропонований спосіб механоплазмового оброблення металу не тільки має високу ефективність, а й уможливорює виготовляти вироби з підвищеною експлуатаційною довговічністю [7, 8, 9, 10, 11].

Аналіз інформації щодо механізму впливу різних змащувально-охолоджуючих технологічних засобів МОНЗ на процеси деформації та руйнування металу, зокрема на процес його механічної обробки різанням, а також досягнення в суміжних науках дозволили підтвердити гіпотезу про хімічну активацію початкового складу МОНЗ в зоні руйнування з утворенням на завершальному етапі водневої плазми та вуглецю [7, 8, 9, 10, 11].

В роботі доведено що першим етапом багато ланцюжкових хімічних перетворень є розпад вуглеводневого складу МОНЗ на гарячих поверхнях стружки та інструмента з утворенням газової суміші, що складається з гомологічного ряду аліфатичних насичених вуглеводнів, електронів, активного водню та вуглецю.

Подальше газова суміш потрапляє в реакційний проміжок — простір, обмежений поверхнями клина інструмента, ювенільними поверхнями тріщини руйнування та її вершиною, де збільшується ступінь іонізації газу до утворення водневої плазми (рис. 1.1).



1 — лезо ріжучого інструменту, 2 — оброблюваний метал, 3 — перехідна область, 4 — область пружної деформації, 5 — область початкового руху дислокацій, 6 — область пластичної деформації, 7 — область до-критичного зростання тріщин, 8 — область руйнування, закритична стадія росту тріщин, 9 — ювенільні порожнини тріщин, 10 — головна тріщина, заповнена водневою плазмою

Рисунок 1.1 - Схематичне зображення реакційної зони [11]

В екстремальних умовах механічної обробки водень може потрапляти в зону руйнування своєчасно лише шляхом переміщення між вузлами решітки у протонному стані, і дифузійний потік заряджених частинок водню може відбуватися завдяки наявності в системі метал-водень електричного поля. Продемонструвавши в зоні подолання зчеплення між атомами трибологічну активність (механо-плазмовий ефект), водень сприяє полегшенню процесів деформації та руйнування оброблюваного металу. Одночасно з цим вуглець у вигляді графіту, накопичуючись під час різання на ріжучих кромках, зменшує тертя між контактуючими поверхнями і здійснює постійну карбонізацію леза інструмента. Ці процеси підвищують зносостійкість інструмента і зменшують енергетичні витрати на механічну обробку.

Розглянемо ситуацію, що складається в області реакційної зони, де концентруються локальні механічні напруження, температура та активні елементи оточуючого середовища, тобто в області подолання зчеплення між атомами металу. При цьому враховували, що вихідна поверхнево-активна вуглеводнева складова МОТЗ вже активована на гарячих поверхнях зони різання з утворенням газової суміші.

Схематично показана реакційна зона (рис. 1.1), яка формується одночасно з початком процесу різання і складається з двох частин: простору, обмеженого клином інструменту та поверхнями оброблюваного матеріалу, а також мікроскопічної щілини на міжатомному рівні, яка утворюється внаслідок взаємодії дислокацій на дуже ранніх стадіях пластичного деформування тіла. Зауважили, що зображення реакційної зони відповідає уявленню про фізику руйнування металу в процесі його різання, яке передбачає наявність простору перед клином інструменту, що переходить у мікротріщину атомного рівня [7-12].

У зв'язку з руйнуванням металу в реакційній зоні постійно протікає супутній цьому процесу ряд фізико-хімічних явищ, взаємозв'язок яких з вуглеводневою газовою сумішшю, що проникає в зону через мережу мікротріщин та інших дефектів, спричинює утворення водневої плазми, і ці самі процеси і явища визначають вектор переміщення протонів, спрямований до вершини тріщини руйнування. Іонізаторами речовин, що входять до складу газової суміші, є: каталітично активна знову утворювана ювенільна поверхня, електроіскрові розряди в зоні контакту інструмента з заготовкою, потік електронів великої енергії та інтенсивності, який вилітає з зони подолання зчеплення між атомами в мікропроріз [13].

Ефективність механоплазменної обробки при додаванні МОТЗ з полімерною складовою підтверджується результатами промислових випробувань під час формоутворення металу у всіх видів механічного впливу, як різанням, так і тиском, під час шліфування і полірування [7].

Результати промислових випробувань показали надзвичайно високу ефективність механоплазменної обробки, що дозволяє значно інтенсифікувати процес виготовлення виробів за підвищення якості оброблених поверхонь і досягнення високого економічного результату [7].

Наведено деякі дані про різання сталі з різними фізико-механічними властивостями інструменту, ріжуча частина якого виготовлялася з швидкоріжучої сталі, твердого сплаву та мінералокераміки. Було встановлено,

що загальні енергетичні витрати зі збільшенням параметрів різання зменшуються до 40%, зносостійкість інструменту збільшується. При цьому дотримувалась задана точність, поліпшувалась чистота обробленої поверхні, збільшувалась експлуатаційна витривалість виробів [13].

В роботі вплив макрорадикалів на ефективність шліфування стрічками з гранулоvanого абразивного матеріалу авторам якої є В. В. Циганов, доведено що одним з найбільш перспективних напрямків чистового шліфування та полірування металів є використання сферичного гранульованого абразивного матеріалу, як у вільному вигляді, так і як складі абразивного інструменту.

Ріжуча здатність гранульованого матеріалу та його вплив на оброблений поверхневий шар суттєво залежать не тільки від характеристики абразивного зерна, але й від розміру гранул, щільності покриття поверхні зернами, фізико-хімічних властивостей сполучної речовини. Залежно від способу виготовлення гранули можуть бути: суцільні, порожнисті, із порами. При цьому, як зв'язування доцільно застосування термопластичного полімеру, що дозволяє змінювати жорсткість гранул за різних умов полімеризації [14].

У процесі обробки забезпечується підвищене руйнування металів у результаті взаємодії з оброблюваною поверхнею вільних макрорадикалів, що утворюються внаслідок термомеханічного руйнування полімеру – його деструкції. Підвищення площі контакту зв'язування гранульованого матеріалу з оброблюваною поверхнею супроводжується зменшенням зусилля мікрорізання абразивних зерен. Механічно деструктовані полімери активують руйнування частинок металу так само, як низькомолекулярні поверхнево-активні речовини. Чим нижча енергія активації деструкції полімеру, тим вищий ступінь руйнування металу [15].

Доведено що для гранульованого абразивного матеріалу, найбільш доцільним є застосування поліметилметакрилату (ПММА). Він один із небагатьох поширених полімерів, який повністю розпадається до мономеру. В інших полімерів вихід мономеру варіюється від нуля до значної частки у загальному виході летких продуктів.

Енергія активації поліетилену 60-70 ккал/моль, ПММА - 27ккал/моль. Однак ПММА не використовується як зв'язування серійних абразивних інструментів, що обмежує можливість оцінки впливу вільних макрорадикалів на ефективність фінішної абразивної обробки [15].

У процесі чистового шліфування і полірування гранульованим абразивним матеріалом, що розглядається, створюються сприятливі умови для забезпечення взаємодії вільних макрорадикалів з обробленою поверхнею. Досягається це можливістю застосування як зв'язування гранул ПММА та збільшення площі контакту полімеру з поверхнею заготовки, що забезпечується суцільними гранулами з мінімальною кількістю пор.

Були виготовлені дослідні шліфувальні стрічки розміром 65x1900 мм на водостійкій тканинній основі з використанням гранульованого абразивного матеріалу, отриманого методом радикальної суспензійної полімеризації метилметакрилату. Середній діаметр гранул 400 мкм із покриттям з абразивних зерен 14А8П. Оцінку ефективності застосування дослідних шліфувальних стрічок, у порівнянні з обробкою серійними стрічками 14А8П, проводили при шліфуванні плоских зразків нержавіючої сталі 10Х14АГ15 без МОТЗ і з подачею в зону різання 5% водоемульсійної МОТЗ на основі сірчанохлорованого МОТЗ %, сірки – 0,8 %). Притискання стрічки до поверхні заготівлі під час шліфування здійснювали через контактний вал діаметром 163 мм з гумовим покриттям без нарізки товщиною 6мм, твердістю 70 од. по Шору. Продуктивність обробки визначали у перерахунку на довжину заготівлі 1000 мм. Режими шліфування:  $V = 22,7$  м/с;  $P_y = 7$  Н/см;  $S = 10$  м/хв [15].

Зазначений характер зміни ріжучої здатності дослідних та серійних абразивних стрічок відбувається у процесі обробки, як із подачею в зону різання водоемульсійної МОТЗ, так і без МОТЗ. Однак величина зміни продуктивності шліфування та шорсткості обробленої поверхні вказують на неоднозначний вплив хіміко-фізичних властивостей гранул на ефективність обробки. Так, шліфування без подачі МОТЗ стрічками з гранульованого абразивного матеріалу, порівняно з обробкою серійними стрічками,

призводить до зниження шорсткості обробленої поверхні в середньому на 10% [15].

Під час обробки з подачею водоемульсійної МОТЗ спостерігається зворотна залежність. Шліфування дослідними стрічками супроводжується збільшенням шорсткості обробленої поверхні порівняно з обробкою серійними стрічками в середньому на 30%. Так як величина шорсткості обробленої поверхні за певних умов може бути мірою оцінки зміни ріжучої здатності абразивного інструменту, очікується і підвищення при цьому продуктивності шліфування.

Проведений аналіз показує на відміну порівняльних експлуатаційних показників шліфування стрічками з гранульованого абразивного матеріалу та серійними стрічками при обробці без МОТЗ та з подачею МОТЗ у зону різання. Припустили, що причина цього явища полягає у наявності вільних радикалів у зоні контакту гранульованого абразивного матеріалу та оброблюваної поверхні. Причому міра їх впливу істотніша при обробці в середовищі використовуваної водоемульсійної МОТЗ.

На підставі проведеного аналізу комплексу досліджень працездатності гранульованого абразивного матеріалу при стрічковому шліфуванні зробили висновок, що наявність вільних макрорадикалів у зоні різання істотно впливає на ефективність процесу обробки. Обробка стрічками з гранульованого абразивного матеріалу без подачі МОТЗ в зону різання призводить до отримання більш міцного фрагментованого поверхневого шару, який характеризується підвищеною зносостійкістю. Вплив макрорадикалів на підвищення продуктивності різання, у цьому випадку, проявляється меншою мірою, що, можливо, пов'язане із спільною дією явища дифузії активних радикалів та окислення поверхні[15].

В роботі: “Дослідження працездатності абразивних композитів, що формують активні технологічні середовища у зоні різання” [16] вказують що в результаті деструкції полімерної складової композитів у динамічній контактній зоні формуються газові технологічні середовища, здатні впливати

на поверхню, що обробляється. Такі газові середовища є низькомолекулярними продуктами деструкції полімерної складової зі значною часткою частинок радикальної природи. Згідно з експериментальними даними, саме вільні радикали є найбільш активним компонентом газового середовища, що формується в контактній зоні при деструкції не термостабільної складової композитів [16].

В якості результатів дослідження впливу активних технологічних середовищ, що формуються в контактній зоні при деструкції полімерної складової розроблених композитів, на працездатність виготовлених на їх основі шліфувальних інструментів. Доведено вплив концентрації активного газового середовища на ріжучу здатність інструменту (рис.2). У всіх досліджених випадках зафіксовано збільшення знімання оброблюваного матеріалу зі збільшенням концентрації радикальних частинок, що виділяються полімерною складовою композиту в контактній зоні [16].

У роботі доведено що при шліфуванні в контактній зоні неминуче виникають короточасні розриви суцільності плівки МОТЗ, що є каналами, якими можливий доступ активних летких компонентів до оброблюваної поверхні. Досліджували працездатність шліфувальних кругів форми А8 при внутрішньому шліфуванні посадкових отворів кілець підшипників (сталь ШХ15). Результати випробувань показано на рис. 5 [16].

Отримані результати свідчать, що у присутності рідких технологічних середовищ розроблені композити зберігають високу механохімічну активність. Відзначено пряму кореляцію між концентрацією радикальних частинок у продуктах деструкції полімерної складової композиту та ріжучою здатністю інструменту, а також якісними характеристиками оброблених поверхонь. Таким чином, активні газові технологічні середовища, які формуються розробленими композитами в зоні різання, істотно впливають не тільки на ріжучу здатність абразивного інструменту, а й параметри оброблених поверхонь. Вплив летких продуктів деструкції полімерної складової на якість обробленої поверхні комплексно досліджували на

прикладі плоского шліфування жароміцного сплаву ХН77ТЮР. В експериментах використовували круг 1А1 250х20, виготовлені з композитів різних характеристик, абразив – порошок електрокорунду 25А зернистістю 160/125. Для порівняння використовували шліфувальний круг такого ж типорозміру з абразивним зерном на стандартній керамічній зв'язці К5. Шліфування даним кругом проводилося лише у присутності МОТЗ, оскільки без МОТЗ на оброблюваній поверхні утворювався сильний припал [16].

Істотний вплив концентрації активного газового середовища на процес шліфування проявляється у зниженні потужності шліфування та шорсткості обробленої поверхні, підвищенні та стабільності ріжучої здатності, зменшенні дефектності обробленої поверхні. У присутності рідких технологічних середовищ розроблені композити зберігають високу механохімічну активність [16].

Окрім шліфування, існує також абразивно-струменева обробка — це широка тема, яка включає абразивно-повітряний струмінь (AAJ), абразивно-водострумний (AWJ) та абразивно-струменевий шлам (ASJ). ASJ використовує насос, який подає стиснений повітря в змішувальний резервуар, де вода та суспензія попередньо змішуються, а суспензія під тиском впорскується безпосередньо в головку форсунки. У AWJM сухі абразиви з повітрям як середою-носієм вводяться у водострумний. Якщо використовується суспензія (де вода використовується як рідина-носіє для абразивів), струмінь називається абразивною шламовою струменем високого тиску (HASJ). Варто також відзначити розробку багатофазної струминної обробки (MJM), яка вводитиме абразиви, змішані зі суспензією, у потік повітря [17].

Багато попередніх досліджень запропонували та довели ефективність додавання довголанцюгових полімерних добавок у водоструйні машини для покращення продуктивності різання. [18,19] Їх використовували для різання різних матеріалів, починаючи від пінопласту, профнастилу, деревини тощо, до металів та матеріалів, які важко обробляти, а також композитів. Про ці покращення також повідомлялося у багатьох експериментах підводного

різання. [20,21] Крім того, повідомляється, що додавання полімерів з високою молекулярною масою до попередньо змішаних мікроабразивних водяних струменів забезпечує кращу продуктивність для таких застосувань, як видалення задирок. [22]. Ці висновки привели до використання добавок у AWJ та ASJ для підвищення ефективності різання.

Поліакриламід (PAM) є найбільш використовуваними полімерними добавками в AWJM і виявляють властивості розрідження при зсуві. Він був представлений Кудіним О. М., [23], який спостерігав значне поліпшення різання та знесення сопел під час різання під водою високовуглецевої сталі. Додавання полімерів Nalco покращило продуктивність водоструму, що використовується для підводного різання металів під високим тиском [24].

Є три основні структурні форми полімерних молекул. За цими формами полімери поділяють на лінійні, розгалужені і зшиті. Лінійні полімери – це полімери, в яких елементарні ланки з'єднані в один ланцюг. Розгалужені полімери – це полімери, в яких є бічні відгалуження від основного ланцюга макромолекули. Розгалуженість полімеру сильно впливає на його фізичні властивості – зменшується кристалічність, полімери не здатні упаковуватись у кристалічні решітки. Бокові функціональні групи не є відгалуженнями, наприклад, у макромолекулі полістиролу бензольні кільця не є відгалуженнями. Зшиті полімери – це полімери, макромолекули яких зв'язані поперечними містками [25].

Зшивання може відбуватися в процесі синтезу полімеру і під час його хімічної обробки. Коли кількість зшивань стає досить великою, одержують тримірно зшитий або сітчастий полімер (одну гігантську макромолекулу). Наявність невеликої кількості зшивань надає полімеру добрих еластичних властивостей. Полімери з високим ступенем зшивання вирізняються великою жорсткістю, стабільністю розмірів в умовах нагрівання й навантаження, що наочно виявляється у фенолоформальдегідних полімерах (бакеліти, вимикачі, армовані пластики) і в сечовино-формальдегідних полімерах [26].

Гідрогелі — це полімерні тривимірні мережі, які можуть поглинати велику кількість води та інших рідин без шкоди для своєї структури [ 27 , 28 , 29 ]. Їх набухання залежить від наявності певних функціональних груп, ступеня зшивання, гнучкості ланцюга, тактичності, кристалічності компонентів [29], термічної історії [30].

Суперабсорбентні гідрогелі (SAH) складаються з поперечно-зшитих і тривимірних полімерів, які поглинають у сотні разів більше своєї ваги у воді. Сільськогосподарські гідрогелі зазвичай синтезуються з К + акрилату та акриламиду як мономерів, демонструючи водопоглинаючу здатність відповідно до поперечного зшивання, а також наявність гідрофільних груп [31].

На рисунку 2 показана ймовірна реакція між акриловими мономерами та зшиваючим агентом для утворення полімерної сітки. Небажані залишки, такі як непрореаговані молекули фо-ініціатора та мономерів, а також вільні олігомери, були видалені на етапі очищення [32].

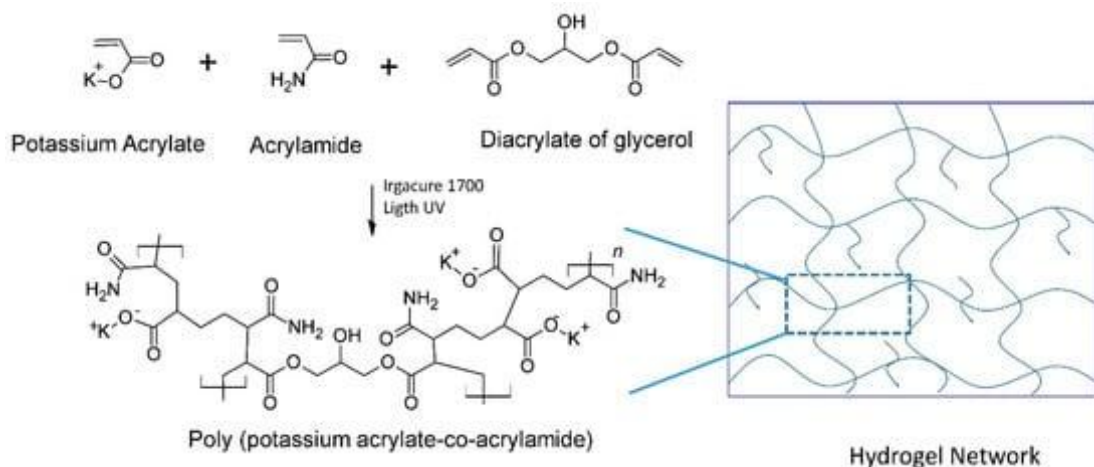


Рисунок 2. 1 - Пропоноване формування полімерної сітки [33]

Під час приготування гідрогелів можна контролювати температуру реакції за допомогою фотополімеризації. Контролюючи ентропію реакційного розчину при низьких температурах, утворювалася впорядкована полімерна сітка, що дозволяло отримувати прозорі та однорідні гідрогелі [33].

**Висновок:**

1. При сучасних тенденціях необхідно підкреслити важливість використання мастильно-охолоджуючих технологічних засобів (МОТЗ) в процесі шліфування для поліпшення якості обробки поверхонь деталей та виробів. Зокрема, МОТЗ з полімерною складовою, які включають поверхнево-активні компоненти, дозволяють забезпечити ефективне змащення, охолодження, демпфування та диспергування під час механічної обробки. Доведено, що забезпечення змашувальної дії є ключовим аспектом для зниження тертя та витрати теплоти під час шліфування. Полімерні МОТЗ здатні утворювати тонку плівку або шар на контактних поверхнях, що сприяє зменшенню тертя та зносу, а також забезпечує захист поверхонь від зносу при високому тиску.

2. Дослідження, підтверджують, що гази, виділяються під час піролізу полімерної домішки під час механічної обробки, проявляють трибологічну активність, зменшуючи обертальний момент та сприяючи покращенню стійкості ріжучого інструменту. Додавання полімерної домішки до мастильно-охолоджуючих технологічних засобів допомагає знизити енерговитрати процесу механічної обробки різання, що підсилює ефективність та тривалість роботи інструменту.

3. У процесі механічної обробки металу з використанням мастильно-охолоджуючих технологічних засобів (МОТЗ), визначено, що додавання високомолекулярних сполук до МОТЗ викликає перетворення у зоні різання поверхнево-активного МОТЗ в радикально активну водневу плазму. Це явище, яке виникає внаслідок хімічної активації МОТЗ, сприяє зменшенню енерговитрат на процес різання металу, підвищує стійкість ріжучого інструменту та може бути використане для отримання виробів із підвищеною експлуатаційною довговічністю.

4. Під час працездатності абразивних композитів, що формують активні технологічні середовища у зоні різання вказано, що деструкція полімерної складової у динамічній контактній зоні формує газові технологічні

середовища з високою концентрацією вільних радикалів. Зазначено, що при шліфуванні в контактній зоні виникають короточасні розриви суцільності плівки МОНЗ, що створює канали для доступу активних компонентів до оброблюваної поверхні. Це впливає на зниження потужності шліфування та шорсткості обробленої поверхні, а також на підвищення та стабільність ріжучої здатності інструменту.

5. Зшивання полімерів може відбуватися як під час синтезу, так і в процесі хімічної обробки. Залежно від кількості зшивань можна отримати тривимірно зшитий або сітчастий полімер, що визначає його фізичні властивості. Високий ступінь зшивання призводить до великої жорсткості та стабільності розмірів.

6. Суперабсорбентні гідрогелі (SAH) визначаються високою здатністю поглинання води і широким застосуванням у сільському господарстві. Дослідження показують, що їх можна синтезувати за допомогою реакції акрилатних мономерів та зшиваючого агента.

## 2 ОБҐРУНТУВАННЯ НЕОБХІДНОСТІ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Літературний огляд показує що використання різних складів МОТЗ надає різні властивості і підбираються в залежності від типу поверхонь, оброблювального матеріалу та зовнішніх умов. Більшість складових які використовуються в складі МОТЗ, мають шкідливий вплив та відносно дорого вартості. Так як було сказано вище вода має відмінні охолоджувальні властивості а її змащувальні властивості можливо підвищити з додаванням різних полімерних присадок. В усіх розглянутих джерелах не має інформації про досліди використання полімеру при плоскому шліфуванні. Наявні досліди були проведені при токарній обробці, абразивними композитними полімерними кругами, стрічками з сферичного гранульованого абразивного матеріалу. Тому було вирішено використовувати в якості полімеру зшитий сополімер акрілата та акриламід у калію. Цей полімер задовольняє як екологічні так і економічні потреби.

Використання полімерної присадки призводить до деструкції полімеру. Продукти деструкції з утриманням вуглецю та водню в їх атомарних та активних формах, таких як макрорадикали, іони та іон-радикали, під час процесу різання призводять до збагачення зрізуваного шару металу та активної участі водню в механо-хімічному процесі. При цьому можливе підвищення ефективності обробки за рахунок збільшення сил різання та продуктивності обробки, зменшення шорсткості обробленої поверхні та температури у зоні шліфування.

Підвищення ефективності плоского шліфування дозволяє суттєво зменшити собівартість виготовлення відповідальних деталей машин та механізмів машинобудівної галузі, підвищити їх експлуатаційну довговічність.

Для проведення дослідження була розроблена структурно-логічна схема проведення дослідження, яка складалася з двох основних частин: теоретичної та експериментальної.

У теоретичній частині буде проведено аналіз літературних джерел з використанням полімерів у складі МОТЗ при обробці металів різанням з обґрунтуванням необхідності проведення подальших запланованих досліджень.

В експериментальній частині планується розробка методики проведення дослідження. Також необхідно обрати обладнання та різальний інструмент, обрати полімер та призначити відповідні режими різання при його використанні. Після проведених досліджень буде зроблена оцінка ефективності застосування полімеру при різанні металів.

### 3 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Уперше розроблено методику дослідження та аналізування отриманих даних рис. 3.1 впливу зшитого сополімеру акрилата та акриламідю калію у розчиненому стані з водою концентрацією 0,02% на ефективність шліфування конструкційної легованої сталі 40Х на плоско шліфувальному верстаті 3Г71М, загальний вид проведення дослідів наведено на рис. 3.2 та рис 3.3.

В роботі був використаний зшитий сополімер акрилата та акриламідю калію, з молекулярною масою 181,23 г/моль. Зшитий сополімер акрилата і акриламіда калію добре розчиняється у воді та водних розчинах.

Використовували шліфувальний круг 1 250x32x76 14А 25П СТ1 К7 35м/с А1кл ГОСТ 2424-83. На заготовці розміром 50x36x20 зроблено отвір діаметром 3мм для введення спайки термопари. Режими різання: повздовжні переміщення заготовки 1 м/хв, швидкість шліфування 33м/с, зусилля натискання до оброблюваного зразка 10 Н/мм, машинний час роботи 2,50 хв.

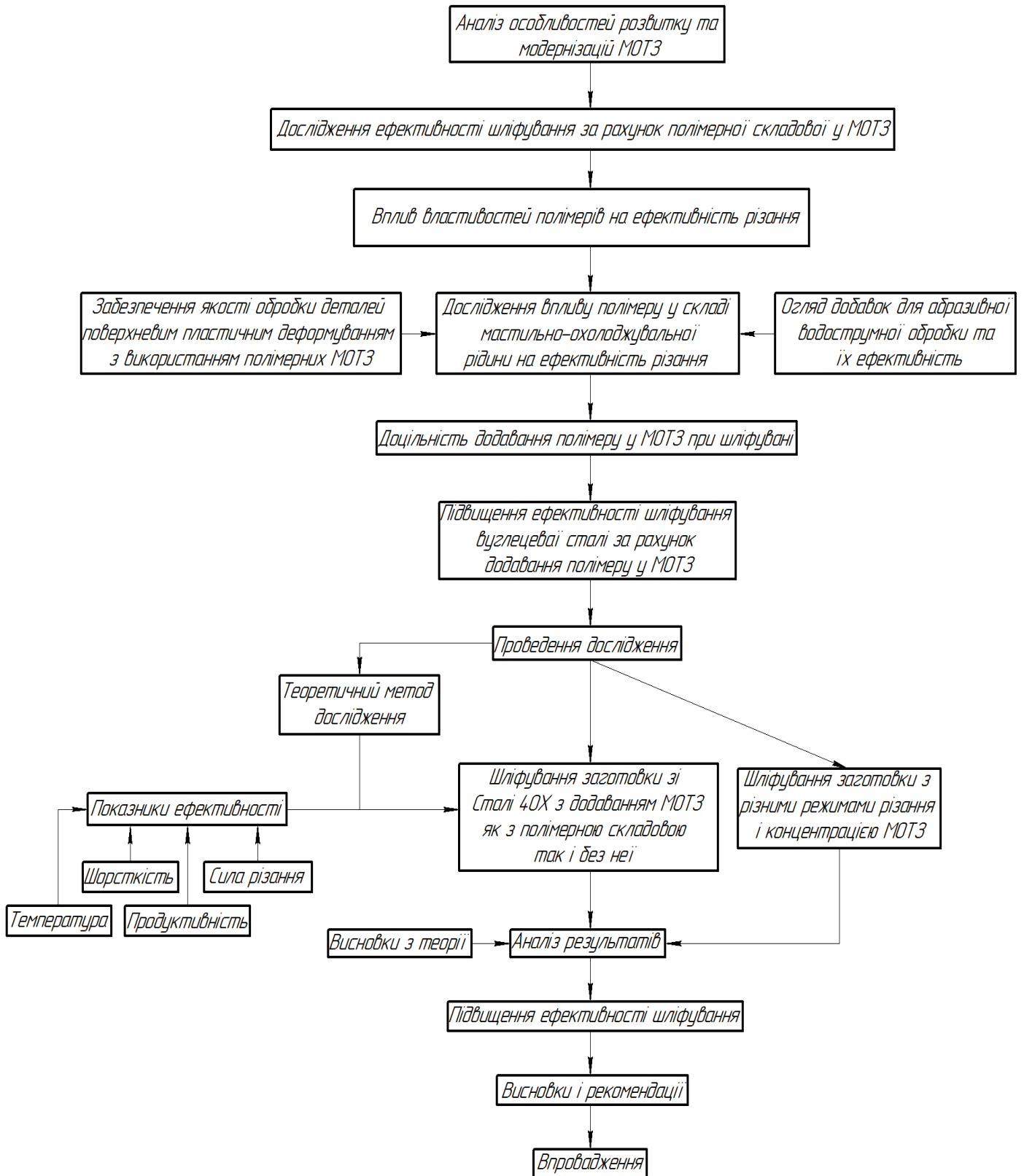
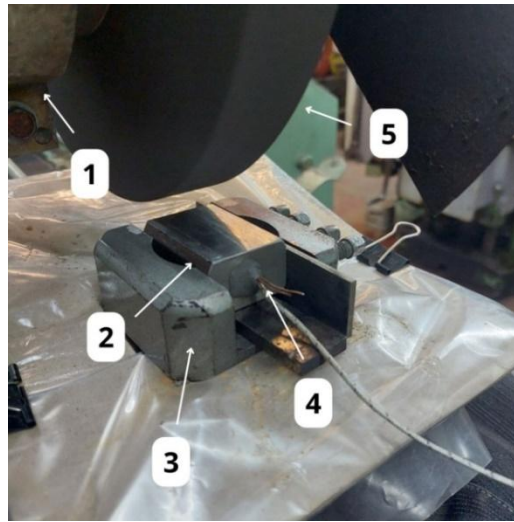


Рисунок 3.1- Структурна сітка методології досліджень



1-шліфувальний верстат ЗГ71М; 2-заготовка 40Х;  
3-динамометр УДМ300; 4- термопара ТР-01А ; 5- шліфувальний круг

Рисунок 3.2 – Загальний вид проведення експериментів

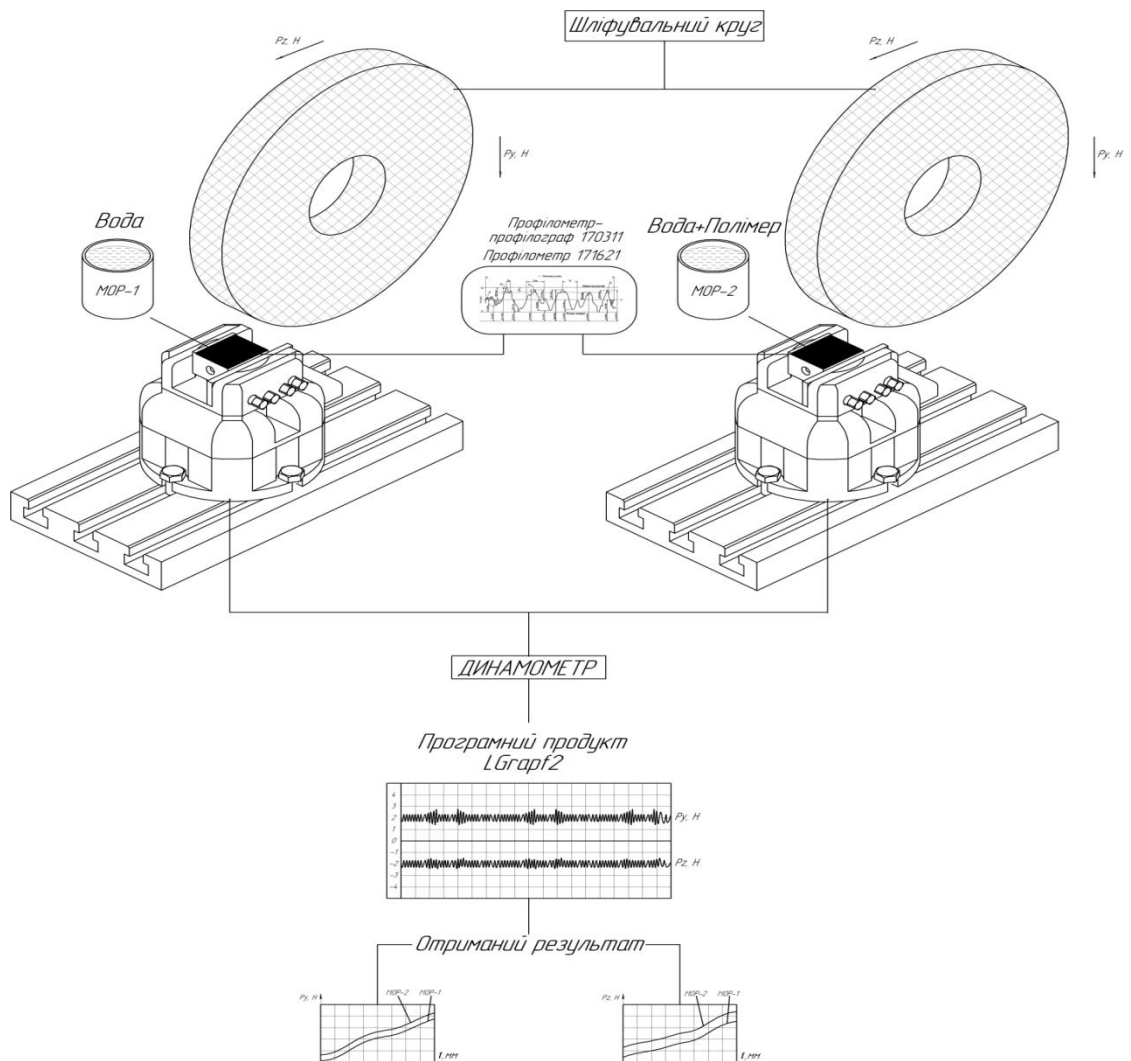


Рисунок 3.3 - Методика проведення досліджень

Для проведення вимірювань було обрано наступне обладнання:

1. Для вимірювання сили різання на верстаті ЗГ71М був встановлений динамометр УДМ 300, в якому закріплена заготовка (рис.3.2).

2. Для вимірювання температури в зоні різання використовувався мультиметр UT61A з термопарою TP-01A з діапазоном вимірюваних температур:  $-18\sim 712^{\circ}\text{C}$  (рис.3.4).



Рисунок 3.4 - Мультиметр UT61A з термопарою TP-01A

3. Знос поверхні заготовки вимірювали на профілометрі-профілографі 170311 (рис.3.5).



Рисунок 3.5 – Профілометр-профілограф 170311

4. Шорсткість обробленої поверхні вимірювали на профілометрі 171621 (рис.3.6).



Рисунок 3.6 – Профілометр 171621

Силу різання фіксували та реєстрували у вигляді графіку, відповідно до схеми, наведеної на рисунку (рис.3.7). За допомогою динамометра УДМ 300 сигнал передавався на підсилювач, далі на аналоговий-цифровий перетворювач Е14-1140, а вже з перетворювача сигнал передавався на комп'ютер. На комп'ютері використовувалася програма LGraph 2 для фіксації сигналу у вигляді графічних показників  $P_z$  та  $P_y$ .



Динамометр → Підсилювач → АЦП → Комп'ютер

Рисунок 3.7 - Схема вимірювання сили різання

Випробування проводили відповідно до розробленого циклу в два етапи при постійних режимах різання: Режими різання: повздовжні переміщення заготовки 1 м/хв, швидкість шліфування 33м/с, зусилля натискання до оброблюваного зразка 10 Н/мм, машинний час роботи 2,50 хв, розпилення

рідини у зону різання 0,5 л/хв, з концентрацією полімеру 0,02% . До початку експерименту за допомогою тахометра 2ТЭ30 було визначено швидкість обертання шліфувального круга на плоско шліфувальному верстаті 3Г71М яка склала 2500 об/хв.

**Етап 1:** «проводиться на поверхні №1 з подачею до зони різання води».

**Етап 2:** «проводиться на поверхні №2 з подачею до зони різання води з полімером»:

- встановлення та закріплення заготовки у динамометрі , підключення мультиметра, запуск програми LGrarf 2;

- встановлення обраних режимів різання, запуск верстата, прописування «нульової» лінії сили навантаження протягом 2-5 секунд;

- дослід проводиться до чітко видимої сходинок шириною 7 мм, та площадки зносу поверхні заготовки шириною 29 мм, після чого припиняється робота верстата;

- проводяться усі потрібні вимірювання.

Кількість дослідів для кожної рідини складала не менше чотирьох. При цьому для кожного дослідів заготовка перешліфовувалась. Всі отримані данні відображали на полі координат та за середніми значеннями будували графіки. Концентрацію полімеру обрали 0,02% тому що більша концентрація полімеру призводить до желе образного стану який не можливо було розпилювати.

### **3.1 Вимірювання і оцінка отриманих результатів**

#### **3.1.1 Сила різання**

За допомогою кабелю, динамометр (1) з'єднується з підсилювачем (3), і через аналогово-цифровий перетворювач (2) дані передаються на комп'ютер (4) для отримання графічної інформації за допомогою програми LGraph 2

(див. рис. 3.8, 3.11). Динамометр УДМ 300 був тарирований відповідно до загально відомої методики (рис. 3.9, 3.10).



1-динамометр УДМ 300; 2- АЦП; 3-підсилювач; 4- комп'ютер

Рисунок 3.8- Установка вимірювання сили різання

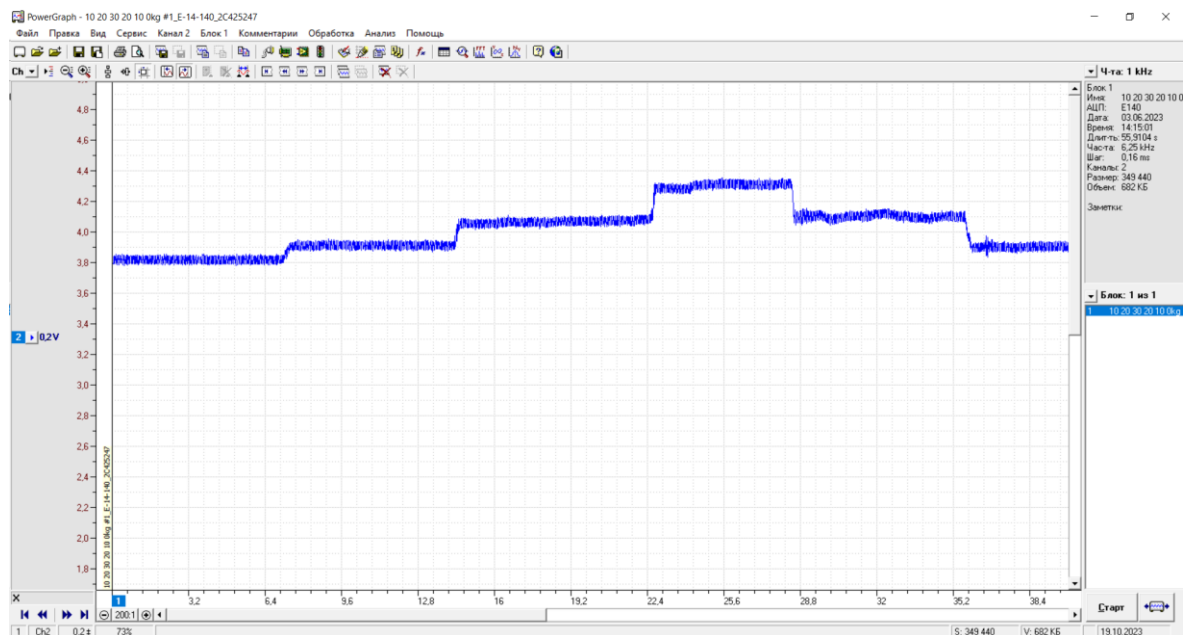


Рисунок 3.9 – Тарувальний графік сили  $F_y$

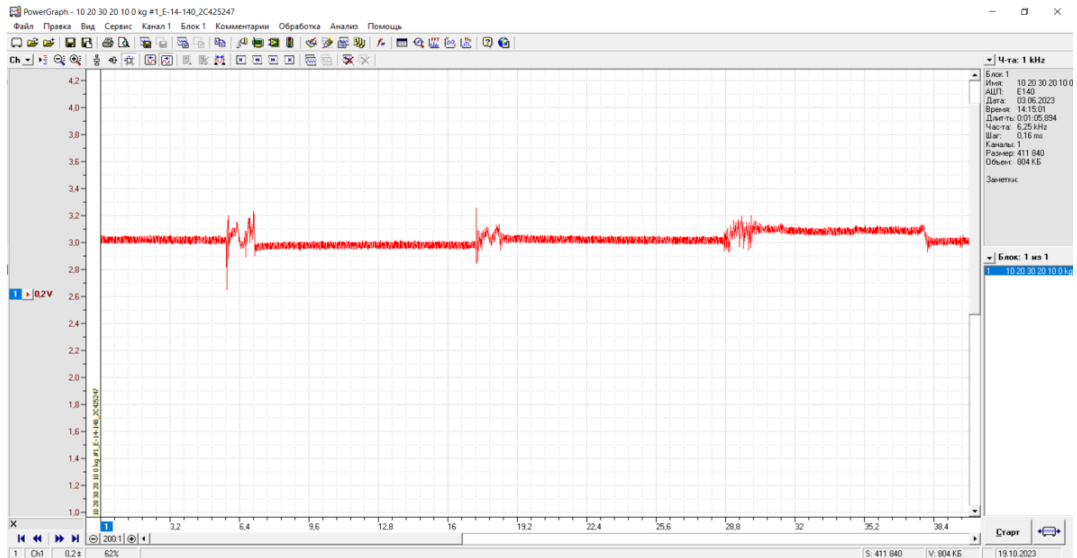


Рисунок 3.10 – Тарувальний графік сили Pz

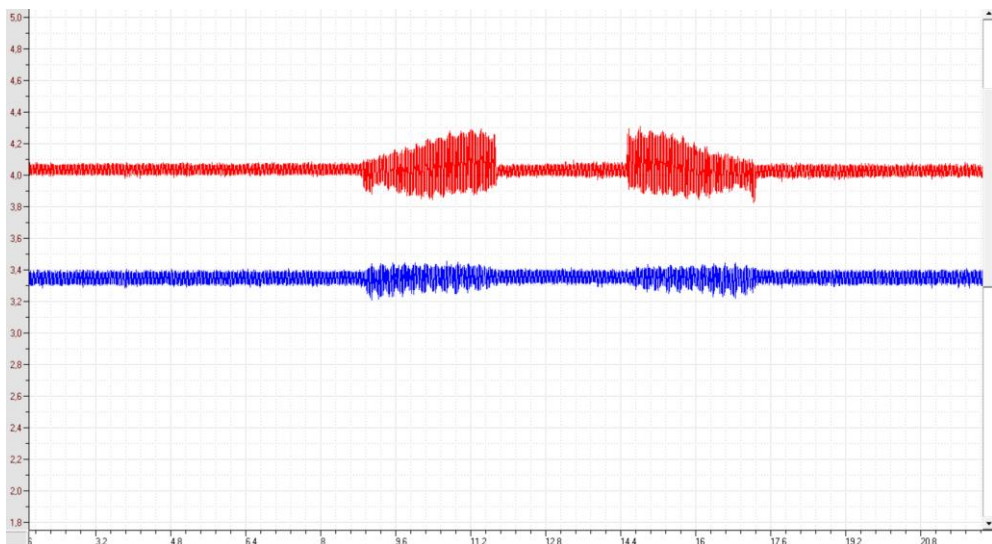


Рисунок 3.11 – Зміна сили різання Pz (червоний), Py (синій), за подвійний хід

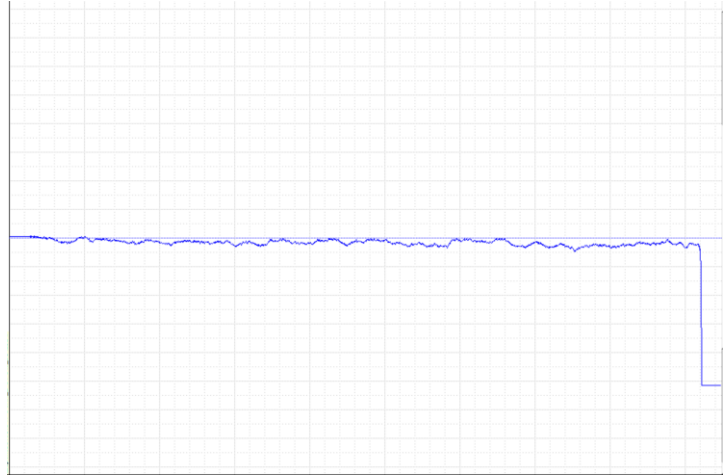
### 3.1.2 Шорсткість

Для отримання вимірів шорсткості обробленої металу було використано профілометр-профілограф. Під час переміщення по обробленій поверхні заготовки, чутливий елемент, у вигляді алмазної голки, здійснює

вимірювання, і ці дані передаються до ПК через аналого-цифровий перетворювач (рис. 3.12 а, б). Контрольне вимірювання проводили на профілографі, по трьома вимірами по обробленій поверхні.



а)



б)

а) переміщення алмазної голки по обробній поверхні б) графік шорсткості поверхні

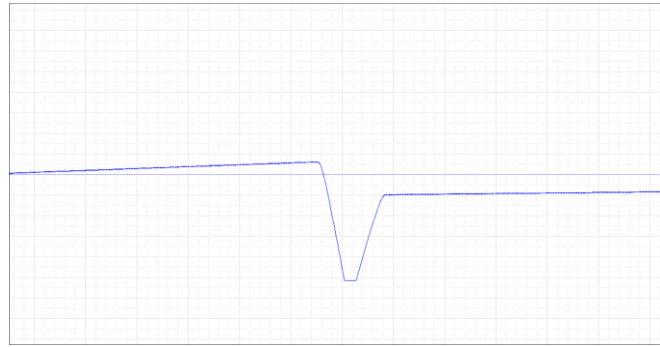
Рисунок 3.12 - Вимірювання шорсткості за допомогою профілометра-профілографу 170311

### 3.1.3 Вимірювання знятого шару металу

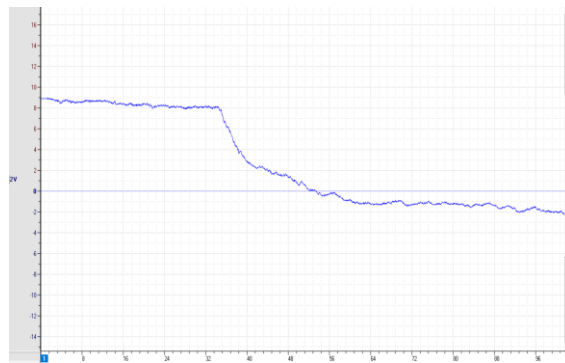
Для отримання вимірів перепаду між оброблюваною поверхнею шириною 29 мм, і не оброблювальною поверхнею шириною 7 мм, було використано профілометр. За допомогою еталонних пластинок було здійснено тарування перепаду поверхні 0,01мм (рис. 3.13 б). Під час переміщення алмазної голки по не оброблювальній і оброблювальній поверхні заготовки, чутливий елемент, здійснює замір перепаду між поверхнями, і ці дані передаються до ПК через аналого-цифровий перетворювач (рис. 3.13 а, в).



а)



б)



в)

а) переміщення алмазної голки по обробній поверхні б) еталон перепаду поверхні 0,01мм в) графік перепаду поверхні

Рисунок 3.13 - Вимірювання знятого шару металу за допомогою профілометра-профілографу 170311

### 3.1.4 Методика статистичної обробки результатів вимірювань

Статистичні дані представляють інформацію, отриману в результаті проведення статистичних досліджень. Для аналізу цих даних необхідно спочатку їх систематизувати і визначити взаємозалежні та незалежні змінні.

Після цього розробляється методика обробки даних (рис. 3.14). Візуалізація даних здійснюється за допомогою графіків програмного продукту LGraph 2:

Визначається параметри сили різання:

- 1) контролюємо середнє значення  $P_y$ ;
- 2) визначається середнє значення сили різання  $P_z$ ;
- 3) по 10-ти точкам графіку визначається нерівномірності процесу (дисперсії  $\delta^2$ ), середнє арифметичне ( $E$ ) та середнє квадратичне ( $\sigma$ ) значення сили різання.

Визначається параметри шорсткості обробленої поверхні:

- 1) визначається значення  $R_z$ ;
- 2) по 10-ти точкам графіку визначається нерівномірності якості (дисперсії  $\delta^2$ ), середнє арифметичне ( $E$ ) та середнє квадратичне ( $\sigma$ ) значення шорсткості.

Визначається параметри знятого шару металу знятого шару металу:

- 1) визначається значення мм, знятого шару;
- 2) визначення об'єму знятого шару.

Для розрахунку значення дисперсії використовується програма STATISTICA 10, а за для розрахунку середнє арифметичне ( $E$ ) та середнє квадратичне ( $\sigma$ ), а також для побудови графіків використовується програма Microsoft Excel 2010.

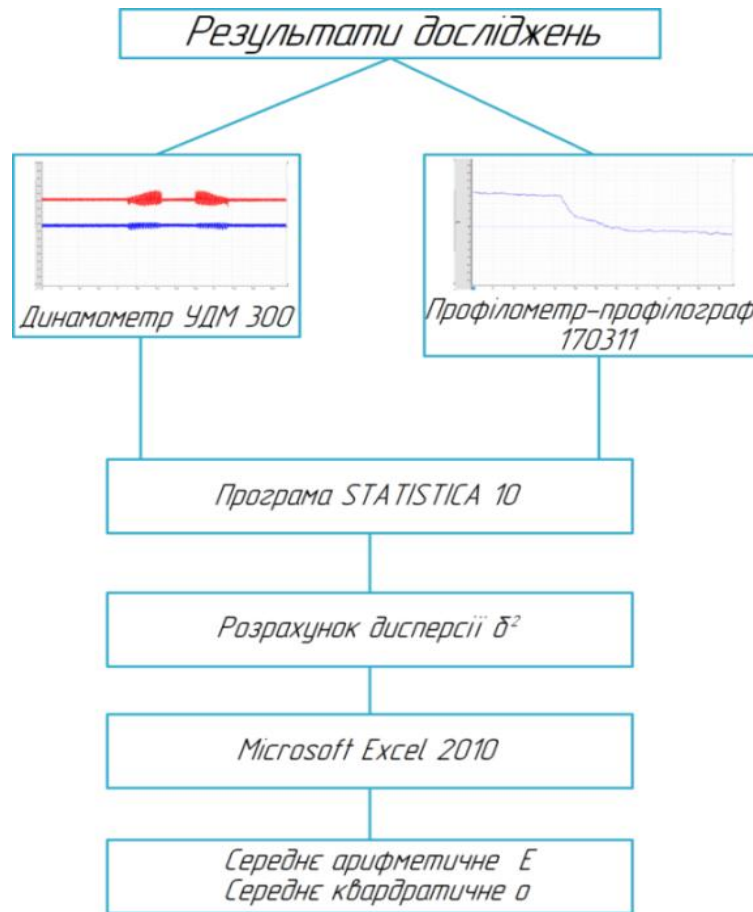


Рисунок 3.14 – Методика статистичної обробки результатів вимірювань

### 3.2 Визначення та аналіз отриманих результатів при випробуванні тертя

Експериментальне встановлення (рис. 3.15) складається з наступних приладів:

- а) персонального комп'ютера (ПК) - 1;
- б) прилад, що показує з індуктивними перетворювачами моделі 276-2;
- в) аналого-цифрового перетворювача Е-140 (АЦП) - 3;
- г) трибометр ТММ 32А - 4;
- д) змінні зразки - 5;

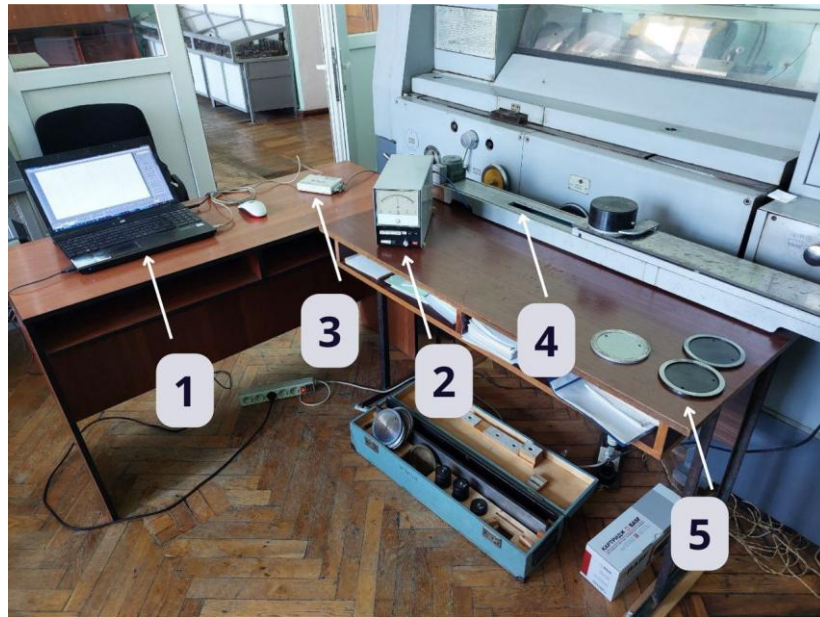


Рисунок 3.15 – Загальний вигляд експериментальної установки

Випробування тертя проводилися на трибометрі типу ТММ 32А (рис. 3.15, 4). Цей прилад призначений визначення коефіцієнта тертя ковзання між двома тілами при рівномірному русі їх щодо одне одного. Трибометр дає можливість визначати силу тертя ковзання (руху) та силу тертя спокою різних матеріалів. Технічні характеристики цього приладу занесені до табл. 3.1.

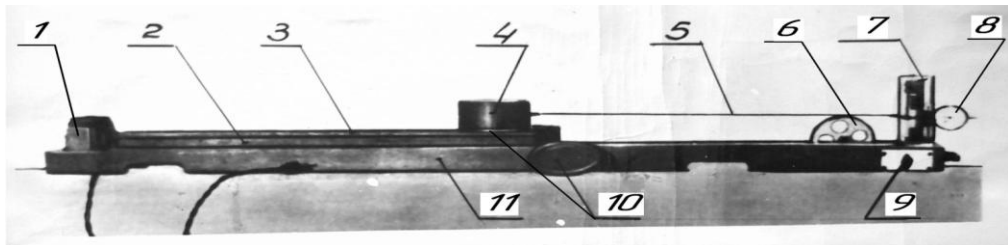
Таблиця 3.1 - Технічні дані трибометра ТММ 32А

Характеристика	Значення
Швидкість переміщення зразків матеріалів, що випробовуються, відносно один одного, м/с	0,027
Випробовувані матеріали: а) змінних плит б) змінних зразків	сталь, чавун, алюміній сталь, латунь, чавун
Максимально-допустима сила тертя, кг	2,0

Кінець таблиці 3.1

Максимальне відносне переміщення зразків матеріалів, що випробовуються, мм	510
Джерело живлення – однофазна мережа змінного струму:	
а) частота, Гц	50
б) напруга,	220
Потужність двигуна, Вт	14
Габарити приладу, мм	1450x160x210
Маса приладу, кг, не більше	38

Визначення коефіцієнтів тертя ковзання для пар матеріалів засноване на вимірюванні сил тертя спокою (страгування) та сил тертя руху, що виникають при переміщенні змінної плити, встановленої на візку, щодо вантажу, що притискає змінні зразки 9 (рис. 3.16) з нормальним зусиллям до плити.



1 – асинхронний двигун конденсаторного типу РД-09, 2 – візок; 3 – змінна плита, 4 – вантаж, 5 – тяга, 6 – ролик, 7 – стійка вимірювального пристрою, 8 – індикатор годинного типу, 9 – вимикач, 10 – змінні зразки, 11 - основа.

Рисунок 3.16 – Трибометр ТММ 32А

Візок, встановлений у напрямні підстави, переміщається зворотно-поступально за допомогою механізму електроприводу. Як приводний електродвигун застосований асинхронний електродвигун, який задає постійну швидкість переміщення візка. Хід візка обмежується з двох сторін кінцевими вимикачами. На майданчик візка встановлюються змінні плити, виготовлені з різних матеріалів. На плиту 3 (див. рис. 3.16) встановлюється вантаж 4, який притискає змінний зразок 10. Вантаж з'єднується з пружиною вимірювального пристрою через тягу додаткової пружиною або через тягу без останньої. Пружина вимірювального пристрою (гнучка частина балочки) закріплена у стійці. На пружину прикріпленні тензодатчики. У стійці закріплений індикатор, яким своїм штоком торкається пружини вимірювального пристрою. Запуск візка та зміна напрямку руху візка здійснюється вимикачем 9 (рис. 3.16).

## 4 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ

Режими різання - це набір значень параметрів, таких як швидкість різання, подача, швидкість руху і глибина різання. Вони мають вирішальний вплив на тривалість обробки, якість обробленої поверхні і стійкість інструменту. Необхідні параметри можна визначити за допомогою аналітичного методу, використовуючи дані з табл. 4.1.

Таблиця 4.1 - Вихідні дані

1.	Матеріал деталі	Сталь 40Х
2.	Характеристика обробки	чорнове і чистове шліфування зовнішньої поверхні
3.	Використання МОТЗ	з МОТЗ
4.	Устаткування	ЗГ71М
5.	Розміри заготовки, мм	50x23x32

Плоскошліфувальний верстат ЗГ71М - призначений для обробки деталей шляхом шліфування їх поверхонь. Вони використовуються для досягнення високої точності, гладкості та якості поверхонь деталей.

Таблиця 4.2 - Характеристика плоскошліфувального верстата ЗГ71М

Найбільші розміри оброблюваних виробів (Ш x Д x В), мм	200 x 630 x 320
Розміри робочої поверхні стола (ширина x довжина), мм	200 x 630
Найбільше поздовжнє переміщення столу, мм	710
Найбільше поперечне переміщення столу, мм	235

Кінець таблиці 4.2

Клас точності по ГОСТ 8-82	В
Ціна одного розподілу лімба маховичка поперечного переміщення столу, мм	0,05
Ціна одного розподілу лімба маховичка вертикальної подачі, мм	0,001
Розмір шліфувального круга, мм	250 x 32 x 76
Число оборотів шпинделя шліфувального круга, хв-1	2740
Загальна встановлена потужність всіх електродвигунів, кВт	3685

### Розрахунок режимів різання при шліфуванні

1. Розподіл припуску на обробку, мм [34]:

$$h = H_g - h_g \quad (4.1)$$

де:  $h$  - припуск на обробку, мм;

$H_g$  - товщина деталі до шліфування, мм;

$h_g$  - товщина деталі після шліфування, мм.

$$h = 23 - 22,84 = 0.16 \text{ мм}$$

2. Припуск на чорнове шліфування, мм:

$$h_{\text{черн}} = 0,7 \cdot h \quad (4.2)$$

де:  $h_{\text{черн}}$  - припуск на чорнове шліфування, мм;

0,7- поправочний коефіцієнт [34];

$h$  - припуск на обробку, мм;

$$h_{\text{черн}} = 0,7 \cdot 0,16 = 0,11 \text{ мм}$$

3. Припуск на чистове шліфування, мм:

$$h_{\text{чист}} = h - h_{\text{черн}} \quad (4.3)$$

де:  $h_{\text{чист}}$  - припуск на чистове шліфування, мм;

$h$  - припуск на обробку, мм;

$h_{\text{черн}}$  - припуск на чорнове шліфування, мм;

$$h_{\text{чист}} = 0,16 - 0,11 = 0,05 \text{ мм}$$

4. Вибір характеристик шліфувального круга:

Згідно таблиці [34] характеристик шліфувальних кругів при плоскому шліфуванні обираю шліфувальний круг 1 250x32x76 14А 25П СТ К7 35м/с А1кл ГОСТ 2424-83.

5. Визначення швидкості різання, м/с:

$$V_k = \frac{\pi \cdot D_k \cdot n_k}{1000 \cdot 60} \quad (4.4)$$

де:  $V_k$  - швидкість різання, м/с;

$D_k$  - зовнішній діаметр шліфувального круга, мм;

$n_k$  - частота обертання шліфувального круга, об/хв.

$$V_k = \frac{3,14 \cdot 250 \cdot 2500}{1000 \cdot 60} = 33 \text{ м/с}$$

6. Вибір подовжньої подачі деталі:

Згідно таблиці [34] і паспорта верстата обираю  $S_{\text{пр}}=1$  м/хв.

7. Визначення ефективної потужності, кВт:

$$N_e = C_N \cdot t^x \cdot S_{\text{пр}}^y \quad (4.5)$$

де:  $N_e$ - мощность при різанні (кВт);

$C_N$ - коефіцієнт, що враховує оброблюваний матеріал [34];

$t$  - глибина різання при шліфуванні, мм;

$S_{\text{пр}}$  – повздовжня подача деталі, м/хв.;

$x, y$  - показники ступенів [34].

$$N_e = 0,68 \cdot 0,16 \cdot 1^{0,8} = 0,11 \text{ кВт}$$

Перевіряємо потужність потрібну на різання:

$$N_e \leq N_{\text{шп}}$$

Потужність на шпінелі верстата визначається:

$$N_{\text{шп}} = N_{\text{дв}} \cdot \eta, \text{ кВт}; \quad (4.6)$$

$$N_{\text{шп}} = 4 \cdot 0,75 = 3 \text{ кВт};$$

$$N_e \leq N_{\text{шп}} \quad 0,13 \leq 3 - \text{обробка можлива.}$$

8. Визначення основного часу, хв:

$$T_0 = \frac{L \cdot i}{1000 \cdot S_{\text{пр}}} \quad (4.7)$$

де:  $L$ -розрахункова довжина шліфування, мм;

$i$ - число проходів;

$S_{\text{пр}}$ - повздовжня подача деталі, м/хв.

$$T_0 = \frac{50 \cdot 34}{1000 \cdot 1} = 1,7 \text{ хв.}$$

Висновок : При обробці заготовки з матеріалу Ст40х з використанням МОНЗ припуск на обробку буде 0,16мм,  $T_0 = 1,7$ хв;

## 5 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

За період з 01.06.2023 по 21.06.2023 було проведено 8 досліджень. З яких 4 з використанням розпилення МОТЗ з зшитим сополімером акрилата та акриламиду калію під час плоского шліфування а 4 з розпиленням у зону шліфування води. Кожне із цих досліджень включали в себе контролювання сил різання, температури, шорсткості поверхні, об'єму знятого матеріалу. Результати досліджень наведено в Додатку А.

Усереднені попередні результати випробувань наведено у табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Попередні результати випробувань.

Розчин		$P_z$ , Н	$R_a$ , мкм	T, °C	S, мм <sup>3</sup>
МОТЗ 1	Вода	75	1,48	21	117
МОТЗ 2	0,02% розчин	78	1,35	20	121

Примітка:  $P_z$  - сила різання, Н;  $R_a$  - шорсткість обробленої поверхні, мкм; T - температура у зоні різання, °C; S – знятий об'єм металу, мм<sup>3</sup>.

Як виходить з представлених у табл. 5.2 попередніх результатів досліджень в розглянутих умовах різання при використанні розчину полімеру у порівнянні з рідиною без полімеру відбувається збільшення з сили різання до 4%, а також зниження температури різання до 5%. При цьому шорсткість обробленої поверхні знизилась на 10%. Продуктивність обробки підвищилась на 3%.

Можна припустити, що ефективність впровадження полімерної складової відбувається за рахунок деструкції полімеру, яка залежить від числа його молекул,

тобто від їх молекулярної маси. Використання зшитого сополімеру акрілата та акриламиду калію в якості полімерної складової при різанні дозволяє керувати величиною молекул полімеру та кількістю продуктів їх деструкції за рахунок варіювання умовами проведення контрольованої полімеризації. Використання розчину МОНЗ з додаванням 0,02% полімеру більше призводило до утворення плівки на контактуючих поверхнях, що супроводжувалось зняттям більшого об'єму металу та зменшенням шорсткості обробленої поверхні.

### Перевірка гіпотези впливу полімеру на силу різання

Перевірку гіпотези можливо здійснити за перевіркою рівності дисперсій за критерієм Фішера, та за перевіркою рівності середніх за критерієм Стьюдента. Гіпотеза про вплив полімеру на силу різання не буде відхилена як що значення розрахункових критеріїв буде більше за критичні.

Розрахунок за критерієм Фішера

$$F = \frac{S_{\text{більш}}}{S_{\text{менш}}} \quad (5.1)$$

де:  $S_{\text{більш}}$  – вибіркова дисперсія більших;

$S_{\text{менш}}$  – вибіркова дисперсія менших.

$$F = \frac{36}{29} = 1,24$$

Значення  $F_{0,95,159,159} = 1,22$

За розрахунком критерію Фішера гіпотеза не відхилена з ймовірністю 90%.

Розрахунок за критерієм Стьюдента

$$t = \frac{|M_1 - M_2|}{\sqrt{\frac{S_1 + S_2}{N_1 + N_2}}} \quad (5.2)$$

де:  $M_1, M_2$  - середнє арифметичне;

$S_1, S_2$  - стандартне відхилення;

$N_1, N_2$  - розміри вибірок.

$$t = \frac{|78-75|}{\sqrt{\frac{29}{160} + \frac{36}{160}}} = 4,7$$

Значення  $t_{0,95,318} = 1,64$

За розрахунком критерію Стьюдента гіпотеза не відхилена з ймовірністю 95%.

Висновок: За перевіркою отриманих результатів критеріїв Фішера і Стьюдента, підтвердилися наявність суттєвої різниці між результатами експерименту з полімером і без полімеру.

## 6 ОЦІНКА СИЛИ ТЕРТЯ КОВЗАННЯ ТА СИЛИ ТЕРТЯ СПОКОЮ

Під час шліфування з використанням абразиву з маслом та полімерною складовою формується поверхневий шар із підвищеною стійкістю до зношування на обробленій поверхні, а на заготовці утворюється верхній шар з покращеною оброблюваністю.

Для уточнення ступеня впливу зшитого сополімеру акрилата та акриламід у калію на зносостійкість трибосполучень була проведена порівняльна оцінка змін сил тертя для зразків сталі 40Х в з подачею в зону контакту зшитого сополімеру акрилата та акриламід у калію.

Випробування проводилися тертям з подачею в зону контакту досліджуваних зразків води та сополімеру акрилата та акриламід у калію (2гр порошку сополімеру акрилата та акриламід у калію на 1000мл води). При цьому попереднє розтирання полімеру до порошкового стану сприяло додатковому ініціюванню механодеструкції та підвищеному вмісту вільних макрорадикалів у розчині.

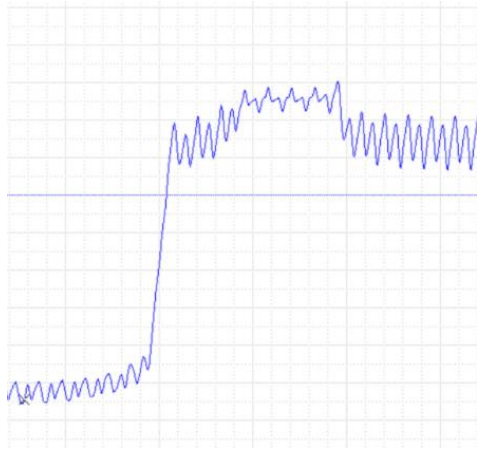
Результати досліджень наведено в Додатку Б.

Враховуючи, що зазначена різниця у зносостійкості поверхні зразків може відбуватися внаслідок зміни величини коефіцієнта тертя, була проведена оцінка впливу вмісту розчиненого зшитого сополімеру акрилата та акриламід у калію у зоні контакту на силу тертя ковзання (руху) та силу тертя спокою. При цьому використали модернізований трибометр мод. ТММ 32А з можливістю визначення електроопору контакту та виведенням показань на персональний комп'ютер.

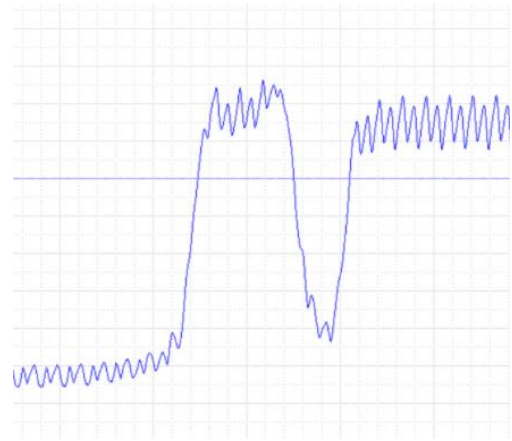
Порівняльні дослідження проводили в умовах сталь по сталі, сталь по чавуну, чавун по чавуну з застосуванням стандартної методики і кільцевого зразка вагою 0,39 кг.

Наявність води і розчину зшитого сополімеру акрилата та акриламід у

калію в зоні контакту зразка і плити здійснювалося шляхом попереднього рясного змащування плити зразка при визначенні сили тертя спокою і рясного змащування плити перед зразком, що рухається, при визначенні сили тертя ковзання. Отримані зміни сили тертя представлені (рис 6.17, 6.18, 6.19).



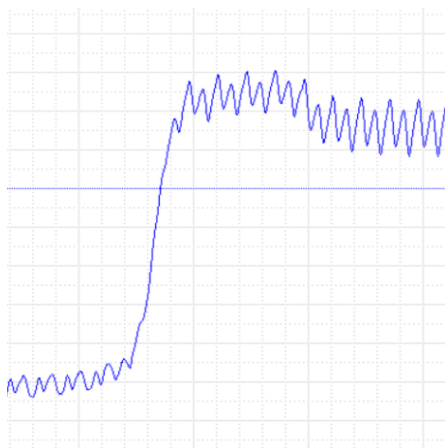
а



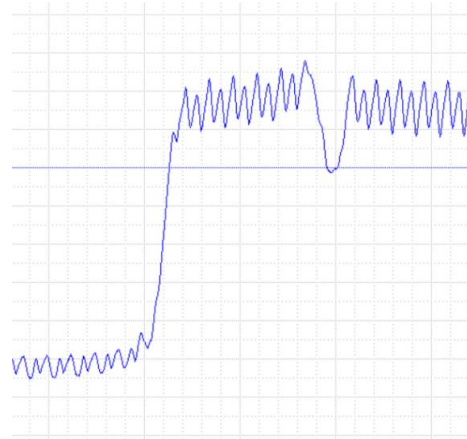
б

а – сила тертя ковзання і спокою з водою; б – сила тертя ковзання і спокою з полімером;

Рисунок 6.17 - Зміна сили тертя ковзання та спокою сталі по сталі :



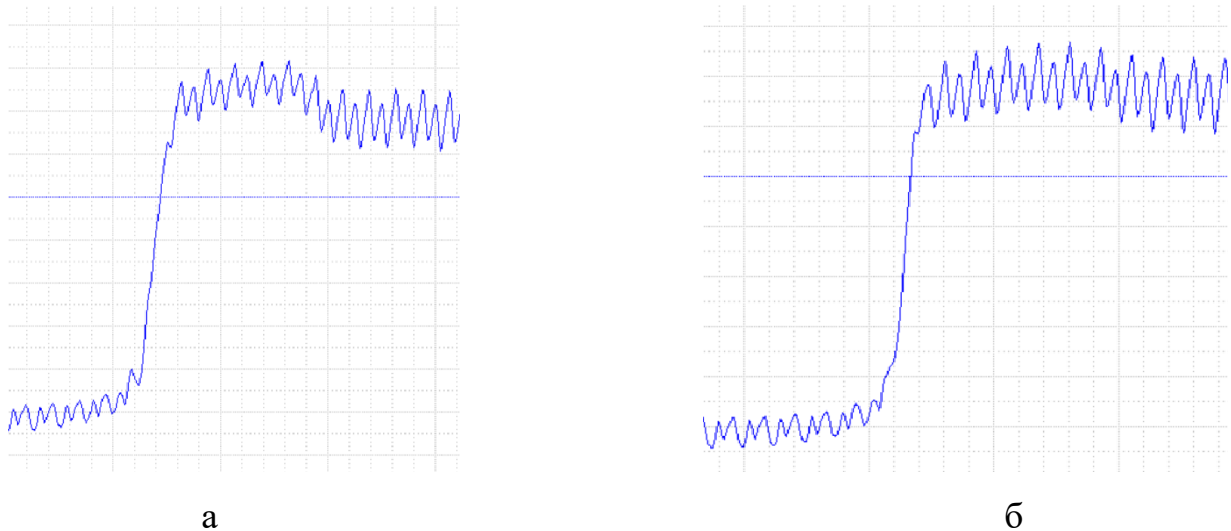
а



б

а – сила тертя ковзання і спокою з водою; б – сила тертя ковзання і спокою з полімером;

Рисунок 6.18 - Зміна сили тертя ковзання та спокою сталі по чугуну :



а – сила тертя ковзання і спокою з водою; б – сила тертя ковзання і спокою з полімером;

Рисунок 6.19 - Зміна сили тертя ковзання та спокою чавун по чавуну :

Аналіз трибограм дозволяє констатувати, що введення зшитого сополімеру акрилата та акриламід у калію в МОТЗ у пропорціях, що розглядаються, супроводжується зміною як сили тертя ковзання, так і спокою в зразках сталь по сталі . При загальному збільшенні сил тертя спостерігається збільшення сили ковзання і спокою. Це вказує на нерівномірність фізико-хімічних явищ у зоні контакту при терті з наявністю МОТЗ з полімером може бути результатом нерівномірної кінетики механохімічних реакцій на поверхні сталі, джерелом яких є деструкція полімеру. В зразках сталь по чавуну не спостерігаються значні зміни як і в зразках чавун по чавуну.

За результатами досліджень а також аналізу трибограм при додаванні полімерної складової у зону тертя сталь по сталі відмічено збільшення сили тертя. В зразках сталь по чавуну не спостерігаються значні зміни як і в зразках чавун по чавуну.

## ВИСНОВКИ

1. Літературний огляд стану питання показав, що застосування полімерів в зоні різання є перспективним напрямком досліджень, оскільки під час деструкції полімеру у складі мастильно-охолоджувальної рідини утворюються макрорадикали, водень та інші продукти деструкції, які позитивно впливають на процеси різання. Полімери можливо застосувати у якості основної складової в різноманітних складах МОР при різних видах обробки.

2. Було розроблено методику дослідження та аналізування отриманих даних впливу зшитого сополімеру акрілата та акриламід у розчиненому стані в воді з концентрацією 0,02% на ефективність шліфування конструкційної легованої сталі 40X на плоско шліфувальному верстаті 3Г71М, що дозволило визначати сили різання шорсткість обробленої поверхні, температуру шліфування та продуктивність обробки.

3. За проведеними дослідженнями було встановлено, що застосування полімеру у концентрації 0,02% є найоптимальнішим. Підвищення концентрації призводить до не раціонального отримання згустків полімеру на деталях верстату та заготовки.

4. Визначено, що впровадження розчину зшитого сополімеру акрілата та акриламід у калію до зони різання у розглянутих в наданій роботі умовах абразивної обробки підвищує її ефективність. Відбувається збільшення з сили різання до 4%, а також зниження температури різання до 5%. При цьому шорсткість обробленої поверхні знизилась на 10%. Продуктивність обробки підвищилась на 3%. За розрахунком критерію Фішера гіпотеза не відхилена з ймовірністю 90%. За розрахунком критерію Стюдента гіпотеза не відхилена з ймовірністю 95%.

5. Доцільно приведення подальших досліджень визначення ефективності шліфування з використанням МОТЗ з полімерною складовою

інших полімерів які мають менший поріг деструкції, особливо під час абразивної обробки важко оброблювальних матеріалів. При цьому необхідно детальні дослідження впливу продуктів деструкції полімерної складової на показники шліфування.

6. За результатами досліджень а також аналізу трибограм при додаванні полімерної складової у зону тертя сталь по сталі збільшуються сили тертя. В зразках сталь по чавуну не спостерігаються значні зміни як і в зразках чавун по чавуну.

7. Рекомендовано використання під час абразивної обробки конструктивних сталей МОТЗ з складовою зшитого сополімеру акрілата та акриламиду калію. Впровадження результатів роботи забезпечує отримання економічного та соціального ефекту на підприємствах машинобудівної, авіабудівної та металургійної галузі. Результати роботи впроваджено в НУ «Запорізька політехніка» на кафедрі «Металорізальні верстати та інструменти» при підготовці бакалаврів на курсі «Теорія різання» спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» Акт впровадження НДР від 05 жовтня 2023 року . Результати роботи апробовано на щорічних конференціях «Тиждень науки» за 2022 та 2023 роки з публікаціями тез.

**ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Ермолаев, В . К. Развитие техники подачи СОЖ при шлифовании [Текст] / Ермолаев В . К. - РИТМ машиностроения. 2019. № 7. С. 10–16.
2. Худобина Л.В. Смазочно-охлаждающие технологические средства и ихзастосування при обработке резанием: Справочник [Текст] / Под общ.ред. Л.В. Худобина.— М.: Машиностроение, 2006.— 544 с.
3. Справочник HOFFMANN GROUP. [Текст] / Обробка матеріалів-лов резанием Garant ToolScout. 2012.
4. Бранко, И.В. Трибология резания. Смазочно-охлаждающие жидкости. [Текст] / Бранко, И.В. - Мн.: Наука и техника. 1982. 144 с.
5. Ребиндер, П.А. О влиянии изменений поверхностной энергии на спайность, твердость и другие свойства кристаллов [Текст]/ П.А. Ребиндер// Сб. VI Съезд русских физиков. - 1928. – 29с.
6. Подольский, М. И. Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів. [Текст]/ Подольский, М. И. Музыка, А. В. 2015.—218с.
7. Сошко, А. И. Смазочно-охлаждающие средства в механической обработке металла [Текст]/ Сошко, А. И. Сошко, В. А. (Херсон: Олди-плюс: 2008).
8. Сошко, В. А. Механохимическая обработка метал лов [Текст] / Сошко, В. А. Сошко, А. И. - (Saarbrucken, Germany: Lambert Academic Publishing: 2015).
9. Сошко, В. А. Металлофиз. Новейшие технол., [Текст] / Сошко, В. А. Симинченко, И. П. Ляшков, В. С. - 36, № 12: 1701 (2014).
10. Сошко, В. А. Физико-химическая механика материалов, [Текст] / Сошко, В. А. Симинченко, И. П. № 2: 72 (2015).
11. Сошко, А. И. Обоснование механоплазменного эффекта, возникающего в процессе механической обработки металла в смазочно-

охладаючих технологических средствах Metallofiz. Noveishie Tekhnol. [Текст] / Сошко, А. И. Сошко, В. А. - 2017, т. 39, № 1, сс. 117–140

12. Армарего, И. Дж. А.. Обработка металлов резанием [Текст] / Армарего, И. Дж. А. Браун, Р. Х. - (Москва: Машиностроение: 1977).

13. Новожилов, Б. В. Волновые процессы в химической физике. [Текст] / Новожилов, Б. В. - (Москва: Знание: 1986).

14. Гранульований абразивний матеріал [Текст]: пат. 60756 Україна: МПК В24Д 3/00 / Циганів В.В.; заявник та патентовласник Запорізький нац.-техн. унів.- №і2010 15127 ; заявл. 15.12.10; опубл. 25.06.11, Бюл. № 12. - 2 с.

15. Циганов, В.В. Вплив макрорадикалів на ефективність шліфування стрічками з гранульованого абразивного матеріалу. Вісник двигунобудування. [Текст] / Циганов, В.В. – 2012. –№1– С.186-191.

16. Пащенко, Е. А. Исследование работоспособности абразивных композитов, формирующих активные технологические среды в зоне резания [Текст] / Пащенко, Е. А. Лажевская, О. В.. Черненко, А. Н Савченко, Д. А. Нековаль, Н. Н - (Киев, 2016).

17. Hu Y, Dai Q, Huang W, et al. Improvement of process repeatability and resolution in abrasive air jet machining via viscous slurry entrainment. [Текст] / Hu Y, Dai Q, Huang W, et al. - Manuf Process 2022.

18. Hoyt JW, Taylor JJ. Effect of nozzle shape and polymer additives on water jet appearance. [Текст] / Hoyt JW, Taylor JJ. - ASME Journal of Fluids Engineering 1979; 101: 304–308.

19. Annoni M, The role of polymeric additives in water jet cutting. [Текст] / Annoni M, Monno M, Bertola V, et al - Int J Mach Mach Mater 2009; 6: 285–304.

20. Yamaguchi H, Underwater cutting technique using abrasive water jet. JAMSTEC, [Текст] / Yamaguchi H, Demura K. Japan Marine Science and Technology Center, Japan 1994; 6: 13–19.

21. Yamaguchi H. Experimentally development or underwater abrasive water jet cutting system using a high-polymer mixed abrasive. [Текст] / Yamaguchi

H. In the 5th International Offshore and Polar Engineering Conference, OnePetro, 1995.

22. Qiu, C.L. Introduction of pre-mixed micro-abrasive water jet technology for deburring. [Текст] / Qiu, C.L. Wang, C.Y. Song, Y.X. Adv Mat Res 2014; 1027: 177–182.

23. Kudin, A.M. Destruction of metallic obstacles by a jet of dilute polymer solution. [Текст] / Kudin, A.M. Barenblatt, G.I. Kalashnikov, V.N. - Nature Physical Science 1973; 245: 95–96.

24. Срікумар, М. Огляд добавок для абразивної водоструминної обробки та їх ефективність. [Текст] / Срікумар, М. Пурушотхаман, С. Срінівас, М.С. Катіяр, Дж.К. Санкар, М.Р. - Праці Інституту інженерів-механіків, частина J: журнал інженерної трибології. 2023;

25. Курта С.А., Хімія і технологія високомолекулярних сполук. Навчальний посібник. [Текст] / Курта С.А., Курганський, В.С. – ІваноФранківськ: Видавництво «Плай» ЦІТ Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника, 2010.

26. Амашта, І.А. DK Materiales inteligentes: Hidrogeles macromoleculares. Algunas aplicaciones biomédicas. [Текст] / Амашта, І.А. Трабанка,К. Trabanca, О.К. – In Anales de la Real Sociedad Española de Química ; Real Сосьєдад Іспанія де Кіміка: Мадрид, Іспанія, 2005; Том 4, С. 35–50].

27. Хоффман, А. С. Гідрогелі для біомедичних застосувань. [Текст] / Хоффман, А. С. Adv. Препарат Делів. 2012 , 64 , 18–23.

28. Kiatkamjornwong, S. Суперабсорбентні полімери та суперабсорбентні полімерні композити. [Текст] / Kiatkamjornwong, S. ScienceAsia 2007 , 33 , 39–43.

29. Khare, A.R. Набухання/розбухання аніонних сополімерних гелів. [Текст] / Khare, A.R. Пеппас, Н.А. Біоматеріали 1995 , 16 , 559–567.

30. Баутіста, Ф. Вплив термічної історії синтезу на структуру гідрогелів на основі акрилату; [Текст] / Баутіста, Ф. Гарсія, С. Хіменес, Р.

Лопес, Л. Орозко, Е. Прадо, М. Рейес, І. - МАТЕРІАЛИ АНТЕК-КОНФЕРЕНЦІЇ: Бостон, Массачусетс, США, 2005; Том 5, стор. 373.

31. Costa, M.C.G. Hydrogel composed of potassium acrylate, acrylamide, and mineral as soil conditioner under saline conditions. [Текст] / Costa, M.C.G. Mota, J.C.A. Lourenço, D.V. Sousa, R.RA , 2022.

32. Gradilla-Orozco, J.L. Physicomechanical and Morphological Characterization of Multi-Structured Potassium-AcrylateBased Hydrogels. [Текст] / Gradilla-Orozco, J.L.; Hernández-Jiménez, J.Á. Robles-Vásquez, O.; Cortes-Ortega, J.A. Renteria-Urquiza, M. Lomelí-Ramírez, M.G. Rendón, J.G.T. Jiménez-Amezcuа, R.M. García-Enriquez, S. - Gels 2022, 8, 627.

33. Stockmayer, W.H. Теорія молекулярного розподілу розмірів і утворення гелю в розгалужених полімерах II. Загальний перехресний зв'язок. [Текст] / Stockmayer, W.H. - J.Chem. фіз. 1944 , 12 , 125–131.

34. Каначун В.Е, Расчет режимов резания при механической обработке металлов. [Текст] / Каначун В.Е, Чигринец А.Д, Шапошников Б.В, Токин А.П, - Киев 1993.