Хмельницький національний університет
Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Фрикційне плакування зносостійкого покриття робочої поверхні кермової рейки автомобіля

Рівень вищої освіти: перший бакалаврський
Галузь знань: 13 Механічна інженерія
Спеціальність: 132 Матеріалознавство
Освітня програма: Відновлення і технічий сервіс автомобілів

Шифр: КРБМТВА 26. 23111. 000 ПЗ

Виконав: студент 4 курсу,
група МТВА-22-1 _____ Глєб КУЗІН

Керівник, д.т.н., професор _____ Володимир ДИТИНЮК

Нормоконтролер, к.т.н., доцент _____ Олег БАБАК

До захисту допускаю:
завідувач кафедри ТАМ _____ Олександр ДИХА

16 06 2026 р.

Хмельницький, 2026

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: Інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра: трибології, автомобілів та матеріалознавства
Рівень вищої освіти: перший бакалаврський
Галузь знань: 13 Механічна інженерія
Спеціальність: 132 Матеріалознавство
Освітня програма: Відновлення та технічний сервіс автомобілів

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ТАМ
Олександр ДИХА

" 15" квітня 2026 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Кузін Глєб Андрійович

1. Тема роботи: **Фрикційне плакування зносостійкого покриття робочої поверхні кермової рейки автомобіля**

Керівник роботи: Дитинюк Володимир Олександрович, д-р філософ.

Затверджено наказом університету від 20.01.2026 р. № 7

2. Строк подання студентом роботи на кафедру: 15.06.2026 р.

3. Вихідні дані до роботи:

1) Дані про конструкцію кермового керування автомобіля
2) Технічні умови ремонту кермової рейки
3) Матеріали переддипломної практики.
4) Нормативно – технологічна документація
5) Результати літературного огляду і патентного пошуку.

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

1. Конструктивні особливості кермового керування автомобіля
2. Плакування гнучким інструментом
3. Розрахунково-аналітичне дослідження процесу плакування рульової рейки
4. Оптимізація процесу плакування рульової рейки

5. Консультанти розділів роботи

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

6. Дата видачі завдання: 20 квітня 2026р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Конструктивні особливості кермового керування автомобіля	1.05.2026	
2	Плакування гнучким інструментом	15.05.2026	
3	Розрахунково-аналітичне дослідження процесу плакування рульової	30.05.2026	
4	рейки	10.06.2026	

Студент _____ **Глєб КУЗІН**

Керівник кваліфікаційної роботи _____ **Володимир ДИТИНЮК**

РЕФЕРАТ

Обсяг пояснювальної записки – 71 сторінок, кількість рисунків - 28, таблиць - 2, додатків - 1 , кількість джерел згідно із переліком посилань - 20.
Студент гр. МТВАс-23-1 Кузін Г.А.

Тема «**Фрикційне плакування зносостійкого покриття робочої поверхні кермової рейки автомобіля**»

У роботі розглянуто проблему підвищення довговічності рульової рейки автомобіля шляхом застосування сучасних методів зміцнення поверхневого шару. Проведено аналіз конструкції кермового механізму, умов його роботи та основних причин зношування, зокрема бічних поверхонь зубів рейки. Обґрунтовано доцільність використання методу фрикційного плакування гнучким інструментом як ефективного способу формування зносостійких покриттів. Досліджено механізм утворення покриття, структуру поверхневого шару та вплив технологічних параметрів на його властивості. Розроблено методику розрахунку параметрів процесу, що дозволяє прогнозувати глибину зміцнення, ступінь покриття та рівномірність деформації. Запропоновано технологічні рішення щодо реалізації процесу обробки зубчастої рейки з урахуванням її конструктивних особливостей. Отримані результати підтверджують можливість підвищення зносостійкості та ресурсу деталей кермового механізму.

Ключові слова: рульова рейка, зносостійкість, фрикційне плакування, гнучкий інструмент, поверхневе пластичне деформування, антифрикційні покриття

Зміст

ВСТУП **6**

1. Конструктивні особливості кермового керування автомобіля……..8

1.1 Пристрій кермового управління..... 8

1.2 Вимоги до системи кермового керування 13

1.3 Аналіз причин несправностей кермових механізмів з підсилювачем керма 14

1.4 Аналіз способів підвищення ресурсу кермової рейки 15

2 Плакування гнучким інструментом 21

2.1 Методика плакування гнучким інструментом..... 21

2.2 Визначення методики розрахунку параметрів у зоні контакту..... 28

2.3 Аналіз джерел ефективності методики поверхневого пластичного деформування 33

2.4 Математичне моделювання параметрів зони контакту процесу ПГІ 40

3 Розрахунково-аналітичне дослідження процесу плакування рульової рейки 50

4 Оптимізація процесу плакування рульової рейки 59

4.1 Методика вибору оптимальних режимів та параметрів обробки гнучким інструментом 95

4.2 Технологічний маршрут обробки бічної поверхні зуба рульової рейки 64

Висновок 68

Список використаних джерел..... 69

Вступ

З початку появи перших транспортних засобів до сьогодні система кермового управління є однією з найважливіших частин автомобіля, оскільки від її працездатності залежить не тільки безпека життя та здоров'я водія та пасажирів, а й усіх учасників дорожнього руху.

Насамперед, на надійність і працездатність цієї системи автомобільного транспорту вплив, переважно, надає тертя, а причиною виходу з робочого стану є зношування, що у вузлах системи. Втрата точності взаємного розташування деталей, негерметичність вузлів, непередбачені відносні переміщення і дефекти, що виникають, до яких може призвести зношування, є тими причинами, які можуть призвести до небезпечної ситуації на дорозі. Тому з'являється необхідність проведення науково-технічних робіт, спрямованих на підвищення рівня технічного обслуговування автомобілів, які допоможуть запобігти можливим несправностям, що виникають за час експлуатації, що призводять до непрацездатності рульового управління. Також необхідно проаналізувати та застосувати нові сучасні методи та способи зміцнення вузлів рульового механізму відповідно до вимог безпеки системи рульового управління. Для забезпечення перерахованих вище цілей необхідно вирішити важливе завдання, що полягає в підвищенні ефективності методів обробки та зміцнення елементів кермової системи, що, у свою чергу, призведе до збільшення термінів експлуатації автомобільного транспорту.

Бакалаврська робота спрямована на вирішення питань, присвячених формуванню методики фрикційного плакування зносостійких покриттів на рульовій рейці з метою підвищення її експлуатаційної довговічності.

Метою даної роботи є створення методики фрикційного плакування бічних поверхонь зубів рульової рейки, за допомогою гнучкого інструменту.

Для досягнення мети в роботі поставлено та вирішено такі **завдання.**

Проаналізовано механізм кермового керування з його вимогами до безпеки. Визначено основні місця зношування кермової рейки. Розглянуто основні способи

зміцнення цієї деталі та зроблено висновок, що саме зубчастий сектор рейки найбільше підходить для застосування методу фрикційного плакування.

Аналіз умов роботи деталей рульового механізму показав, що великий відсоток зношування спостерігається на бічних поверхнях зубців рульової рейки.

Зроблено основу застосування методу фрикційного нанесення покриттів з одночасною обробкою пластичним деформуванням гнучким інструментом.

Проведено літературний огляд теорії та практики застосування фрикційного плакування гнучким інструментом та його розрахунковоаналітичне обґрунтування.

Оптимізована методика плакування шляхом розробки спецпристосувань замість покупних пристроїв та обладнання.

Розроблено технологічний маршрут плакування рульової рейки. Для конкретизації та наочності дослідження проведено на прикладі кермової рейки.

1. Конструктивні особливості кермового керування автомобіля

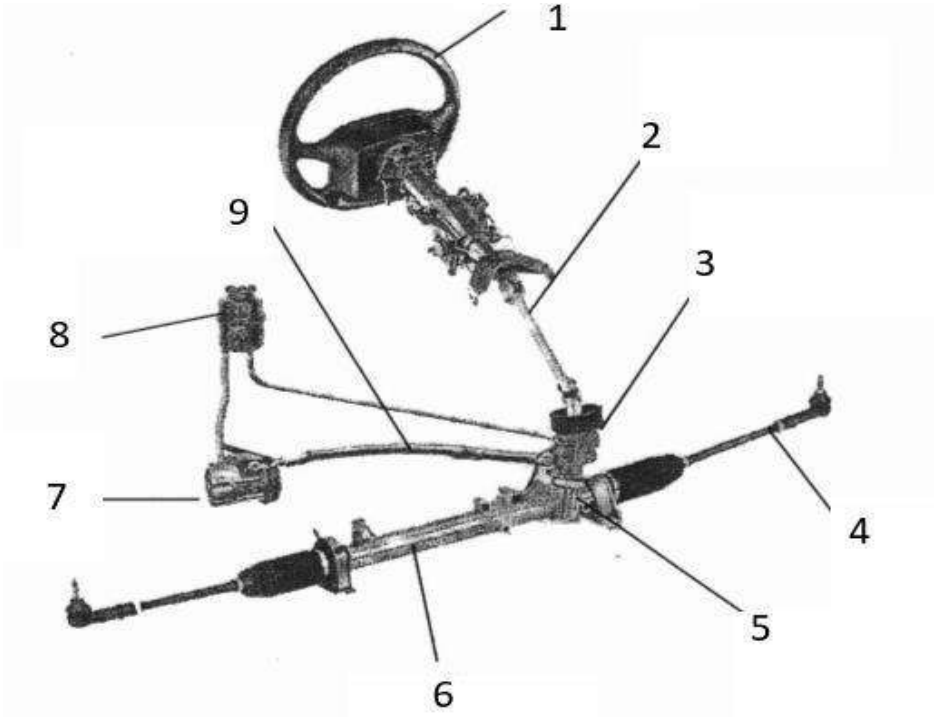
1.1 Пристрій кермового керування

Для вирішення поставлених завдань доцільно насамперед провести аналіз системи кермового керування автомобіля, зокрема розглянути кермо як один із ключових елементів цієї системи. Саме воно забезпечує безпосередню взаємодію водія з механізмом керування транспортним засобом.

У більшості легкових автомобілів застосовується рейковий тип кермового механізму, який може оснащуватися підсилювачами різного типу — електромеханічними, гідравлічними або комбінованими. Останнім часом електропідсилювачі активно впроваджуються та поступово витісняють гідравлічні системи, однак останні досі широко використовуються завдяки високій ефективності, надійності та відносно невисокій вартості.

Принцип роботи системи кермового керування полягає у передачі зусилля від водія через кермо до кермового механізму, де воно перетворюється у відповідний рух коліс, що забезпечує зміну напрямку руху автомобіля. При збільшенні навантаження на передню вісь, наприклад під час маневрування або гальмування, необхідне зусилля на кермі зростає. Саме тому в сучасних транспортних засобах широко застосовуються системи з підсилювачами керма, які дозволяють зменшити фізичне навантаження на водія, підвищити точність керування та знизити втому під час руху.

Система кермового управління представлена рисунку 1.



1 – рульове колесо; 2 – рульова колонка; 3 – поворотний золотниковий розподільник; 4 – рульова тяга; 5 – зубчаста рейка; 6 – гідравлічний силовий циліндр; 7 – насос; 8 – бачок; 9 – шланги.

Рисунок 1 – Пристрій кермового керування

Особливість пристрої рульового управління сучасних автомобілів полягає в тому, що рульова рейка та електропідсилювач або гідропідсилювач об'єднані в єдину систему, так звану, інтегральну.

В обох типах кермових систем використовується рейковий механізм, який забезпечує передачу зусилля від кермового вала до рульових тяг. У системах з електропідсилювачем електродвигун зазвичай встановлюється на кермовому валу, елементи якого з’єднані між собою через торсіон. На цьому валу розміщений датчик крутного моменту, який фіксує ступінь його скручування під час повороту керма. Отримані сигнали разом із даними про швидкість руху автомобіля та оберти

двигуна надходять до електронного блоку керування, який визначає необхідне підсилююче зусилля та передає відповідну команду електродвигуну.

Рівень підсилення та алгоритм роботи системи змінюються залежно від швидкості руху транспортного засобу та кута повороту керма. При цьому детальний розгляд електронної частини електропідсилювача в межах даного дослідження не є доцільним, оскільки основна увага приділяється саме механічній складовій. Варто зазначити, що у випадку виходу з ладу електроніки зазвичай здійснюється повна заміна рульової рейки без її ремонту.

Рейковий кермовий механізм має як переваги, так і певні недоліки. До його позитивних сторін належить простота конструкції та висока ефективність роботи, однак характерною особливістю є можливість поступового зношування без явних ознак несправності.

У системах кермового управління з гідравлічним підсилювачем усі елементи умовно поділяються на механічні та гідравлічні. До механічної частини відносяться кермо, кермова колонка, рейковий механізм і рульові тяги, тоді як гідравлічна система включає насос, бачок робочої рідини, магістралі високого та низького тиску, розподільний клапан та силовий циліндр.

Основне призначення кермового механізму полягає у перетворенні обертального руху керма у поступальний рух елементів приводу, що забезпечує поворот коліс. Рейковий механізм є одним із найпоширеніших завдяки простоті, надійності, високому коефіцієнту корисної дії та жорсткості конструкції. Водночас він є чутливим до нерівностей дорожнього покриття, що може викликати додаткові динамічні навантаження в зачепленні та прискорене зношування.

Конструктивно шестерня, закріплена на кермовому валу, перебуває у постійному зачепленні з рейкою. Для забезпечення довговічності роботи ці елементи функціонують у середовищі мастила, яке зменшує тертя та уповільнює зношування. Проте в процесі тривалої експлуатації під дією навантажень неминуче настає момент, коли виникає необхідність у ремонті або заміні рейкового механізму.

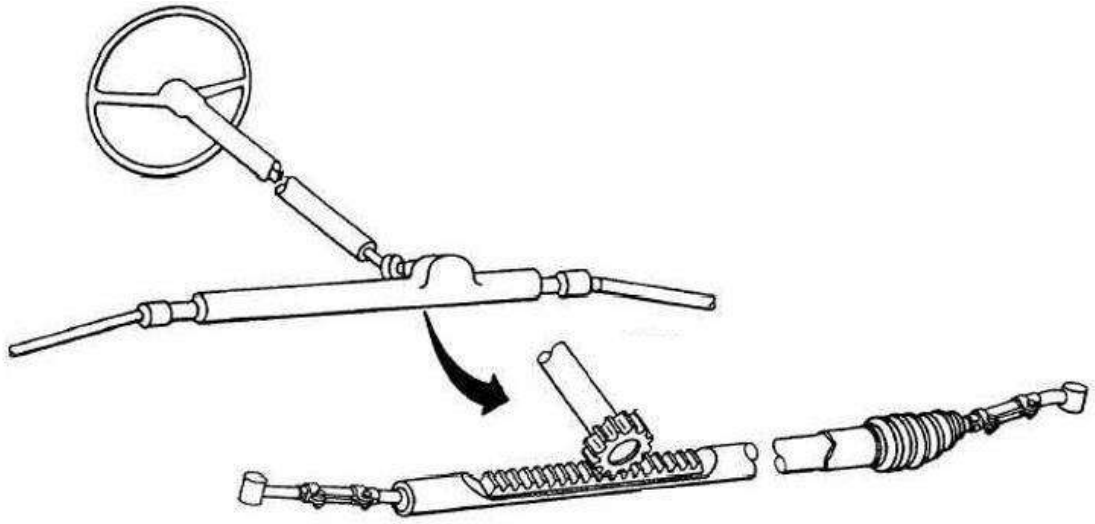


Рисунок 2 – Схема системи рейкової передачі

Гідропідсилювач керма конструктивно складний механізм, який потребує постійного технічного обслуговування. Деякі вузли цієї системи дуже чутливі до зношування, тому порушення умов експлуатації може призвести до поломки. Слід зазначити, що завдяки установці розподільника кермовий механізм має гарну надійність, тобто є можливість продовжувати рух навіть у разі виходу з ладу одного з елементів гідропідсилювача керма або за його повної або часткової розгерметизації. Торсіон завжди передаватиме обертання від рульового валу до шестерні, що забезпечить збереження керованості автомобіля, але зусилля, що прикладається на кермо, зросте. А механічна рейкова передача «черв'як – зубчаста рейка, зуби якої перебувають у постійному контакті, при поломці може стати причиною ДТП.

Об'єктом цього дослідження є рульова рейка з гідропідсилювачем керма.

Подальший ряд проектних та технічних завдань буде зосереджений на системі з гідропідсилювачем керма на прикладі кермового механізму .

На рисунку 3 представлений ескіз кермової рейки.

Рисунок 3 – Загальний вигляд кермової рейки

Матеріал деталі визначає її основні фізико-механічні властивості, такі як міцність, витривалість, опір втомі, зносостійкість та інші показники, необхідні для забезпечення надійної роботи виробу в заданих умовах експлуатації.

Для виготовлення кермової рейки доцільно застосовувати сталь 50, яка належить до конструкційних вуглецевих якісних сталей. Основні фізико-механічні характеристики цього матеріалу наведено в таблиці 1.

Хімічний склад сталі 50 знаходиться в таких межах: вміст марганцю становить приблизно 0,55–0,85 %, вуглецю — 0,45–0,58 %, кремнію — 0,15–0,40 %, а сумарна кількість інших домішок не перевищує 0,30 %.

Таблиця 1 - Фізико-механічні властивості сталі 50

$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_в$, МПа	ψ, %	δ_5, %	KCU, кДЖ/м^2	НВ
315	570	55	17	39	167-207

Далі необхідно розглянути технічні вимоги для забезпечення безперебійної роботи механічної передачі, що розглядається, і до системи рульового управління в цілому.

1.2 Вимоги до системи кермового керування

Основні вимоги до системи кермового управління базуються на правилах «Європейської економічної комісії Організації Об'єднаних Націй (ЄЕК ООН).

Даний нормативний документ встановлює перелік вимог до транспортних засобів, що перебувають в експлуатації, незалежно від місця їх виготовлення або ввезення на територію країни. Нижче наведено основні положення цього технічного регламенту.

Зокрема, встановлено, що сумарний люфт у рульовому управлінні не повинен перевищувати граничних значень, визначених виробником транспортного засобу, а за відсутності таких даних — для транспортних засобів категорії M1 та створених на їх базі категорій M2, N1, N2, а також L6 і L7 з автомобільним компонуванням — не більше 10°.

Також передбачено, що зусилля на кермовому колесі має змінюватися рівномірно по всьому діапазону його повороту. Несправність підсилювача кермового керування, якщо він передбачений конструкцією транспортного засобу, не допускається.

Вимоги до стійкості руху передбачають можливість прямолінійного руху без необхідності постійної корекції керування водієм, а також відсутність надмірних вібрацій у системі кермового управління при максимальній швидкості руху.

Окремо зазначено, що використання у кермовому механізмі та приводі деталей із залишковими деформаціями, тріщинами або іншими дефектами є недопустимим. Також не допускається підтікання робочої рідини в гідросистемі підсилювача керма.

Щодо вимог до органів керування, встановлено, що всі елементи кермового механізму повинні мати достатню міцність, бути доступними для обслуговування та відповідати вимогам безпеки. У випадку, якщо відмова окремої деталі може

призвести до втрати керованості, вона має виготовлятися з металу або матеріалу з аналогічними властивостями та не зазнавати значних деформацій під час нормальної експлуатації.

Основні вимоги до систем кермового управління з підсилювачем також регламентуються міжнародними правилами. Зокрема, кермове колесо повинно бути спроєктоване та встановлене таким чином, щоб витримувати навантаження, які виникають у процесі нормальної експлуатації транспортного засобу.

Крім того, конструкція кермового механізму має забезпечувати можливість регулювання механічного люфту. Поворот кермового колеса повинен відбуватися плавно, без заїдань, у всьому діапазоні від крайнього до крайнього положення як при працюючому підсилювачі, так і при його відключенні.

Також встановлено, що виріб повинен зберігати працездатність і бути придатним до транспортування та зберігання в умовах, які відповідають реальним умовам експлуатації транспортного засобу.

Для забезпечення виконання наведених вимог необхідно визначити можливі причини їх порушення. Аналіз конструкції кермового управління доцільно проводити з урахуванням встановлених нормативів, що дозволяє обґрунтовано вибрати ефективні методи усунення зношування та підвищення надійності механічної передачі.

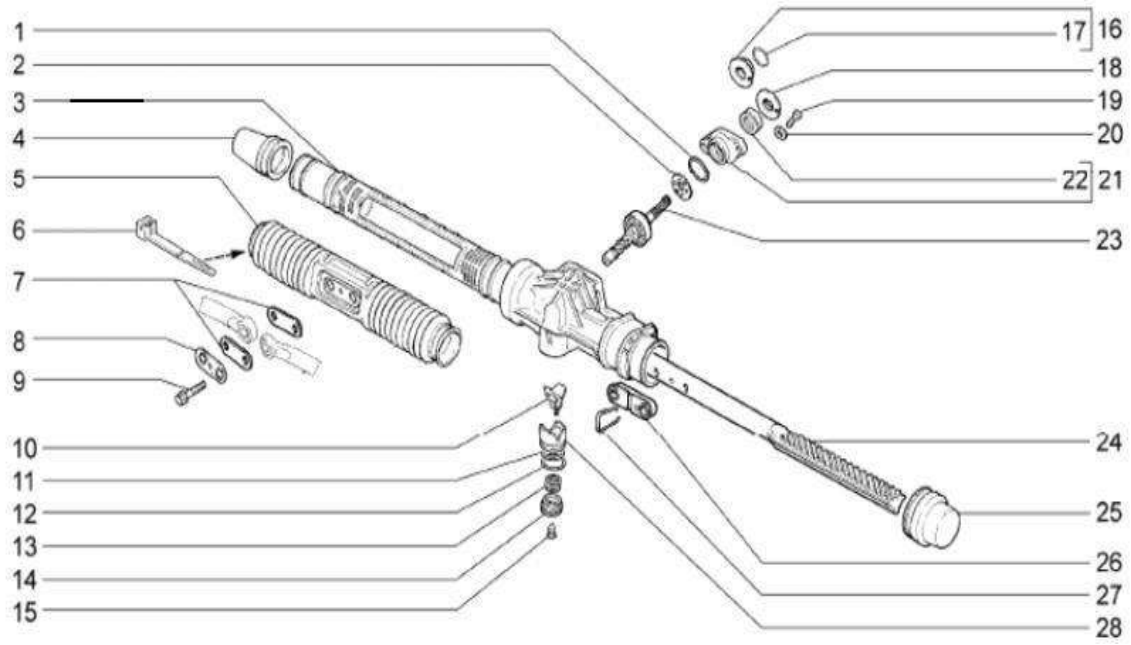
1.3 Аналіз причин несправностей кермових механізмів із підсилювачем керма

У процесі експлуатації а втомобіля в кермовому механізмі з ГУР можуть виникнути заклинювання, зношування вузлів, витік олії, вібрації, що призводять до несправності автомобіля. Основні ознаки несправності рульової рейки: шум або інші сторонні звуки під час пересування транспорту, помітні люфти рульового колеса навіть на невеликі кути при повороті, занадто великий опір при повороті керма, протікання робочої рідини. Несвоєчасне усунення несправностей у

кермовому механізмі або неправильні регулювання лише прискорюють зношування деталей.

Конструкція рейкового механізму перетворює обертальний рух черв'яка на зворотно-поступальний рух зубчастої рейки. Черв'як встановлюється на валу рульового колеса і знаходиться в постійному зачепленні з рейкою, що підтримується упором. Рульова рейка працює в умовах мастил. Зазначені особливості конструкції рейки та рейкового механізму забезпечуються формою робочих поверхонь зубчастого сектора.

Розглянемо основні місця несправностей з прикладу рейки , а цього розглянемо рисунок 4.



1 – кільце ущільнювальне; 2 – сепаратор у зборі; 3 – картер кермового механізму у зборі; 4 – ковпак захисний правий; 5 – чохол рейки; 6 – хомут; 7 – пластина чохла; 8 – пластина стопорна; 9 – болт тяг кермової трапеції; 10 - вкладиш упору; 11 - кільце ущільнювальне; 12 - кільце ущільнювальне; 13 - пружина упору; 14 - гайка упору; 15 – заглушка гайки; 16 - пильовик шестерні в

зборі; 17 - кільце фіксують пильовика; 18 - пильовик шестерні; 19 – болт; 20 - шайба; 21 – кришка картера; 22 - сальник шестерні; 23 – шестерня у зборі; 24 - рейка кермового механізму; 25 – ковпак захисний лівий; 26 - опора тяг кермової трапеції; 27 - скоба упору тяг; 28 - упор рейки.

Рисунок 4 – Схема кермового механізму

Однією з основних причин несправностей системи гідропідсилювача керма є зношування гумових ущільнювальних елементів. Це стосується передусім сальників і ущільнювачів, розташованих у рульовій рейці, а також герметичних з'єднань в інших частинах системи. Під дією механічних навантажень і внаслідок старіння матеріалу гумові елементи поступово втрачають еластичність, що призводить до порушення герметичності та витоку робочої рідини, а отже — до зниження її рівня в системі.

Іншою причиною відмов є несправності розподільного клапанного механізму, що спричиняють некоректний розподіл робочої рідини та погіршують ефективність роботи підсилювача. Також можливі відмови поршневої групи гідроциліндра, внаслідок чого система не здатна створювати необхідний робочий тиск.

Суттєвий вплив на працездатність системи має зношування елементів рейкового механізму. Найбільш навантаженою зоною є контакт зубчастої рейки з ведучим елементом, де під час експлуатації відбувається поступове руйнування робочих поверхонь зубів. Це супроводжується збільшенням зазорів у зачепленні та між контактними елементами, що призводить до появи люфтів і погіршення керованості автомобіля. Нерівномірне зношування бічних поверхонь зубів, а також зменшення товщини антифрикційного шару у вузлі упору рейки додатково посилюють ці негативні явища.

Регулювальний механізм дозволяє частково компенсувати зазори шляхом зміни притискного зусилля упору до рейки, однак у процесі тривалої експлуатації це може спричинити двостороннє зношування контактних поверхонь. Надмірне затягування регулювальних елементів здатне тимчасово зменшити шум і люфт, проте

загалом призводить до прискореного зносу деталей і погіршення технічного стану механізму.

Зношування елементів упору та втулок не підлягає відновленню і потребує їх заміни. Руйнування втулок може бути зумовлене корозійними процесами, викликаними потраплянням вологи, що сприяє утворенню абразивних частинок у зоні контакту. У разі пошкодження ущільнювальних елементів їх часткове відновлення, наприклад шляхом підтискання, є лише тимчасовим заходом і може призвести до додаткових деформацій вузла. Тому всі ущільнювачі, сальники та кільця при виявленні дефектів підлягають обов’язковій заміні.

Аналізуючи причини виникнення несправностей рейкового механізму, можна зробити висновок про необхідність вирішення проблеми зношування зубчастої рейки. Саме ця деталь значною мірою визначає точність і надійність кермового управління. Її зношування призводить до збільшення люфту керма та напрямних коліс, що суперечить нормативним вимогам безпеки. У зв’язку з цим доцільно розглянути сучасні методи зміцнення та відновлення робочих поверхонь зубчастої рейки.

1.4 Аналіз способів підвищення ресурсу рульової рейки

Одним з основних способів відновлення зношених поверхонь кермовий рейки є метод нанесення шару

антифрикційного металопокриття. Розглянемо кілька варіантів цієї обробки, зокрема гальванічне хромування, газотермічне та плазмове напилення. Окремо розглянемо спосіб довговічності підвищення зубчастого сектора методом фрикційного плакування, який є одним з небагатьох на ринку послуг з технічного обслуговування транспортних засобів, що ставить питання щодо його подальшого вивчення.

Технологія покриття валу хромом [33] здійснюється у кілька фаз. Серед них: шліфування та полірування поверхні, яка покриватиметься хромом; створення ізоляції для місць, які потребують покриття хрому (зубчастий сектор); створення

екранів для рельєфу та гострих граней; зачищення абразивним матеріалом; підвішування на рамки; знезараження за допомогою електролітів; промивання у рідині з високою температурою; анодне декапірування; покриття хромом; промивання холодною рідиною; нейтралізація у розчині з лугом. Далі здійснюється промивання у теплій воді та зняття валу з рамки, на яку він би встановлений раніше. Останнім етапом є механічна обробка виробу, який вже покритий хромом. Шліфування та полірування на першому етапі потрібне для того, щоб відновити необхідну форму валу. Під час цієї фази усувається його овальність, а також очищення від іржі. Поверхня доводиться до рівня чистоти, щоб перейти до наступного етапу.

Процес хромування має деякі особливості. В ході процесу нанесення на робочі поверхні штока рейки, одержувана товщина захисного шару хрому набагато більше, ніж в інших методах, що розглядаються. Покриваються зазвичай окремі ділянки, а решта поверхні деталей ізолюється за допомогою листа целулоїду, що не передбачає обробки зубчастого сектора рульової рейки. Відновлення штока рейки хромуванням досить трудомістка і дорога процедура і в деяких випадках можна порівняти з вартістю валу із заводу виробника.

Принцип дії газотермічного напилення [28] заснований на нанесенні на підготовлену поверхню малих розплавлених частинок.

певного металу. Напилюваний матеріал потрібного сплаву поміщається у високотемпературне середовище, де розпорошується на необхідну поверхню за допомогою струменя стиснутого повітря або газу. Частинки, утворені під час розпилення матеріалу, рухаються з великою швидкістю в заданому напрямку. Потрапивши на поверхню, що обробляється, частинки остигають і формують шар з необхідними властивостями.

У процесі плазмового напилення [6] на поверхню оброблюваного виробу розпеченим плазмовим струменем наноситься рівномірне порошкове покриття. Воно щільно зчіплюється із поверхнею металу за рахунок високої швидкості подачі. Відновлення форми та зовнішнього покриття деталей за допомогою

плазмового напилення відрізняється високою точністю виконання та відсутністю будь-яких похибок, дефектів, напливів. Нагрівання деталей при відновленні відбувається при температурі не більше 150 °С, що дозволяє уникнути деформації та зміни розмірів деталей. Такий підхід унеможливлює небажані структурні зміни.

Товщина покриття, що наноситься методами газотермічного або плазмового напилення на вал обмежена 2 мм. Мінусом цих методів є висока вартість пристроїв напилення, здатних нанести якісне щільне покриття. Необхідні капіталовкладення ставлять під сумнів можливість застосування запропонованих варіантів для ремонтно-відновлювальних робіт на дрібних підприємствах.

Зношування зубів рульової рейки усувається шляхом вдавлювання [30]. Варто зазначити, що такого роду дефект можна знайти виключно в середній частині рейки. Він поступово вирівнюється до країв. Вдавлювання є одночасним осадом і роздачею. При цьому рейку попередньо нагрівають у спеціальних пристроях. Вдавлювання здійснюють роликами та клинами протилежно необхідної деформації профілю зубів. Далі отриману канавку доводять шляхом наплавлення.

Недоліками цього способу можна назвати подвійну

технологічну обробку, наступне шліфування для збереження профілю, і те, що шар покриття при наплавленні має досить високу товщину. Також у наплавленому металі спостерігається розвиток несприятливих умов – відбувається утворення газових пор, тріщин. Внаслідок цього поверхневий шар має нижчу межу витривалості.

У літературних джерелах практично не зустрічаються інші рекомендації щодо відновлення кермової рейки. З чого випливає, що розробка технології зміцнення робочих поверхонь рухомих з'єднань рульового механізму в зоні черв'ячної передачі є актуальним завданням для збільшення ресурсу механізму після завершення ремонтно-відновлювальних робіт.

Технічний результат полягає у збільшенні міжремонтного періоду інтегральних кермових механізмів з підсилювачем керма за рахунок створення на

поверхнях деталей пар тертя рульової рейки зносостійких покриттів із заданими службовими властивостями.

Висновки.

Поверхні деталей рульового механізму в умовах експлуатації схильні до різних видів зносу. Характер і тип зносу залежить від умов експлуатації автомобіля.

Рульова рейка є однією з основних деталей, проблему зношування якої необхідно вирішити. З розглянутих методів підвищення зносостійкості рульової рейки відомий та запатентований лише один метод зміцнення зубів рульової рейки.

Для нанесення покриттів на зубчастий сектор рульової рейки було запропоновано метод фрикційного плакування гнучким інструментом. Необхідні подальші дослідження щодо специфіки та особливостей даного методу.

2 Плакування гнучким інструментом

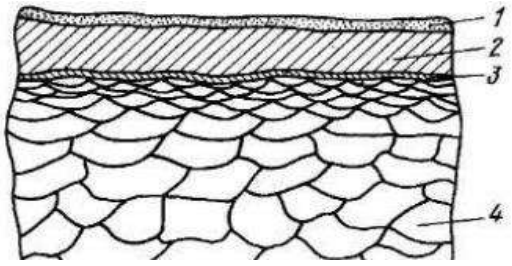
2.1 Методика плакування гнучким інструментом

Відомим методом, що забезпечує збільшення довговічності та надійності вузлів та деталей машин, є зміцнення методом поверхневого пластичного деформування (ППД), який забезпечує високу якість поверхневого шару деталей, підвищує їх експлуатаційний ресурс, втомну, контактну міцність та зносостійкість. Серед найпоширеніших методів ППД: дробоструменева та піскоструменева обробка, термопластичне зміцнення, карбування, галтування, розкочування та накочування кульками та роликами, а також метод фрикційного плакування гнучким інструментом (ПГІ).

Відомо, що підвищення терміну служби деталей машин, що працюють в умовах тертя і зносу, досягається шляхом нанесення на їх робочу поверхню захисних покриттів. Існуюче різноманіття методів поверхневого зміцнення деталей машин та механізмів обумовлено специфікою їх роботи [8]. Так як зубчаста рейка схильна до втомного зношування, то актуальний метод поверхневого зміцнення деталей пар тертя, який створює на поверхні залишкові напруги стиснення, що знижує ймовірність виникнення тріщин.

Обробка плакуванням виробів за допомогою гнучких інструментів полягає у термомеханічному утворенні покриттів. Обробка здійснюється дротяною щіткою. Сам механізм плакування описують так: «матеріал, з якого буде створюватися покриття, знаходиться в твердому стані і притискається до зовнішньої частини робочих елементів щітки. На початкових етапах обертання здійснюється очищення поверхні елемента матеріалу покриття (ЕМП), що, своєю чергою, призводить до схоплювання покриття з матеріалом ворсу щітки. Коли здійснюється контакт із оброблюваною деталлю, проводиться перенесення металу з ворсу щітки на оброблювану поверхню. При взаємодії щітки, що обертається, з деталлю відбувається руйнування і видалення окисних плівок і забруднень із зони контакту. Зминання мікронерівностей і пластичний перебіг металу призводить до безпосереднього контакту чистих поверхонь деталі та інструменту, в результаті

чого відбувається схоплювання, що є мимовільним процесом, що протікає з виділенням енергії. Інтенсивне тепловиділення при терті гнучкого інструменту поверхню виробу сприяє полегшенню процесу схоплювання. Надалі через взаємний рух поверхонь, що з'єдналися, вузол схоплювання руйнується. Зріз відбувається, як правило, у товщі менш міцного металу та його частинки залишаються на поверхні твердішого. З часом більш твердої поверхні утворюється покриття [1], [13]. Описав методику, можна виділити її переваги - вона є досить продуктивною, чистою з екологічної точки зору, а процес ПГІ не потребує додаткової обробки поверхні, як до, так і після проведення операції. Дослідження даної процедури нанесення покриття дозволило виділити у структурі шару поверхні три базові ділянки. Схематично вони показані рисунку 5.



1 – покриття; 2 – деформований шар; 3 – перехідний шар; 4 – основа металу оброблюваної деталі

Рисунок 5 – Структура поверхні після ПДМ

Дослідження поверхневого шару, сформованого в процесі фрикційного плакування гнучким інструментом, показало, що його структура є багатозонною та формується внаслідок поєднання механічної взаємодії, пластичної деформації та дифузійних процесів. У типовому випадку можна виділити три характерні зони. Перша зона представлена власне покриттям, яке формується безпосередньо під час обробки внаслідок перенесення матеріалу з робочих елементів інструменту на поверхню деталі. Друга зона є перехідною і розташована між покриттям та основним матеріалом деталі; вона характеризується складною будовою і неоднорідністю. Третя зона — це деформований приповерхневий шар основного

матеріалу, який зазнає інтенсивної пластичної деформації під дією контактних навантажень.

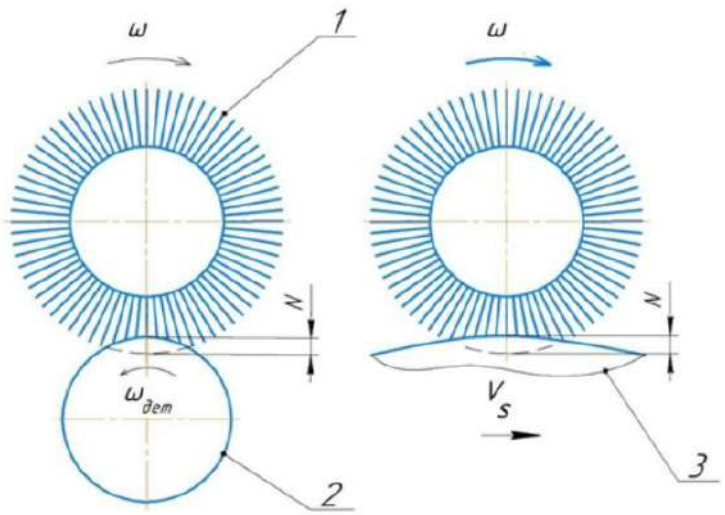
У процесі плакування гнучким інструментом відбувається значне зміцнення поверхні за рахунок наклепу, що призводить до підвищення мікротвердості, формування сприятливого напружено-деформованого стану та зменшення схильності до зношування. Особливий інтерес становить саме перехідний шар, оскільки його властивості суттєво відрізняються як від матеріалу основи, так і від матеріалу нанесеного покриття. Формування цього шару зумовлене інтенсивними дифузійними процесами, механічним перемішуванням матеріалів та локальним підвищенням температури в зоні контакту. Внаслідок цього утворюється структура з підвищеною твердістю, зміненим мікрорельєфом і покращеними трибологічними характеристиками.

Саме покриття, яке утворюється в процесі обробки, виконує функцію своєрідного твердого мастила, особливо на початкових етапах експлуатації деталі. У процесі припрацювання значна його частина поступово видаляється з виступів мікронерівностей і зберігається переважно у западинах мікрорельєфу, що сприяє зниженню коефіцієнта тертя та стабілізації умов контакту. Разом з тим встановлено, що зі збільшенням швидкості обертання гнучкого інструменту може спостерігатися інтенсивніше зняття сформованого шару, що потребує оптимізації режимів обробки.

На сьогодні застосовуються дві основні технологічні схеми реалізації процесу плакування гнучким інструментом. У першому випадку ворс гнучкого інструменту одночасно виконує роль носія матеріалу покриття. При початковому контакті інструменту з поверхнею відбувається її очищення від забруднень, окалини та продуктів корозії, а також часткове згладжування мікронерівностей. У результаті цього відкриваються ювенільні поверхні, які мають високу хімічну активність і сприяють утворенню міжатомних зв’язків. Подальший процес характеризується виникненням умов для адгезійного схоплювання між матеріалом ворсинок і поверхнею деталі. Це забезпечується сумісною пластичною деформацією

контактуючих шарів і локальним підвищенням температури в зоні обробки. У ході подальшого обертання інструменту відбувається ковзання ворсинок разом із частинками матеріалу по оброблюваній поверхні, що супроводжується їх інтенсивним механічним перемішуванням. У результаті цього формується складна багатошарова структура перехідної зони, яка включає області з різним ступенем змішування матеріалів.

Таким чином, процес фрикційного плакування гнучким інструментом забезпечує формування функціонального поверхневого шару з підвищеною зносостійкістю, покращеними антифрикційними властивостями та оптимальними параметрами мікрогеометрії. Це відкриває можливості для ефективного застосування даної технології при відновленні та зміцненні деталей, що працюють в умовах інтенсивного тертя та зношування.



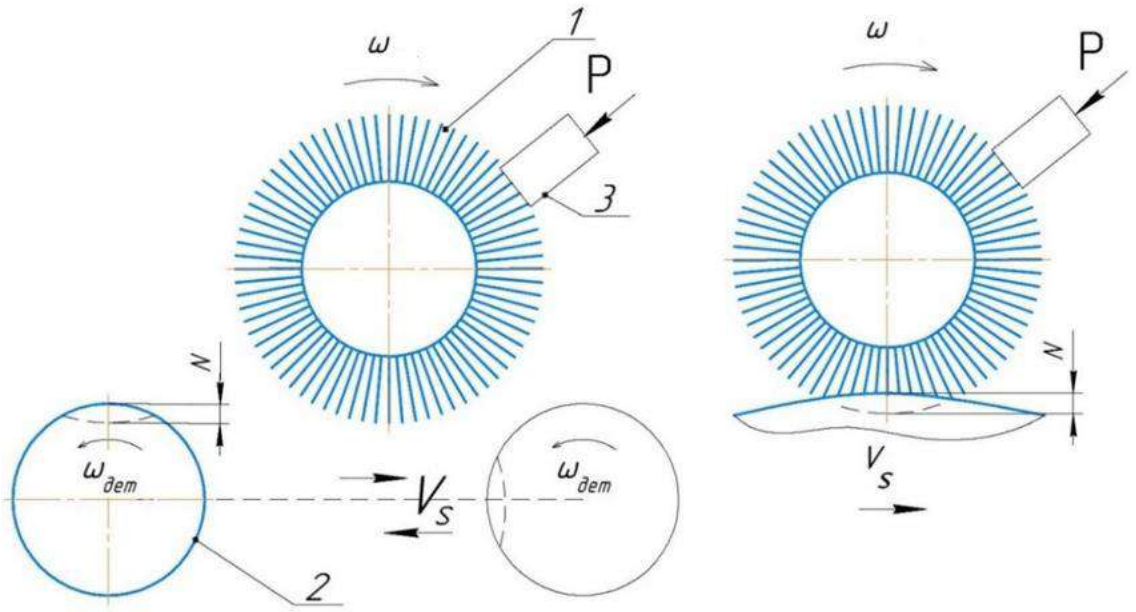
1 – гнучкий інструмент; 2 - оброблюваний виріб форми тіл обертання; 3 – оброблюваний виріб плоскої поверхні.

Рисунок 6 – Принципові схеми реалізації процесу

Істотний недолік схеми - це невеликий ресурс інструменту, що веде до подальшої утилізації без можливості повторного застосування. Після тривалої експлуатації ефективність методу знижується. Також спостерігається складність дотримання технологічного режиму через знос ворсинок щітки.

На другій схемі ворс гнучкого інструменту стає механічним переносником частинок матеріалу покриття на основу виробу, що обробляється. При цьому інструмент притискають до ЕМП у вигляді твердотільного компонента з деяким зусиллям. Схема представлена рисунку 7. Гнучкий інструмент являє собою дротяну щітку, що обертається. Фрикційне підвищення температури з високим рівнем інтенсивності допомагає зруйнувати вузли, у яких відбувається схоплювання. Це здійснюється через товщу розміцненого шару поверхні ЕМП. Відповідно частинки покриття залишаються на зовнішній частині щітки. Коли контактує гнучкий інструмент з поверхнею, що обробляється, тоді матеріал переноситься з ворсу на основу. Це здійснюється згідно з описаним механізмом утворення покриття. Ця схема утворення покриття за допомогою фрикційного плакування використовується найчастіше. Варто також відзначити, що механічна щітка може встановлюватися під кутом до поверхні, що плакується деталі. Також допускається перетин їх під кутом величиною від 25° до 45°. Подача оброблюваної деталі може відбуватися в обох напрямках – вздовж та поперек інструменту. Найчастіше ця схема застосовується для плакування циліндричних і плоских поверхонь.

Схема обробки має такі переваги як простота реалізації та економічна ефективність. Цей спосіб нанесення покриттів у поєднанні з високими експлуатаційними характеристиками оброблених поверхонь обраний як фундамент для подальшого опрацювання конструкції установки для обробки кермової рейки. Тоді на основі цієї принципової схеми необхідно розробити установку плакування для зубчастої рейки з її конструктивними особливостями.



1 – гнучкий інструмент; 2 - оброблюваний виріб; 3 – елемент матеріалу покриття.

Рисунок 7 – Принципові схеми реалізації процесу ПДМ

Однією із виявлених проблем стала складність обробки бічних поверхонь зубів кермової рейки. Плакування існуючими методами неможливе через постійне розташування ворсинок уздовж оброблюваної деталі, що несприятливо позначиться на верхній області зубів. Для обробки крайніх зубів немає жодних технічних перешкод, а ось провести обробку проміжних зубів неможливо. І як уже було зазначено – саме там спостерігається вищий знос. Тобто потрібно продумати таку схему обробки, щоб дотримувався постійний натяг, однаковий виліт ворсу і при цьому ворс був перпендикулярний оброблюваної поверхні при вході з нею в контакт. На рисунку 8 представлена схема обробки зубчастої рейки методом плакування з урахуванням виявлених особливостей.

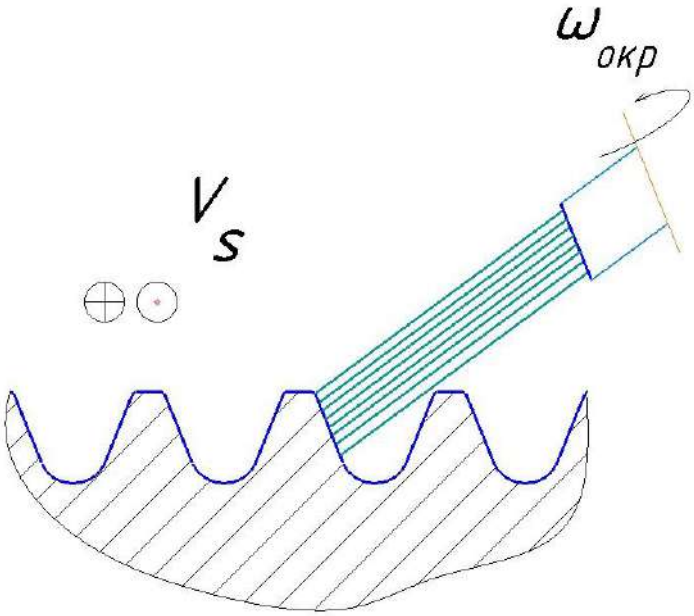


Рисунок 8 – Принципова схема встановлення плакування зубчастого сектора рульової рейки

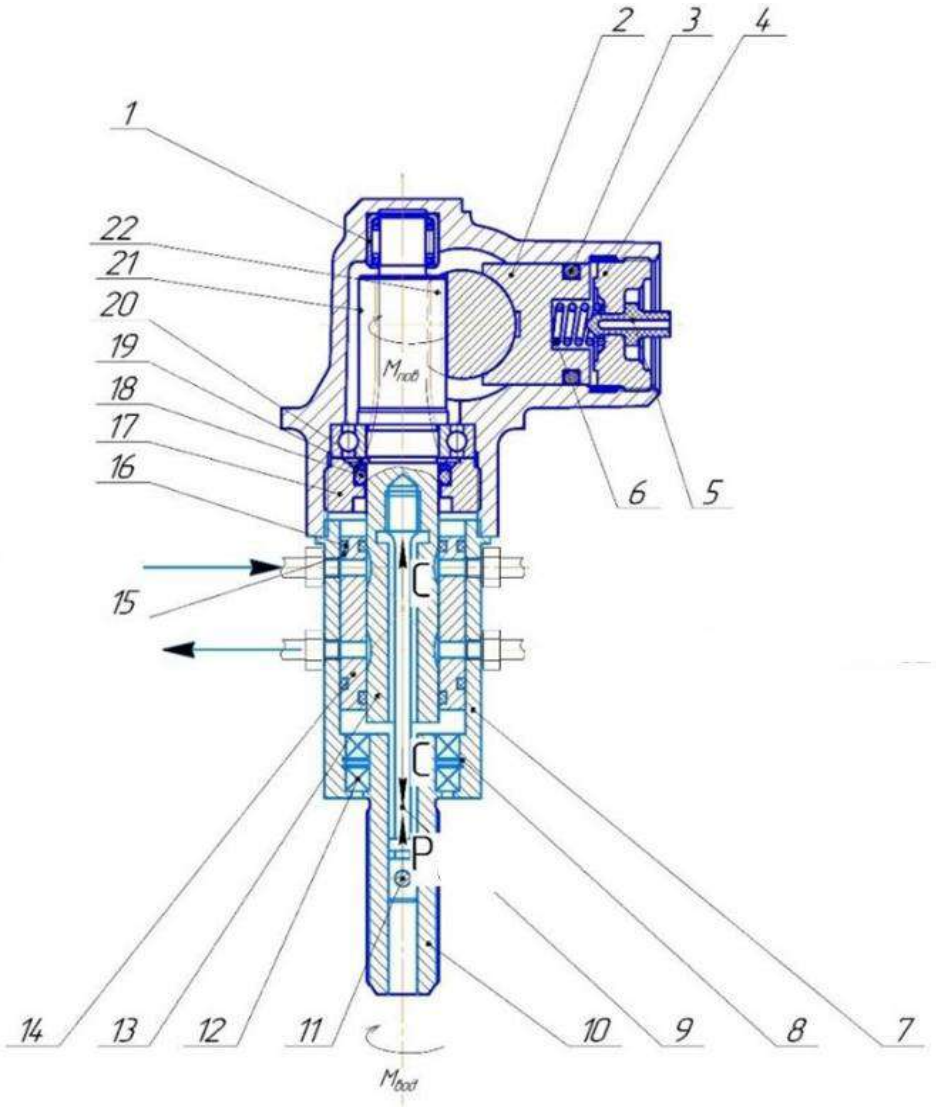
При запропонованій схемі обробки зубів кермової рейки виконуються такі умови для ПГІ; забезпечується сила удару, яка залежить від діаметра інструменту, діаметра ворсинок та довжини вильоту; зберігається постійний натягNдля всіх ворсинок, що знаходяться в контакті в інтервалі від 1 до 2 мм.

Однак, щоб отримувати постійну високу якість покриттів потрібно точно реалізувати технічні параметри процесу за вказаною схемою. Тоді правильно підібрані режими обробки не призведуть до швидкого виходу інструменту з ладу внаслідок руйнування втоми. Подальше дослідження даних проблем потребує розробки методики точного розрахунку параметрів процесу ПГІ, яка дозволить запропонувати способи точного дотримання технологічного процесу. Для забезпечення необхідної якості поверхні, що обробляється, необхідний вибір оптимальних режимів обробки, що передбачає необхідність визначення сил в зоні контакту, виходячи з умов роботи рульової рейки.

2.2 Визначення методики розрахунку параметрів у зоні контакту

На рисунку 9 представлено схему зони контакту. Під час здійснення повороту черв'як 20 повертає зубчастий сектор 21. Він повертається із золотником 15 і торсіоном 9. Тоді в черв'яку виникає сила Р прагне змістити його в осьовому напрямку. Від усунення черв'яка утримує сила пружності торсіону З. Якщо зусилля Р менше, Черв'як в осьовому напрямку не зміщується і золотник 15 залишається в нейтральному положенні. У порожнинах гідроциліндра не утворюється належний ступінь тиску. Відповідно, поворот автомобіля здійснюється лише завдяки моменту $М_{вод}$, прикладеному через кермо. У цій ситуації момент опору повороту черв'яка $М_{повз}$ моментом сил тертя $М_{тр}$ менше моменту, що повертає, від сил пружності торсіону $М_{торс}$.

У випадку, якщо опір повороту є високим і момент здатний подолати опір повороту коліс, черв'як повертається у зубчастий сектор. Це призводить до його зміщення в напрямку осі, коли здійснюється поворот праворуч і назад при повороті вліво. Тоді потік спеціальної рідини від розподільника направляється до робочого гідроциліндра у відповідні порожнини, де під тиском рейка 22 переміщається вперед і повертає зубчастий сектор. Від даного сектора поворотний момент передається колесам через кермові тяги. Сили та переміщення, які з'являються внаслідок задіяння механізму кермового управління з ГУР, зношують рейковий механізм.



1 – підшипник; 2 – упор; 3 – манжета; 4 – гвинт; 5 – пробка; 6 – пружина; 7 – склянка; 8 – стопорне кільце; 9 – торсіон; 10 - вал кермової колонки; 11-штифт; 12 – підшипник; 13 - вал розподільника; 14 – розподільник; 15 – золотник; 16 – манжета; 17 – гайка; 18 – манжета; 19 - шайба; 20 – стопор; 21 - черв'як; 22 – зубчаста рейка.

Рисунок 9 – Схема зони контакту на розподільнику під час передачі зусиль на поворот

На рисунку 10 видно, що при повороті кермового валу на черв'як впливають сили: $P_{ч\text{-}р.ос}$, що прагне перемістити черв'як з певною швидкістю в осьовому

напрямку; $P_{ч\text{-}р.}$, що прагне змістити черв'як у напрямку від рейки; момент сил $M_{пов}$, що передається від кермового колеса через розподільник. У результаті взаємодії сил $P_{ч\text{-}р.ос}$ і $P_{ч\text{-}р.}$ і отриманого навантаження через черв'як, рульова рейка здійснює зворотно-поступальний рух.

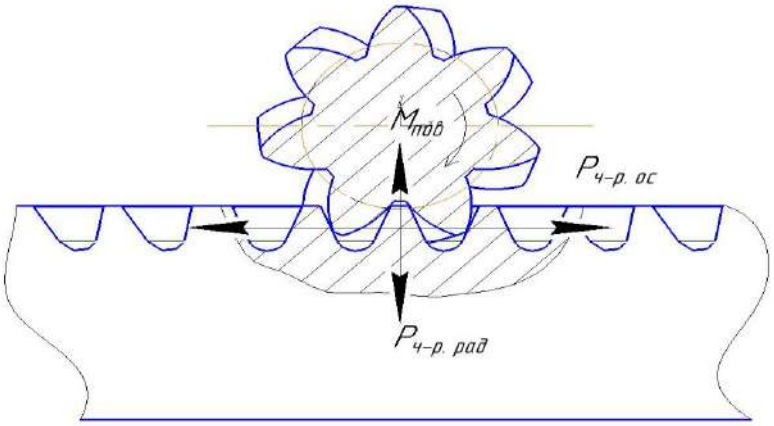


Рисунок 10 – Схема зони контакту на рульовій рейці під час передачі зусиль на поворот

У цьому вузлі кермового механізму зі складним профілем поверхні тертя, що працює в умовах тертя кочення з прослизанням, внаслідок високих контактних тисків, що виникають в процесі експлуатації, відбувається витіснення мастила із зони контакту.

У результаті порушення умов мастила контакт поверхонь наближається до режиму сухого тертя. За таких умов інтенсивність зношування значно зростає, оскільки виникає прямий контакт мікронерівностей поверхонь, що спричиняє прискорене руйнування матеріалу та скорочення ресурсу кермового механізму.

Під дією контактних сил, а також крутного моменту, що передається через кермовий механізм, у зоні взаємодії черв’ячного елемента та зубчастої рейки формуються циклічні навантаження. Це призводить до поступового зношування бічних поверхонь зубів у місцях контакту. Особливо інтенсивні процеси зношування спостерігаються при підвищеному опорі повороту керма, коли виникає

відносне прослизання витків черв’яка відносно зубів рейки. Такий режим супроводжується розвитком контактної втоми, мікропошкоджень і поступовим руйнуванням робочих поверхонь.

Конструктивна форма зубів рульової рейки, яка наближена до трапецеїдальної, передбачає наявність складових руху з ковзанням у зоні зачеплення. Це обумовлює підвищений рівень тертя, що є додатковим фактором інтенсифікації зношування. Руйнування контактуючих тіл відбувається під впливом дотичних напружень, які в поверхневих шарах можуть перевищувати межу текучості або навіть міцності матеріалу. Навіть за наявності мастила, коли воно не забезпечує повного розділення поверхонь, реалізується режим граничного тертя, що також сприяє розвитку зношування та пошкоджень.

З урахуванням кінематичних і силових особливостей роботи пари «черв’як – рульова рейка виникає необхідність застосування ефективних методів підвищення зносостійкості контактних поверхонь. Одним із найбільш доцільних підходів є формування захисного антифрикційного шару, який дозволяє знизити коефіцієнт тертя, обмежити прямий контакт металевих поверхонь та підвищити опір втомному руйнуванню.

У цьому контексті перспективним є застосування технології фрикційного плакування гнучким інструментом, яка забезпечує створення функціонального поверхневого шару з покращеними трибологічними властивостями. Такий шар сприяє стабілізації умов тертя, зменшенню інтенсивності зношування та підвищенню довговічності елементів рейкового механізму.

Основою для побудови математичної моделі процесу є аналіз контактної взаємодії інструмента з оброблюваною поверхнею. З урахуванням конструктивних особливостей рульової рейки та характеру розподілу навантажень доцільно зосередити увагу саме на зміцненні бічних поверхонь зубів, які зазнають найбільш інтенсивного зношування.

Виходячи з кінематики взаємодії окремої ворсинки гнучкого інструменту з поверхнею зуба, бічну поверхню зуба при обробці можна апроксимувати плоскою.

Це дозволяє використовувати спрощену методику розрахунку параметрів контактної зони, аналогічну до тієї, що застосовується для плоских поверхонь, що значно полегшує визначення технологічних режимів обробки та прогнозування результатів зміцнення.

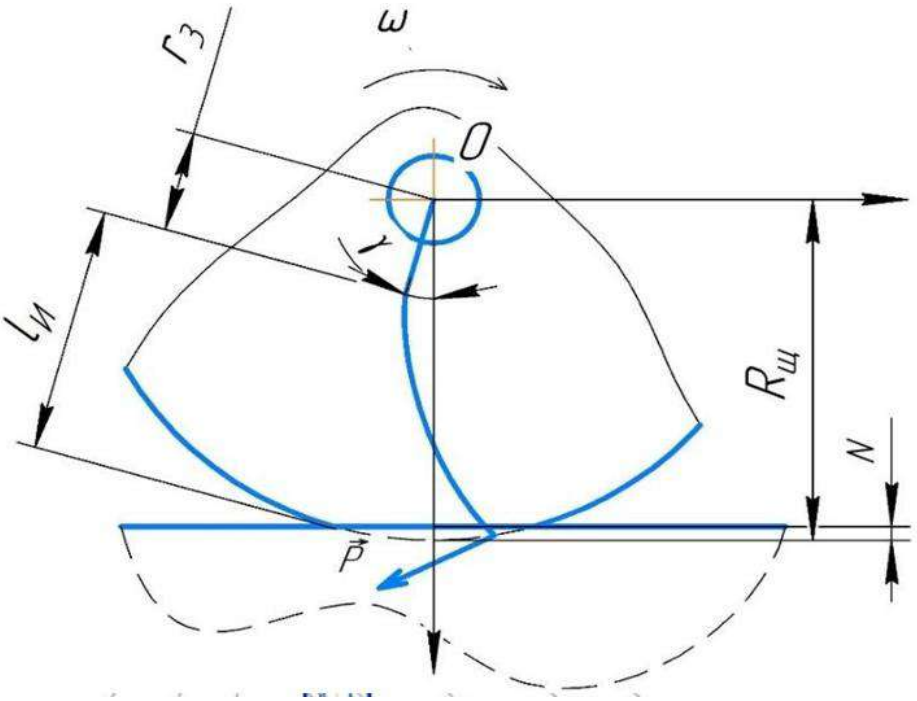


Рисунок 11 – Контакт щітки з плоскою поверхнею зуба рульової рейки

Кут, при якому ворс контактує з плоскою поверхнею, обчислюється за допомогою виразу:

$$\gamma = arccos\frac{R_{щ} - N}{R_{щ}}, \qquad (1)$$

Де N - Натяг ворсу до виробу, що обробляється, мм; $R_{щ} = L_з + R_н$ - Радіус щітки, мм; $R_н$ - Довжина незгинальної частини ворсу, мм; $L_з$ - Виліт частини ворсу, що згинається, мм.

Таким чином, визначивши методику та обґрунтувавши причини зносу оброблюваної поверхні, робимо висновок, що обробка зубів рульової рейки під кутом є у проекції обробку плоскої поверхні.

2.3 Аналіз джерел ефективності методики поверхневого пластичного деформування

Для оцінки ефективності запропонованого методу необхідно визначити сукупність критеріїв, за якими можна зробити висновок про досягнення позитивного результату обробки. До таких критеріїв належать підвищення твердості поверхневого шару, зниження шорсткості, збільшення зносостійкості та стабільність сформованих властивостей у процесі експлуатації. З метою обґрунтування вибору методу плакування гнучким інструментом було проведено порівняльний аналіз існуючих способів поверхневого пластичного деформування з урахуванням якості обробленої поверхні та експлуатаційних характеристик деталей.

Відомо, що довговічність і надійність деталей значною мірою визначаються станом їх приповерхневого шару. Саме тому методи поверхневого пластичного деформування широко застосовуються в машинобудуванні. Їх популярність пояснюється рядом технологічних переваг, зокрема відносною простотою реалізації, відсутністю шкідливих викидів, високою продуктивністю, універсальністю застосування та здатністю формувати зміцнений шар із підвищеними експлуатаційними властивостями. Водночас такі методи мають і певні обмеження. Наприклад, вони часто потребують попередньої підготовки поверхні з відповідною шорсткістю, а при порушенні режимів обробки можливі негативні явища, такі як перенаклеп або лущення поверхні.

Сутність обробки методами поверхневого пластичного деформування полягає у силовій взаємодії інструмента з поверхнею заготовки при їх відносному переміщенні. У разі ударних методів на поверхні формується велика кількість локальних пластичних деформацій у вигляді відбитків, які в сукупності створюють зміцнений шар. Розміри та характеристики зони деформації залежать від властивостей матеріалу деталі, геометрії та параметрів інструмента, а також від енергії ударної дії. При використанні статичних методів, таких як обкатування роликом або кулькою, зона деформації переміщується безперервно, що забезпечує більш рівномірний розподіл напружень у поверхневому шарі.

Поряд зі статичними методами в сучасному машинобудуванні широко застосовуються і динамічні способи обробки, що реалізуються за рахунок багаторазових ударних впливів. До таких методів належить і плакування гнучким інструментом. Проведені дослідження показують, що незалежно від конкретного способу реалізації процесу ППД, формування якісного поверхневого шару визначається режимами обробки, які впливають на глибину деформації, рівень залишкових напружень та структуру матеріалу.

При обробці гнучким інструментом зміцнення поверхні досягається за рахунок великої кількості дискретних контактів ворсинок інструмента з поверхнею деталі. Ці контакти мають випадковий характер у часі та просторі, що призводить до формування множини локальних зон пластичної деформації. У результаті поверхня покривається системою перекривних відбитків, які формують зміцнений шар із зміненими фізико-механічними властивостями.

На основі досліджень процесів поверхневого пластичного деформування розроблено ряд математичних моделей, що дозволяють прогнозувати основні параметри зміцнення, зокрема ступінь пластичної деформації та глибину зміцненого шару. Ці характеристики визначаються як технологічними режимами обробки, так і фізико-механічними властивостями матеріалу деталі.

У зоні контакту інструмента з поверхнею відбувається локальне впровадження деформуючих елементів — ворсинок або частинок ударного

середовища. Внаслідок цього формується залишкова вм'ятина, під якою утворюється пластично деформований шар певної глибини, що відрізняється від основного матеріалу підвищеною твердістю та зміненими структурними характеристиками.

Однією з перших узагальнених залежностей для оцінки глибини зміцненого шару є аналітична модель, яка дозволяє пов'язати глибину пластичної деформації з параметрами навантаження та властивостями матеріалу. Використання таких залежностей дає можливість обґрунтовано вибирати режими обробки та прогнозувати ефективність зміцнення поверхні.

$$h_s = \sqrt{\frac{P}{2 \cdot \sigma_T}}, \qquad (2)$$

Де P - Зосереджена сила деформування, прикладена в центрі площі контакту, Н;

σ_T - межа плинності матеріалу деталі при розтягуванні або стиску, Па [36].

Для матеріалів, що не мають на діаграмі розтягування вираженого майданчика плинності, як σ_T приймають умовну межу плинності $\sigma = 0{,}2$.

Безліч дослідників намагалися покращити, видозмінити та доповнити цю залежність. Автор [21] під час проведення експериментальних досліджень довів, що розрахункові дані, отримані під час використання цієї залежності вище експериментальних на 20 %.

Так, Дрозд М. С. сформулював узагальнюючу залежність, «виходячи з формування моделі взаємодії сферичного індентора, що впроваджується. В рамках запропонованої моделі детально описується вплив розмірів площі взаємодії сфери з поверхнею на глибину зміцнення шару:

$$h_s = \sqrt{\frac{P}{2 \cdot \sigma_T} - 0{,}5\left(\frac{d_B}{2}\right)^2}, \qquad (3)$$

Де d_B – діаметр контактного майданчика індентора з деталлю [12].

Дослідник Тамаркин М. А. запропонував «уточнену залежність, у межах якої береться до уваги те, що площа контакту сферичного індентора з площиною

$$h_s = 2 \cdot V \cdot r_{\text{отп}} \cdot \sin\gamma \cdot \sqrt{\frac{p_{\text{ш}}}{3 \cdot k_s \cdot c \cdot \sigma_T}}, \quad (4)$$

Де V - Швидкість обробки, м / с; k_s - Коефіцієнт, що враховує вплив шорсткості деталі; $\rho_{\text{ш}}$ - Щільність матеріалу індентора, кг/м3; $r_{\text{відп}}$ - Радіус індентора, м; с - Коефіцієнт несучої здатності контактної поверхні [34].

Відповідно до досліджень Кудрявцева І. В. «ступінь деформаціїє виражається щодо діаметра лункid, яка формується в результаті впливу індентора, до діаметру сфери, що вдавлюється D:

$$\varepsilon = \frac{d}{D}. \quad (5)$$

«Грунтуючись на даних наукових джерел та практичних досліджень, які містяться в роботі, діаметр, який залишається після удару індентора, тобто деформований напівпростір лунки (вогнище деформації)d[20], визначається за формулою:

$$d = \sqrt[4]{\frac{D \cdot P}{0{,}1 \cdot HD}}, \quad (6)$$

Де HD - динамічна твердість матеріалу [12].

Для практичного застосування наведених аналітичних залежностей, що дозволяють визначити глибину зміцненого шару, необхідно враховувати ключові параметри процесу, зокрема контактне навантаження та межу плинності матеріалу деталі. Незважаючи на те, що відповідні розрахункові співвідношення вже враховують технологічні та геометричні фактори, включаючи силу ударної взаємодії, їх використання у виробничих умовах не завжди забезпечує достатню точність керування процесом. Це зумовлює необхідність експериментального уточнення параметрів обробки та перевірки отриманих залежностей.

Результати численних досліджень у галузі поверхневого пластичного деформування свідчать про те, що зі зростанням ступеня пластичної деформації відбувається безперервне підвищення межі плинності матеріалу за рахунок ефекту наклепу. У зв’язку з цим особливого значення набуває забезпечення максимальної рівномірності деформації приповерхневого шару, оскільки саме цей фактор визначає стабільність і ефективність зміцнення.

Таким чином, при реалізації процесу обробки динамічними методами із застосуванням гнучкого інструменту до основних показників якості слід віднести ступінь зміцнення, глибину сформованого шару та рівномірність розподілу деформації по оброблюваній поверхні. Саме ці параметри визначають експлуатаційні властивості деталі після обробки.

Аналіз експериментальних даних свідчить про високу ефективність застосування даного методу для зміцнення деталей різного призначення. Зокрема, при обробці штоків гідроциліндрів зі сталей середнього вуглецевого складу було отримано покриття товщиною порядку десятків мікрометрів. Важливим є те, що аналогічні результати досягнуті при зміцненні зубчастих елементів передач, геометрія яких є близькою до профілю зубів рульової рейки.

Це підтверджує можливість ефективного застосування даної технології для зміцнення зубчастих поверхонь із трапецеїдальним профілем.

Особливий інтерес становлять покриття на основі кольорових металів, зокрема міді, які демонструють високі антифрикційні властивості. Застосування таких покриттів дозволяє суттєво підвищити ресурс деталей, що працюють в умовах інтенсивного тертя. В окремих випадках спостерігалося багаторазове збільшення терміну служби елементів, що підтверджує доцільність використання функціональних покриттів при зміцненні поверхонь.

Додаткові дослідження показали, що при обробці циліндричних поверхонь із використанням гнучкого інструменту можна отримати покриття товщиною від кількох десятків до понад ста мікрометрів. Параметри процесу, такі як довжина і діаметр робочих елементів інструменту, швидкість обертання та кількість проходів, істотно впливають на кінцеві характеристики поверхневого шару.

Встановлено також закономірності формування покриттів із різних матеріалів, зокрема міді, алюмінію, латуні та олова. Товщина і структура сформованого шару залежать від величини притиску інструменту до поверхні та тривалості обробки. Зі збільшенням цих параметрів спостерігається зростання глибини зміцненого шару та підвищення рівня його структурної однорідності.

Узагальнюючи результати проведених досліджень, можна зробити висновок, що метод фрикційного плакування гнучким інструментом дозволяє формувати зміцнений поверхневий шар із покращеними механічними та трибологічними властивостями. Це відкриває широкі можливості для його застосування при відновленні та підвищенні довговічності деталей машин, зокрема елементів кермового управління.

Таблиця 2 - Результати експерименту

Номер	Матеріал покриття								Технологічні параметри	
	Мідь		Алюміній		Латунь		Олово			
	H, мкм	σУ, МПа	H, мкм	σУ, МПа	H, мкм	σУ, МПа	H, мкм	σУ, МПа	N, мм	Час, хв
1	75	6.53	150	9.56	120	6.32	170	6.4	3	3
2	100	7.17	100	4.76	150	7.43	120	7.2	3	3
3	150	6.46	120	5.99	100	6.94	140	6.4	1	1
4	67	6.1	67	4.66	170	6.6	100	7.4	1	1
Позначення: H - Товщина сформованого покриття; $\sigma_У$ - Адгезійна міцність покриття										

Аналіз результатів експериментальних досліджень свідчить про складний і неоднозначний вплив технологічних параметрів обробки на формування покриття. Зокрема, встановлено, що збільшення натягу інструмента при короткій тривалості обробки сприяє підвищенню товщини покриття та його адгезійної міцності. Водночас при подовженні часу обробки подальше збільшення натягу може призводити до зворотного ефекту, що проявляється у погіршенні якості сформованого шару .

Порівняльний аналіз різних способів формування покриттів показує, що фрикційне плакування має низку переваг порівняно з традиційними методами, зокрема гальванічним нанесенням. Зокрема, встановлено, що плаковані покриття демонструють вищу стійкість до циклічних навантажень і не схильні до відшаровування навіть у разі руйнування основного матеріалу. Разом із тим ефективність таких покриттів залежить від рівня навантажень: при перевищенні певного граничного значення їх працездатність може знижуватися.

Дослідження процесів зміцнення поверхонь показали, що використання гнучкого інструменту дозволяє не лише формувати захисні покриття, а й значно

змінювати структуру приповерхневого шару. При цьому спостерігається зменшення шорсткості та підвищення мікротвердості, що є наслідком інтенсивної пластичної деформації. Ефект зміцнення значною мірою залежить від швидкості обробки: при підвищенні швидкості руху інструменту інтенсивність наклепу зростає, що позитивно впливає на експлуатаційні характеристики поверхні.

Отримані в різних дослідженнях значення товщини сформованих покриттів можуть суттєво відрізнятися залежно від умов обробки та використовуваних матеріалів. Узагальнення експериментальних даних дозволяє стверджувати, що товщина покриття може змінюватися в широких межах — від кількох мікрометрів до десятків і навіть понад сотні мікрометрів за оптимальних умов. Водночас характерною особливістю процесу є формування відносно тонких антифрикційних шарів із стабілізованою мікрогеометрією поверхні.

Встановлено, що на рівномірність і стабільність нанесення покриття істотно впливають як технологічні, так і конструктивні параметри. До технологічних факторів належать швидкість обертання інструменту, швидкість переміщення деталі, величина натягу та тривалість обробки. До конструктивних — геометричні характеристики інструменту, зокрема довжина і діаметр ворсу, а також радіус окремих робочих елементів. На основі аналізу експериментальних і теоретичних даних можна зробити висновок, що застосування методу фрикційного плакування є доцільним для підвищення зносостійкості деталей, які працюють в умовах інтенсивного тертя. Це дозволяє суттєво збільшити ресурс таких елементів, зокрема зубчастих рейок кермового механізму.

2.4 Математичне моделювання параметрів зони контакту процесу

Метод плакування гнучким інструментом можна розглядати як комбінований технологічний процес. На початковій стадії реалізується інтенсивне поверхневе пластичне деформування внаслідок ударної дії ворсинок інструменту, після чого відбувається перенесення матеріалу та формування покриття. Для визначення

товщини зміцненого шару необхідно враховувати силу ударної взаємодії, характеристики пружно-пластичної деформації, а також кількість контактів інструменту з поверхнею за одиницю часу.

Оскільки ворсинки гнучкого інструменту розташовані нерівномірно, а їх взаємодія з поверхнею має випадковий характер, процес формування покриття доцільно описувати з використанням імовірнісного підходу. Розподіл відбитків по поверхні можна розглядати як випадковий процес, у якому кількість контактів на певній ділянці визначається статистичними закономірностями. Такий підхід дозволяє адекватно описати реальні умови обробки та врахувати нерівномірність впливу інструменту.

У процесі моделювання необхідно розрізняти дві характерні ділянки взаємодії: зону ударного контакту при вході ворсинки в поверхню та зону ковзання, яка виникає під час її виходу з контакту. Обидві стадії відіграють важливу роль у формуванні структури поверхневого шару та визначають кінцеві характеристики покриття.

$$\eta_{ф} = \frac{n_{в} \cdot d_B^2}{8 \cdot B \cdot R_{щ}}, \qquad (7)$$

Де $n_в$ - загальна кількість тяганини на периферійній поверхні щітки;
$d_В$ - Діаметр, мм; $R_{Щ}$ - Радіус щітки, мм; В - Ширина щітки, мм

Для того, щоб правильно оцінити можливість застосування методики плакування зубів рульової рейки, необхідно промоделювати сам процес у 3D-просторі та провести оцінку.

Кінематика процесу обробки дротяним інструментом зубів рульової рейки, зображена на рисунках 12, 13 та 14.

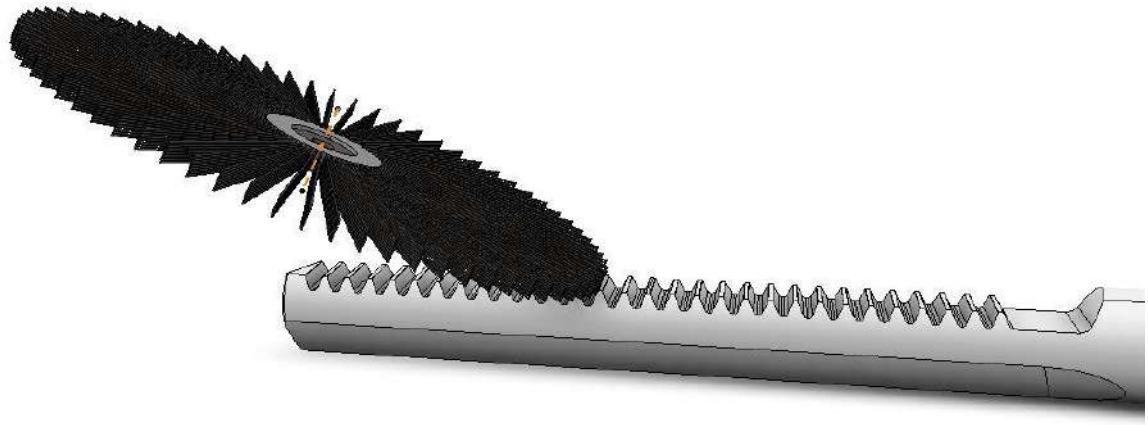


Рисунок 12 – Обробка гнучким інструментом ізометрії

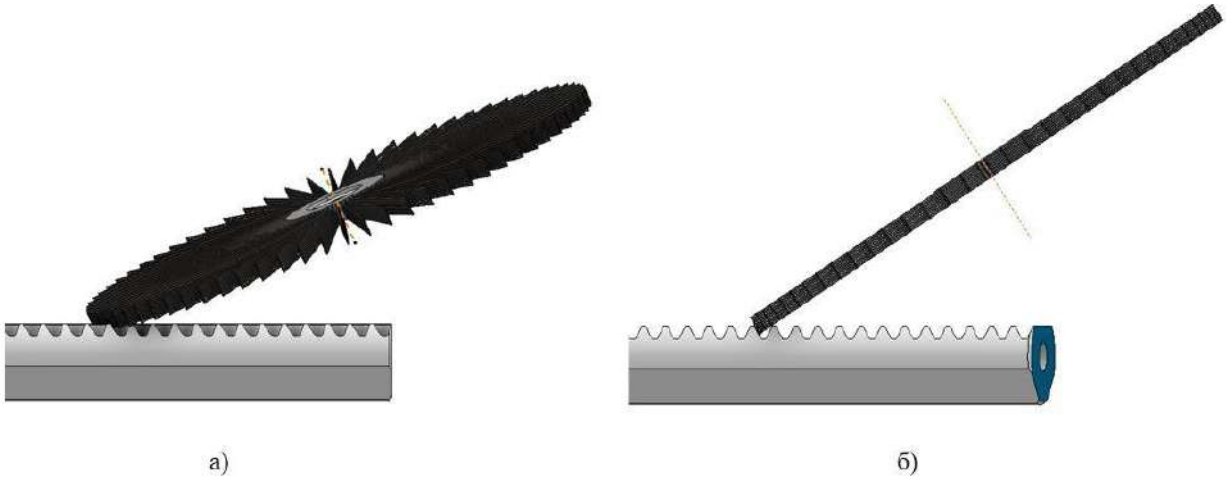
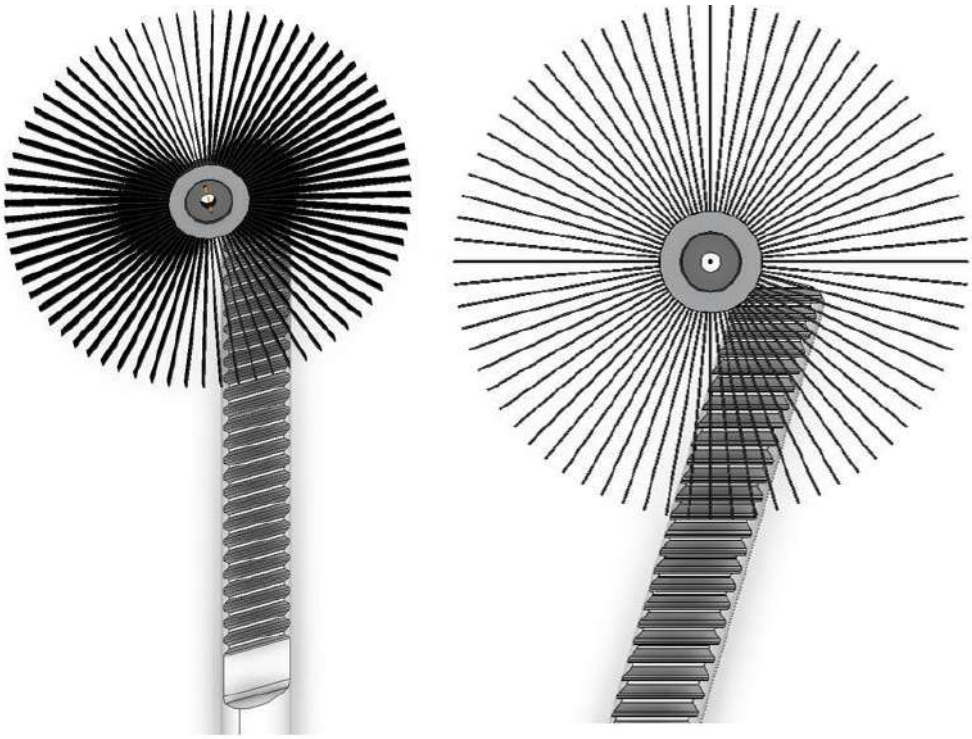


Рисунок 13 – Обробка рульової рейки гнучким інструментом: а – вид збоку; б – вид нормаллю до периферії інструменту



а) б)

Рисунок 14 – Обробка рульової рейки гнучким інструментом: а – вид зверху; б – вид нормаллю до інструменту

Тоді, «поверхнева щільність розподілу відбитків, що сформувалися від впливу ворсу на поверхні деталі, є прямо пропорційним показнику окружної швидкості обертання інструменту V, коефіцієнта $\eta_ф$, а також обернено пропорційним квадрату діаметра ворсу d_V та швидкості переміщення V_S оброблюваної поверхні щодо гнучкого інструменту [16]:

$$\lambda_s = \frac{4 \cdot V \cdot \eta_ф}{\pi \cdot d_B^2 \cdot V_s}. \quad (8)$$

Щоб оцінити рівень якості обробки щітками, слід визначити закономірність розподілу відбитків на поверхні, що обробляється. Проводити оцінку даного

фактора слід на підставі ступеня покриття поверхні та показника її площі, яка покрита відбитками одноразово, дворазово тощо. P(a) і покритої відбитками площі певну кількість разів P(a)*:

$$P(a) = 1 - \sum_{k=0}^{n^*-1} \frac{a_{\text{отп}}^k}{k!} e^{-a_{\text{отп}}} ; \quad (9)$$

$$P(a)^* = \frac{a_{\text{отп}}^n}{n^*!} e^{-a_{\text{отп}}},$$

$$\alpha_{\text{отп}} = \pi \cdot (r_{\text{отп}})^2 \cdot \lambda_s$$

Де $a_{\text{отп}}$ середньоймовірне (математичне очікування) число ударів ворсинки в площу.

Було доведено, що «у ході завдання удару тягарем формується відбиток еліпсоїдної форми. Однак при цьому найбільша ширина аналогічна до найбільшої глибини. Відповідно, з необхідною для математичних розрахунків точністю, можна спростити проекцію відбитка на поверхню обробки до кола радіусarвідп, Що становить половину максимальної ширини відбитка [12], [14].

Щоб спростити процес, вважатимемо, що «показник радіусу відбитка від удару ворсинки дорівнює розміру половини ширини проекції залишкового відбитка на поверхні, що обробляється:

$$b = 2 \cdot k_\phi \sqrt{\frac{d_B^2}{4} - \left(\frac{d_B}{2} - \frac{h}{\sin\gamma}\right)^2}, \quad (10)$$

Де $k_ф = 0,5 – 0,8$ – коефіцієнт форми ударного елемента ворсинки площині, що проходить вздовж її осі нормалі до площині обертання інструменту;

h - Глибина залишкового відбитка, мкм; **γ** – кут входу, під яким ворсинка контактує з деталлю, град [16], [17].

Для розрахунку глибини залишкового відбитка скористаємося відомою формулою:

$$h_{отп} = K \cdot P_y^{n_k} \cdot \sin\gamma\,, \qquad (11)$$

Де K - коефіцієнт, що залежить від властивостей матеріалів ворсинки і деталі;

P_y - сила удару дії ворсинки при контакті з деталлю, Н; n_k=0,67 - коефіцієнт, що залежить від форми ударного елемента в площині обертання інструменту [16].

Також необхідно врахувати, що є розподілом зон пластичної деформації. Щоб встановити показник глибини зміцненого шару, необхідно знати силу удару. Скористаємося формулою Кудрявцева [38], яка є модифікацією формули (2) і набуває наступного вигляду, з урахуванням поправного коефіцієнта та кута атаки:

$$h_s = \frac{1}{1 + 0,07 \cdot R_{пр}} \cdot \sqrt{\frac{P \cdot \sin\gamma}{2 \cdot \sigma_T}}, \qquad (12)$$

Де $\sigma_т$ - умовна межа плинності, Па; $R_{пр}$- поправочний коефіцієнт.

Вважається, що «якщо поверхня оброблюваної деталі повністю покрита слідами від впливу деформуючих тіл, то глибина пластично деформованого шару

практично дорівнює максимальній глибині деформації вогнища від одиничного відбитка [27].

Визначимо ступінь рівномірності глибини наклепаного шару як «відношення глибини пластичної деформації в зоні перекриття деформованих об'ємів h_μ до максимальної глибини наклепу h_S, взятої в площині, нормальної до оброблюваної поверхні і проходить через центри сусідніх відбитків та глибини зони перекриття, виходячи з того, що форма деформованої зони є кульовим сегментом [30]. Випадковий характер розподілу, що зростає з часом числа відбитків тяганини, зумовлює їх появу як на необробленій поверхні, так і на обробленій і характеризується відбитками, що з'явилися, з частковим або повним їх перекриттям один одного:

$$\Psi_s = \frac{h_\mu}{h_s}\ ;\ h_\mu = \sqrt{h_s^2 - \frac{r_m^2}{4}}, \qquad (13)$$

$$r_м = r_s / (2 \cdot a_{отп})^{1/2}$$

r_m - найбільш ймовірна відстань між центрами двох найближчих відбитків.

Зона перекриття деформованих обсягів шару наклеп схематично продемонстровано рисунку 15.

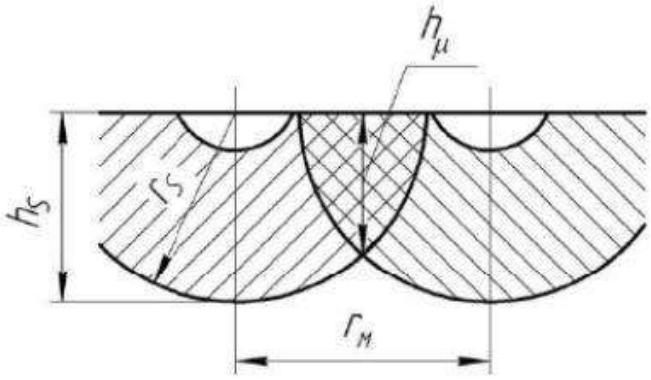


Рисунок 15 – Зона перекриття деформованих обсягів зміцненого шару

Виходячи з цього, можна отримати показник ступеня рівномірності шару, який буде виражений формулою, яка залежить від рівня щільності поверхневого розподілу відбитківλ_sта глибини формування наклеп h_S:

$$\Psi_s = \sqrt{1 - \frac{1}{8 \cdot \pi \cdot h_s^2 \cdot \lambda_s}}. \qquad (14)$$

Удар гнучкого елемента, що завдається поверхнею виробу, слід розглядати як пружний. Він визначається активною стадією обертання ворсинки щітки, наприкінці якої рух зволікання повністю зупиняється. Це означає, що «кінетична енергія ударної маси трансформується на потенційну енергію її деформації. У такому разі сила удару гнучкого елемента, що виникає на кінці зволікання в момент зіткнення з оброблюваною поверхнею, спрямована перпендикулярно до її осі і визначається за формулою:

$$P_{y_i} = g^2 \cdot \frac{V}{R_{щ} \cdot l^2} \cdot \sqrt{m \cdot \left[R_{щ}^3 - \left(R_{щ} - l\right)^3\right] \cdot E \cdot J}, \qquad (15)$$

Де g - коефіцієнт, що враховує динаміку обертання дротяного інструмент;

V - Колова швидкість інструменту, м/с; $R_{щ}$ - Радіус гнучкого інструменту, м; l - довжина гнучкої частини тяганини, м; m - маса тяганини, кг; E - модуль пружності, Па; J- осьовий момент інерції площі поперечного перерізу.

Однак представлені залежності характерні виключно за одного проходу інструменту. Але в ході обробки виробу за допомогою дротяної щітки прохід інструменту може відбуватися багато разів, що було продемонстровано в джерелах, згаданих вище. Щоб взяти до уваги кількість проходів, застосовується формула Бернуллі:

$$P_{k,n} = \frac{n!}{k! \cdot (n-k)!} \cdot p^k \cdot (1-p)^{n-k}, \qquad (16)$$

Де n– кількість проходів інструменту (кількість незалежних випробувань); к - кількість разів повторення такого ж ступеня покриття, як у першому проході при кількох проходах (при настанні події у n випробуваннях); p - Імовірність ступеня покриття хоча б n* разів у першому проході.

Проаналізовано метод фрикційного плакування, його основні принципи, що полягають у одночасному зміцненні поверхневого шару виробу та нанесенні захисного покриття. На базі огляду основних схем обробки виробів була розроблена схема установки для обробки кермової рейки з її конструктивною особливістю, такою як трапецієподібна форма зубів. Зроблено висновок, що косозубе розташування зубів не дозволить застосувати типові методи обробки плакуванням. Схема обробки

зубів рульової рейки передбачає обробку під кутом, але при цьому взаємодія ворсинок з бічною поверхнею зубів здійснюється як із плоскою поверхнею.

Обгрунтування плакування саме бічної поверхні зубів кермової рейки зроблено на основі аналізу умов роботи та розподілу сил, під дією яких відбувається зношування зубів. Аналіз кінематики процесу обробки та

геометричних параметрів взаємодій ворсинок щітки з оброблюваною поверхнею дозволив визначити методику обробки та математичний апарат.

На основі літературного огляду можна впевнено стверджувати про ефективність методики, що було продемонстровано раніше з прикладу розглянутих експериментальних досліджень. Розглянуто основні особливості динамічного поверхневого зміцнення, у яких простежується загальна закономірність щодо параметрів поверхневого шару. Як основні критерії ефективності методики обрані такі технологічні параметри: глибина зміцненого шару; ступінь рівномірності розподілу зон пластичної деформації. Визначено методику оцінки механізму деформаційних процесів при обробці рульової рейки дротяним інструментом, що залежить від технологічних режимів обробки та конструктивних характеристик інструменту.

3 Розрахунково-аналітичне дослідження процесу плакування рульової рейки

Математичне описання процесу фрикційного плакування гнучким інструментом є складною інженерною задачею, що пов’язана з необхідністю врахування великої кількості взаємопов’язаних факторів, таких як випадковий характер ударної взаємодії, нелінійність деформаційних процесів та неоднорідність контактних умов. Водночас сучасні програмні засоби дозволяють суттєво спростити процедуру розрахунку та підвищити точність визначення основних характеристик обробки.

На першому етапі моделювання визначається щільність розподілу відбитків, яка характеризує інтенсивність контактної взаємодії інструмента з поверхнею. Цей параметр є базовим, оскільки саме він визначає ступінь покриття поверхні та впливає на формування структури зміцненого шару. Далі виконується оцінка глибини зміцнення, яка безпосередньо залежить від енергії удару окремих елементів інструмента та фізико-механічних властивостей матеріалу деталі.

Рівномірність зміцненого шару визначається характером розподілу відбитків по поверхні. При більш щільному та рівномірному розподілі контактів забезпечується стабільний розподіл пластичної деформації за глибиною, що є важливим фактором підвищення довговічності деталі. Завершальним етапом аналізу є оцінка зон пластичної деформації, які формуються в результаті багаторазових ударних впливів і визначають кінцеві властивості поверхневого шару.

Для забезпечення достовірності розрахунків необхідно враховувати поправочні коефіцієнти, що відображають вплив матеріалу деталі та параметрів інструмента. Геометрія відбитка після контакту інструмента з поверхнею може бути апроксимована сферичною формою, що дозволяє спростити аналітичний опис процесу. При цьому вводяться коефіцієнти, які враховують відхилення між розрахунковими та експериментальними даними, а також особливості взаємодії інструмента з матеріалом поверхні.

З метою підвищення ефективності інженерних розрахунків було реалізовано математичну модель у середовищах прикладного програмного забезпечення, що дозволяє автоматизувати процес визначення основних параметрів обробки. Використання таких інструментів забезпечує можливість оперативного аналізу впливу технологічних режимів на якість поверхневого шару.

На поточному етапі розрахунків визначаються показники ступеня покриття поверхні зубів рульової рейки, які залежать від інтенсивності ударної взаємодії інструмента з поверхнею. Використання аналітичних залежностей дозволяє оцінити частку обробленої поверхні та встановити закономірності формування покриття. Побудова графічних залежностей забезпечує наочне представлення результатів розрахунків і дозволяє оцінити вплив середньої кількості ударів на ступінь покриття та рівномірність обробки.

Таким чином, застосування математичного моделювання у поєднанні з сучасними програмними засобами дає можливість комплексно оцінити процес плакування гнучким інструментом, оптимізувати технологічні параметри та забезпечити формування поверхневого шару з заданими експлуатаційними властивостями

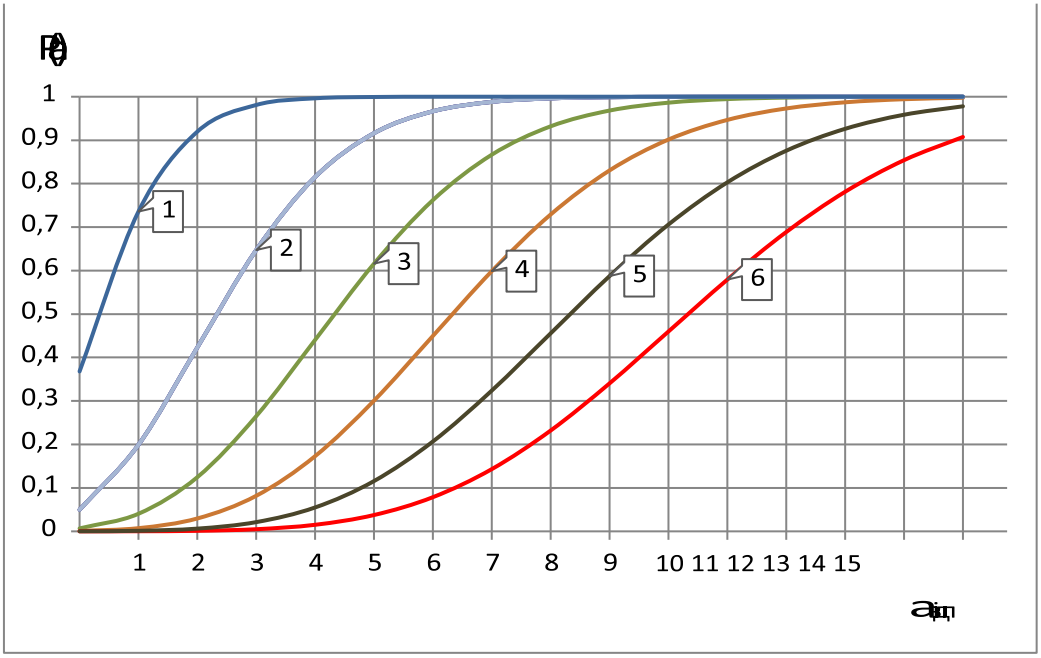


Рисунок 16 – Залежність ступенів покриття P(a) від середньоймовірного числа ударів ворсинки в площу, що дорівнює площі власного відбитка: 1, 2, 3, 4, 5, 6 – ступінь покриття відповідно 1, 2, 3, 4, 5, 6 разів

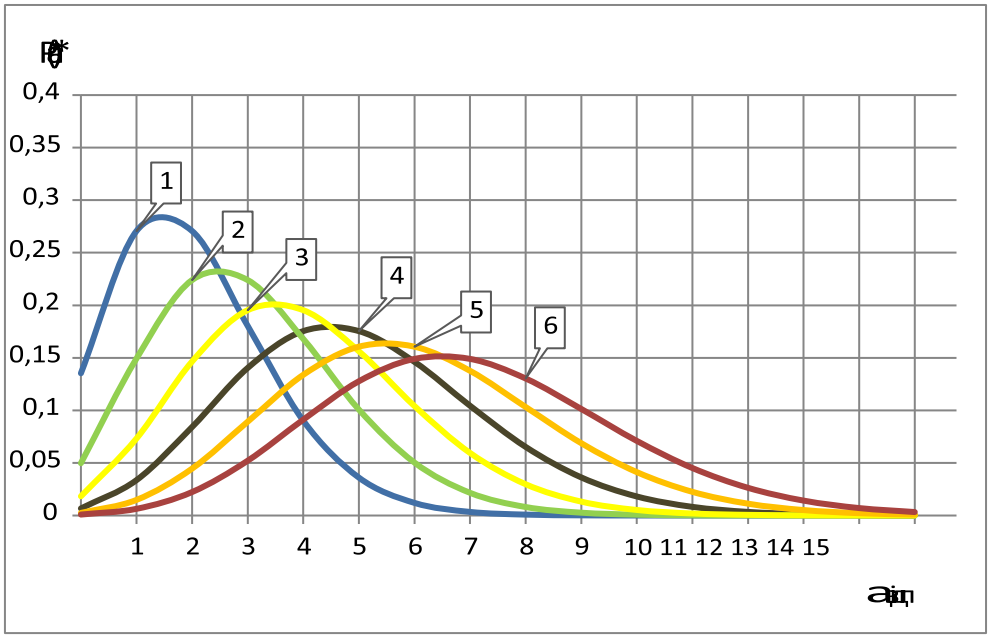


Рисунок 17– Залежність ступенів покриття P(a)* від середньоймовірного числа ударів ворсинки в площу, що дорівнює площі власного відбитка:

1, 2, 3, 4, 5, 6 – ступінь покриття відповідно 1, 2, 3, 4, 5, 6 разів

Після виконання розрахунків отримано такі результати: при контактній силі близько 0,35 Н поверхнева щільність розподілу відбитків становить приблизно 115 мм$^{-2}$ при швидкості переміщення 140 мм/с, коефіцієнті заповнення 0,12 та діаметрі ворсу 0,22 мм. Радіус відбитка при цьому знаходиться на рівні близько 14 мкм, а середньоймовірна кількість ударів складає приблизно 5,2. Рекомендована окружна швидкість обертання щітки знаходиться в межах 30–40 м/с і в процесі обробки повинна залишатися стабільною. За таких умов глибина зміцненого шару при заданому куті атаки становить близько 13 мкм.

Аналіз отриманих графічних залежностей показує, що ступінь покриття поверхні розподіляється таким чином: близько 97 % площі покривається

щонайменше один раз, приблизно 83 % — двічі, 60 % — тричі, а близько 28 % — чотири рази. При цьому частка поверхні, що піддається лише одноразовому впливу, становить близько 6 %, дворазовому — близько 14 %, триразовому — близько 18 %, а чотириразовому — близько 16 %.

З аналізу залежностей випливає, що для досягнення повного покриття поверхні необхідно збільшити середнє значення кількості ударів. При зміні параметрів обробки можна отримати наступні результати: щільність розподілу відбитків зростає до приблизно 260 мм$^{-2}$ при швидкості переміщення 50 мм/с, коефіцієнті заповнення 0,16 та діаметрі ворсу 0,28 мм. За незмінної швидкості обертання інструмента радіус відбитка залишається на рівні близько 13–14 мкм, а середньоймовірна кількість ударів збільшується до приблизно 11–13.

Глибина зміцненого шару визначається з урахуванням динамічного впливу ворсу при сталій межі плинності матеріалу. За умов натягу інструмента близько 2,2 мм, використання ворсу діаметром 0,28 мм, сили удару на рівні 0,55 Н та кута входження ворсинок близько 10–14°, товщина зони пластичної деформації може досягати приблизно 35–45 мкм.

Оцінка рівномірності зміцнення показує, що при багаторазовому перекритті відбитків коефіцієнт рівномірності глибини наклепаного шару наближається до значення 0,97–0,99, що свідчить про достатньо рівномірний розподіл деформації по поверхні.

Таким чином, проведений аналіз підтверджує, що шляхом варіювання геометричних параметрів гнучкого інструменту та технологічних режимів обробки можна цілеспрямовано керувати ступенем покриття, рівномірністю та глибиною зміцненого шару. Отримані результати дозволяють екстраполювати розрахунки для окремого зуба на весь зубчастий сектор рульової рейки. При цьому після завершення обробки бічні поверхні зубів повинні бути рівномірно покриті відбитками, що забезпечує формування стабільного зміцненого шару.

Для більш наочного аналізу взаємозв’язку між параметрами процесу та характеристиками зміцнення доцільно використовувати графічні залежності.

Встановлено, що глибина зміцненого шару визначається насамперед силою удару та кутом входження ворсинок у контакт при незмінних властивостях матеріалу, що підтверджується побудованими залежностями.

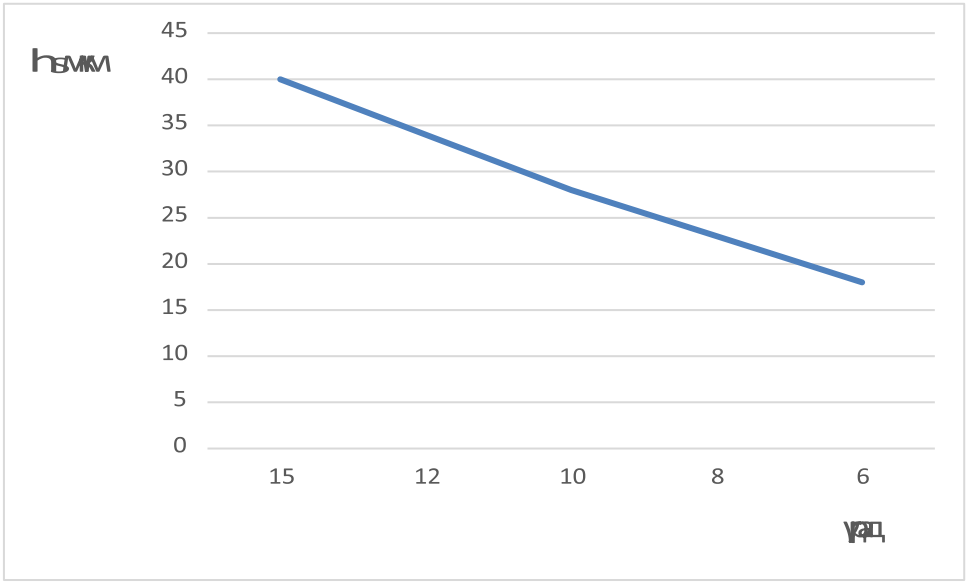


Рисунок 18 – Графік залежності глибини зміцненого шару від кута атаки

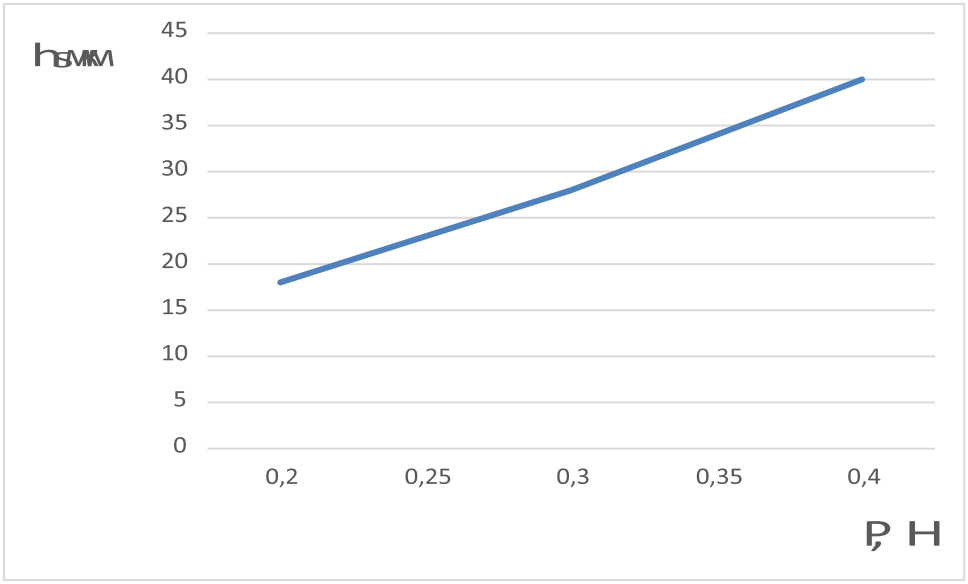


Рисунок 19 – Графік залежності глибини зміцненого шару від сили удару

Малюнки 20 і 21 показують залежність глибини зміцненого шару від радіусу та глибини відбитка, утвореного при ударі ворсу при вході в контакт, оскільки ці параметри також залежать від сили удару. Як видно по графіку, глибина шару, що зміцнюється, зростає зі збільшенням радіуса і глибини відбитка.

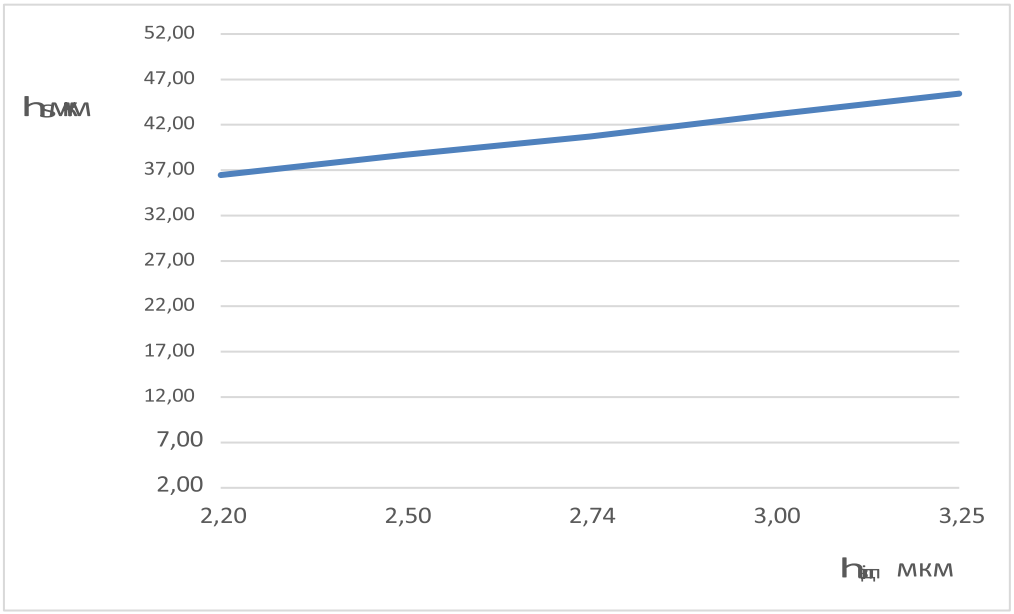


Рисунок 20 – Графік залежності глибини зміцненого шару від глибини відбитка при ударі ворсу

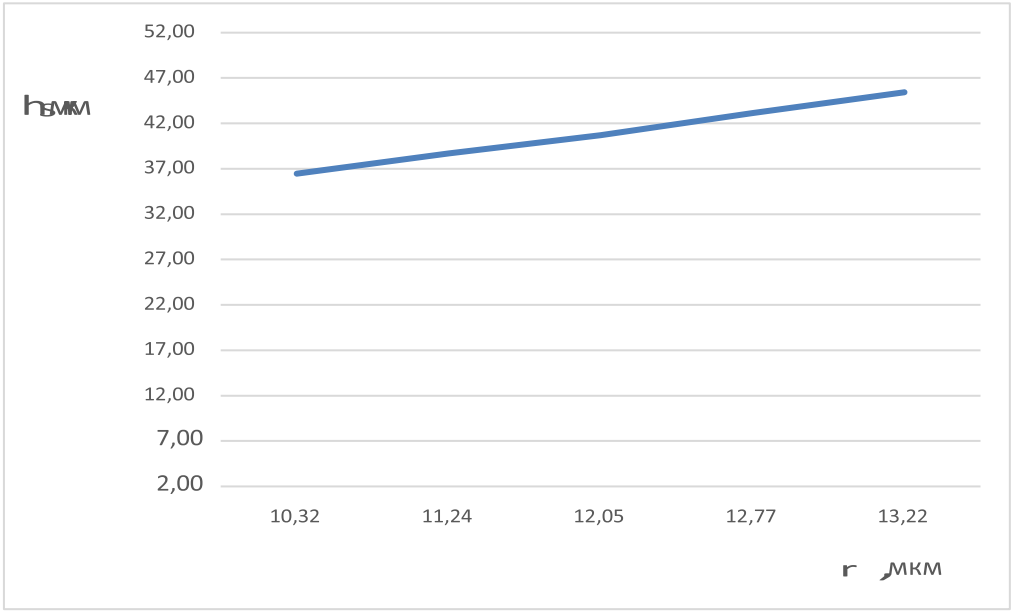
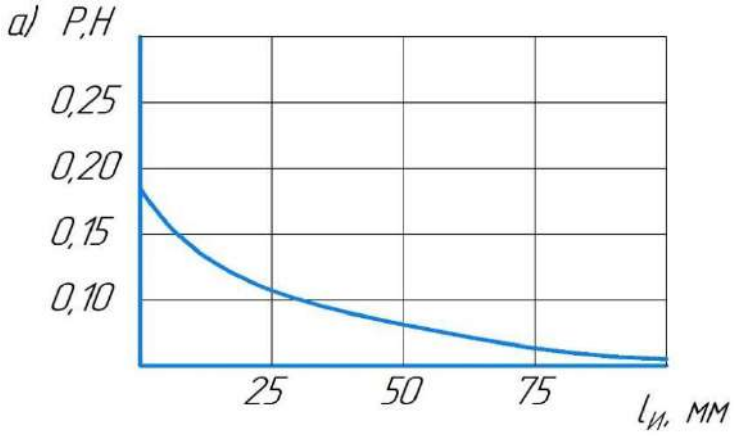


Рисунок 21 – Графік залежності глибини зміцненого шару від радіусу відбитка при ударі ворсу

Таким чином робимо висновок, що ключову роль у забезпеченні прийнятного рівня глибини зміцненого шару під час обробки гнучким інструментом грає саме сила удару. Шляхом зміни однієї лише сили обробки можна впевнено керувати всім процесом і практично впливати на всі техніко-економічні показники процесу. Далі аналізуючи перелічені вище формули бачимо, що показник сили впливу ворсинок щітки можна обчислити, якщо варіювати параметри довжини і діаметра ворсу, натягу і швидкості обертання щітки. Це було також експериментально продемонстровано у підрозділі 2.3. На рисунках 22 та 23 представлені графіки залежності сили удару від перерахованих параметрів, за інших рівних.



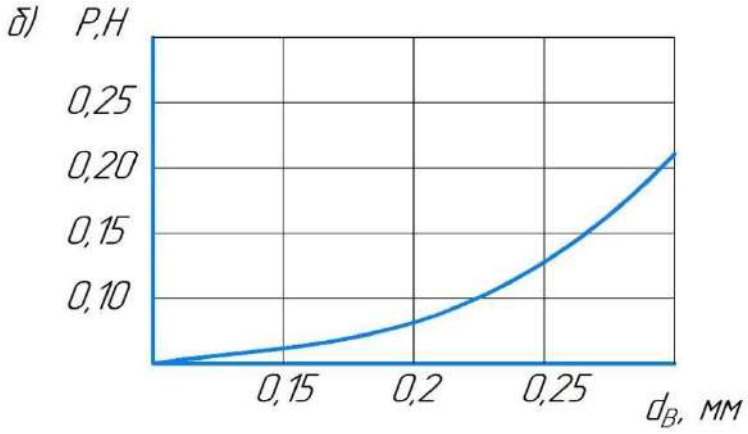


Рисунок 22 – Графіки залежності сили удару від характеристик гнучкого інструменту: а – залежність від довжини ворсу; б – залежність від діаметра ворсу.

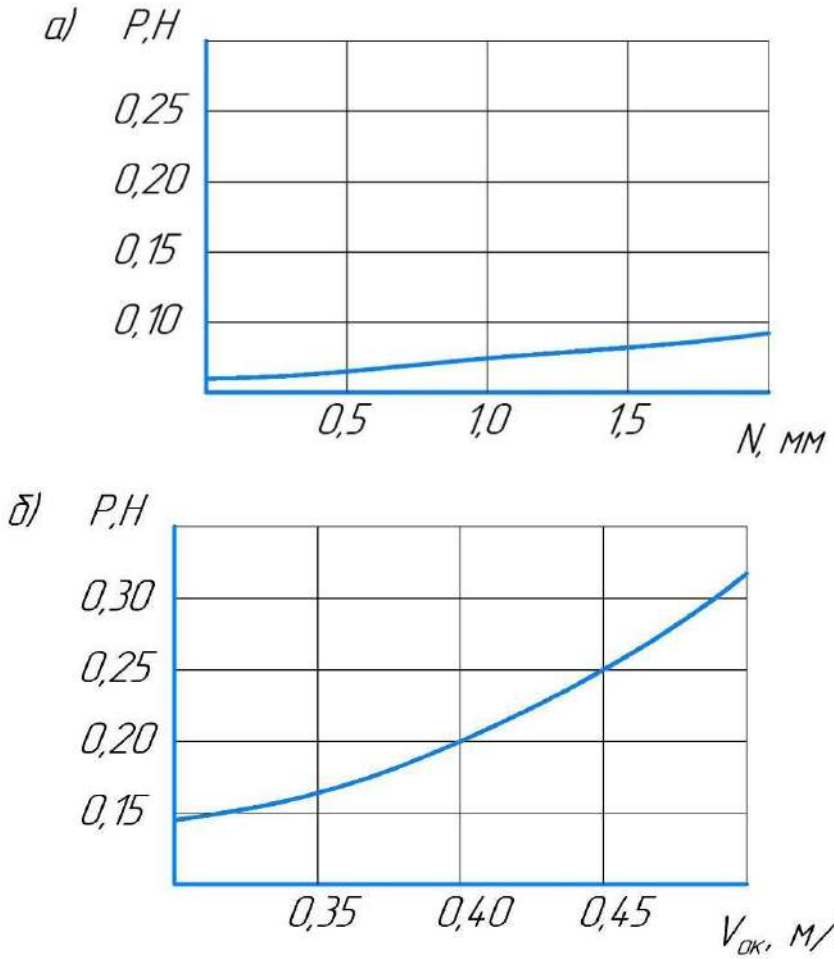


Рисунок 23 – Графіки залежності сили від технологічних параметрів обробки: а – залежність від натягу інструмента; б - залежність від швидкість обертання інструменту.

Було продемонстровано, що глибина пластично деформованого зміцненого шару та зона деформації можуть бути визначені аналітичними формулами, підтвердженими експериментальними дослідженнями. При отриманні повного рівномірного покриття поверхні зуба, що обробляється, відбитками від впливу дротяного інструменту можна говорити про достатню рівномірність зміцненого шару по глибині.

4 Оптимізація процесу плакування рульової рейки

4.1 Методика вибору оптимальних режимів та параметрів обробки гнучким інструментом

Для того щоб визначити доцільні та максимально ефективні технологічні режими плакування рульової рейки, було сформовано спеціальний алгоритм. Його схематична структура продемонстрована рисунку 24.

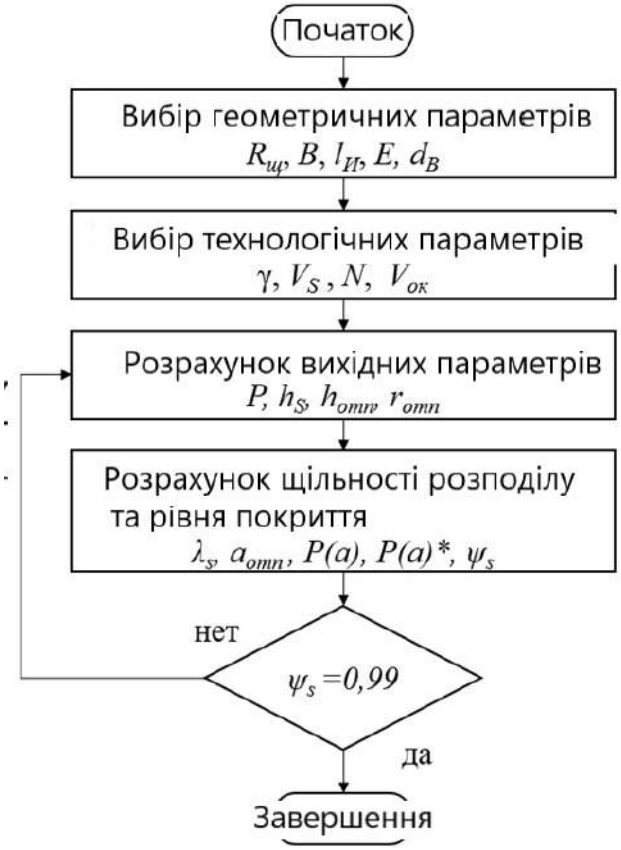


Рисунок 24 – Структурна схема алгоритму розрахунку параметрів обробки рульової рейки

На першому етапі, на основі виконаних розрахунково-аналітичних оцінок, здійснюється обґрунтований вибір конструктивних параметрів гнучкого інструменту дротяного типу. Це включає визначення геометричних характеристик

ворсу, його матеріалу та жорсткісних властивостей, які безпосередньо впливають на ефективність процесу плакування. Після цього виконується підбір технологічних режимів обробки, зокрема швидкості обертання інструменту, величини натягу, швидкості подачі та тривалості обробки.

Заключним етапом є проведення розрахунку та аналізу деформаційних параметрів процесу, що дозволяє оцінити глибину зміцнення, ступінь покриття поверхні та рівномірність розподілу пластичної деформації. Паралельно здійснюється оцінка надійності та довговічності гнучкого інструменту, оскільки його експлуатаційні характеристики істотно впливають на стабільність технологічного процесу. У разі отримання незадовільних результатів виконується коригування вихідних даних і повторне визначення параметрів з метою досягнення оптимальних умов обробки.

Сформований алгоритм розрахунку дозволяє оперативно визначити раціональні технологічні режими плакування гнучким інструментом для формування поверхневого шару з наперед заданими експлуатаційними характеристиками. Це забезпечує підвищення зносостійкості, стабільність якості обробки та ефективність використання виробничих ресурсів.

Водночас слід враховувати, що неправильний вибір режимів обробки може призвести до негативних наслідків. Зокрема, надмірні навантаження здатні спричинити прискорене руйнування ворсу інструменту, тоді як недостатні режими не забезпечують необхідного рівня зміцнення поверхні. Крім того, використання енергетично надлишкових режимів призводить до необґрунтованого збільшення витрат. В умовах циклічного навантаження руйнування ворсу має, як правило, втомний характер, що істотно обмежує ресурс інструменту та підвищує собівартість обробки.

Для забезпечення надійної роботи гнучкого інструменту необхідно виконувати оцінку максимальних напружень, які виникають у його елементах під час деформаційної взаємодії з оброблюваною поверхнею. Такий аналіз доцільно проводити з використанням положень теорії гнучких пружних стрижнів, що дозволяє визначити граничні умови роботи інструменту та запобігти його передчасному руйнуванню.

$$\sigma_{\max i} = \frac{\omega_i}{\beta_i} \cdot P_{\max i} . l \ \frac{d_B}{2J}, \qquad (17)$$

де ω_i- Коефіцієнт моменту подоби; β_i– силовий коефіцієнт подібності;

Pmaxi- максимальна контактна сила, Н; L- Довжина гнучкої частини, мм; $d_в$- Діаметр ворсу, мм; J- момент осьової інерції, мм4..

Щоб правильно вибрати матеріал ворсу, слід брати до уваги показник максимальної напруги, що формується у ворсі, і при цьому раціонально підібрати саму щітку у співвідношенні «ціна – якість – експлуатаційні властивості. Крім цього, можна спробувати внести необхідні зміни в процес обробки, щоб ворсинки щітки передчасно не зношувалися. Оцінка втомної міцності ворсу обчислюється, згідно з наступною умовою:

$$\sigma_{max} \leq [\sigma_в], \qquad (18)$$

де $[\sigma_в]$ – межа витривалості ворсу щітки.

Враховуючи значення діаметра дроту, силу ударної взаємодії ворсу та інші параметри процесу, доцільно застосовувати гнучкий інструмент, виготовлений із пружинного сталевого дроту відповідних класів міцності. Разом з тим використання дроту з недостатнім запасом міцності призводить до інтенсивного втомного руйнування ворсу, що суттєво знижує ресурс інструменту. З цієї причини

застосування матеріалів із низькою втомною стійкістю є економічно недоцільним, оскільки це викликає швидке зношування інструменту та збільшує витрати на обробку.

Процес обробки методом поверхневого деформування реалізується з урахуванням властивостей матеріалу рульової рейки та характеристик покриття, які повинні відповідати умовам експлуатації вузла. При сталих умовах тертя вирішальне значення мають механічні та структурні властивості поверхневого шару. Саме вони визначають рівень зносостійкості та довговічності контактуючих поверхонь. Тому вибір матеріалу покриття є ключовим фактором забезпечення надійності роботи вузла тертя.

Формування покриття може здійснюватися шляхом використання фрикційних матеріалів у вигляді брусків або інших контактних елементів. При цьому в процесі обробки можливе одночасне застосування декількох матеріалів, що дозволяє формувати як однорідні, так і композиційні покриття з заданими властивостями. Властивості сформованого шару визначаються як фізико-механічними характеристиками матеріалу, так і технологічними режимами його нанесення.

Вибір параметрів поверхневого шару обумовлюється техніко-економічними вимогами, умовами роботи вузла тертя, конструктивними обмеженнями, а також сумісністю з мастильними матеріалами. Важливим є забезпечення стабільного коефіцієнта тертя в умовах експлуатації. При цьому вирішальне значення мають товщина захисного шару та рівномірність його розподілу по оброблюваній поверхні.

Для вузлів, що працюють у середовищі мастила, широке застосування знаходять матеріали на основі міді. При нанесенні мідних покриттів коефіцієнт тертя в контакті інструмента з деталлю зазвичай знаходиться в межах 0,55–0,70. Водночас при підвищених температурах матеріали на основі міді та її сплавів можуть проявляти схильність до схоплювання з оброблюваною поверхнею, що супроводжується відривом частинок матеріалу. У зв’язку з цим використання таких

покриттів доцільне лише за умов, коли температура в зоні тертя не перевищує приблизно 280–320 °C.

Для обробки елементів рульового механізму доцільно застосовувати мідно-цинкові сплави, зокрема латуні. Типовий склад такого матеріалу включає близько 60–68 % міді, 30–38 % цинку та незначну кількість домішок до 1 %. Латунні покриття характеризуються підвищеною корозійною стійкістю, задовільними механічними властивостями та кращою зносостійкістю порівняно з чистою міддю, хоча поступаються їй за показниками теплопровідності та електропровідності.

Отже, для фрикційних пар, що працюють у середовищі рідинного мастила, доцільно використовувати матеріали на основі мідних сплавів, які забезпечують сприятливі умови тертя та підвищену довговічність деталей.

Важливу роль у реалізації процесу обробки відіграє допоміжне технологічне оснащення. Його основне призначення полягає у забезпеченні надійної фіксації деталі в оптимальному положенні та створенні умов для її переміщення під час нанесення покриття. Для цього можуть використовуватися як універсальні, так і спеціалізовані пристрої: маніпулятори, призматичні опори, обертачі, затискні механізми, роликові стенди та інші засоби.

Вибір конкретного обладнання визначається технічними можливостями підприємства. При використанні ручного інструменту, наприклад кутових шліфувальних машин із металевими щітками, можна реалізувати процес плакування, однак при цьому складно забезпечити стабільність технологічних параметрів. Стандартні установки плакування зазвичай орієнтовані на обробку плоских або циліндричних поверхонь і не завжди дозволяють ефективно працювати з поверхнями складної геометрії, зокрема під кутом.

У зв’язку з цим для обробки зубчастих поверхонь рульової рейки, що мають специфічний профіль, доцільно використовувати спеціально розроблене оснащення. З метою уніфікації технології та зниження витрат рекомендовано застосовувати поширене металообробне обладнання, таке як вертикально-фрезерні,

радіально-свердлильні або універсально-шліфувальні верстати, які дозволяють реалізувати обробку під необхідними кутами та забезпечити стабільність процесу.

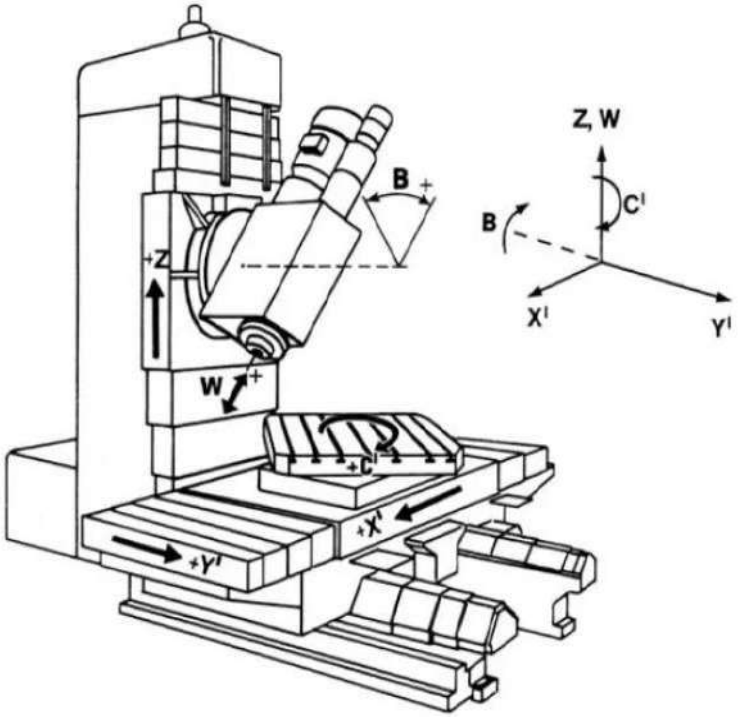


Рисунок 25 – Фрезерний верстат з можливістю кутової обробки

Необхідний кут обробки кермової рейки показаний рисунку 26.

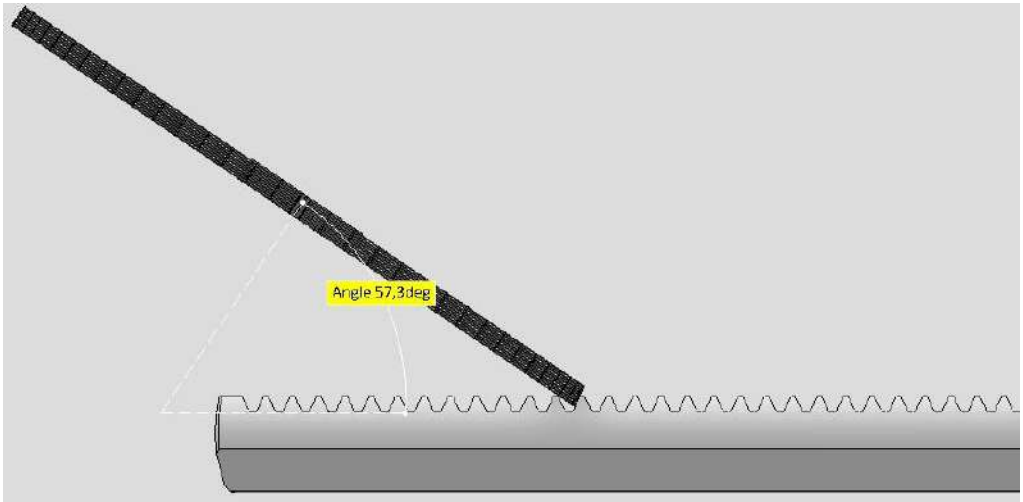
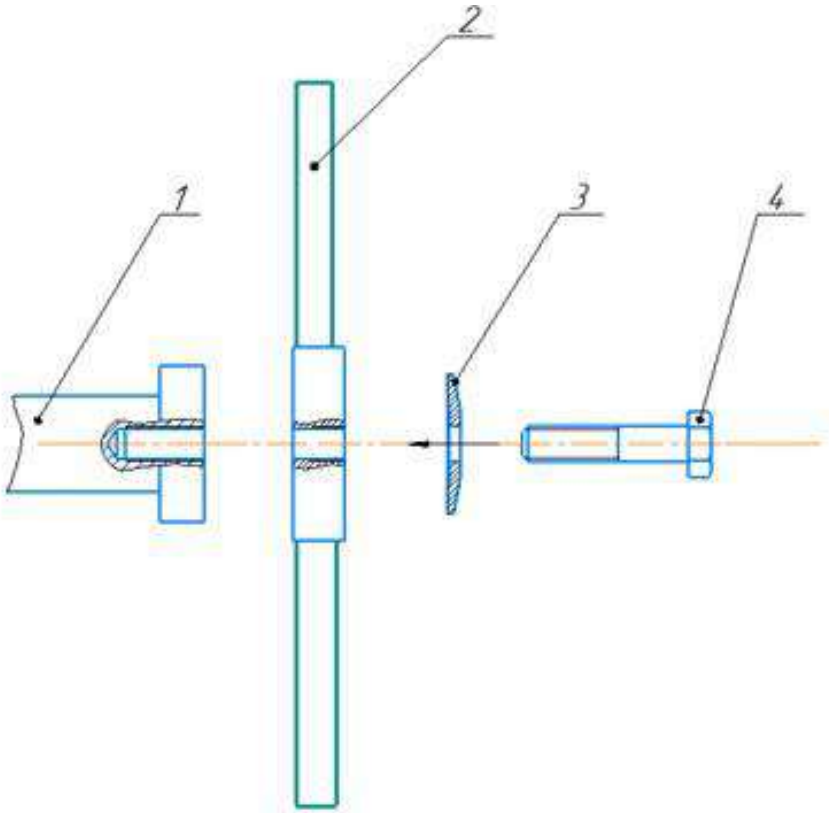


Рисунок 26 – Кут обробки зубів на прикладі кермової рейки

При обробці рульова рейка встановлюється на столі так, щоб бічна поверхня зубів була перпендикулярна до гнучкого інструменту, а вісь шпинделя була розташована відповідно перпендикулярно оброблюваної поверхні. Рейка кріпиться у жорсткому оснащенні. Необхідний кут обробки косозубого розташування зубів забезпечується або поворотом столу, або поворотом оснастки, що фіксує. Переміщення рейки щодо інструменту здійснюється по станині за технічної можливості шпинделя верстата. Коли є гнучкий інструмент з матеріалу покриття, проблема з підведенням ЕМП буде вирішена за рахунок отримання покриття з ворсинок щітки, проте, як уже зазначалося у таких щіток є ряд недоліків. Тому при такій обробці виникає питання про використання змінних металевих щіток. Це забезпечить проходження перспективних тенденцій щодо стандартизації та уніфікації методики процесів обробки в сучасному машинобудуванні.

Для здійснення процесу розроблено спеціальне оснащення, ескіз якого представлений на рисунку 27.



1 - спецпристосування; 2 – гнучкий інструмент; 3 – шайба; 4 – кріпильний елемент.

Рисунок 27 – Ескіз оснастки для змінної щітки

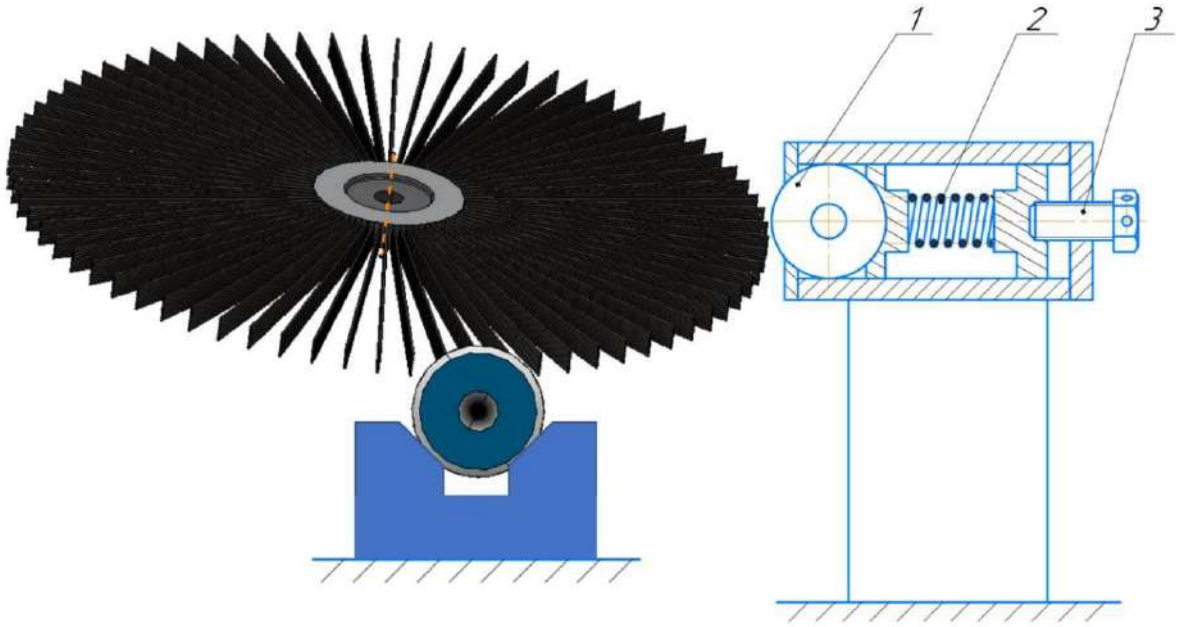
Тут металева щітка 2 кріпиться гвинтовим з'єднанням. Кріпильний елемент 4 може виконуватися двома способами: з'єднання «шпилькагайка або затяжним болтом. З метою збільшення зони контакту з'єднання, запобігання зсуву елементів і надійної фіксації вводиться додаткова шайба 3, індивідуально підбирається під металеву щітку певного діаметру. Оснащення 1 закріплюється в цанговий патрон і встановлюється в шпиндель верстата.

Завдяки цьому оснащенню можна не лише вплинути на економічну складову питання плакування, але й забезпечити можливість використовувати методику на найпоширенішому обладнанні.

Зазначимо, що у випадку з ворсинками-покриттями проблем з методикою не виникне, але через це можуть виникнути складності дотримання технологічних параметрів обробки через інтенсивне зношування ворсинок,

що спричинить погана якість обробки. Слід опрацювати конструкцію спецпристосування, яка вирішить проблему подачі ЕМП за запропонованою методикою обробки під кутом.

Проблема подачі ЕМП до периферії робочого інструменту було вирішено розробкою спеціальної оснастки, поданої рисунку 28.



1 – ЕМП; 2 – пружина; 3 – регулювальний болт.

Рисунок 28 – Ескіз оснастки підведення ЕМП

Спецоснащення спроектовано на основі патенту RU 2197562 C1. Сам пристрій за патентом неможливо використовувати, оскільки він орієнтований на обробку циліндричних виробів. Конструкція спецоснащення не являє собою пристрій плакування з необхідним джерелом живлення і редуктором, а має вигляд пристосування, що підводить до інструменту. Тут ЕМП, у вигляді бруска 1,

притиснутий з зусиллям пружиною 2, що працює на розтяг і зафіксований під дією сил тертя. Притиск забезпечується регулювальним болтом 3.

Таким чином, розглянувши всі підготовчі операції ПГІ та описавши особливості підбору технічного обладнання, можна приступати до складання технологічного процесу обробки рульової рейки методом фрикційного плакування.

4.2 Технологічний маршрут обробки бічної поверхні зуба рульової рейки

Технологічні процеси проектуються згідно з нормами прийнятих стандартів. При цьому слід враховувати різні додаткові матеріали, коментарі та обмеження, що додаються до керівної технічної документації, що міститься у стандартах підприємств. При проектуванні технологічного процесу ПГІ інтегральних кермових механізмів необхідно врахувати такі особливості:

- наявність інформації про можливі несправності та передбачувану програму відновлення цих деталей. Варто враховувати різні дефекти деталей у кермовому інтегральному механізмі, а також їхній вплив на показники працездатності рейки;
- у ході розробки технологічного процесу слід брати до уваги потенціал ремонтних організацій, а також їхній рівень матеріального та технічного оснащення;
- в залежності від виробника кермової рейки конструкція кермового механізму може відрізнятися, що спричинить деякі незначні зміни в технологічному процесі;
- в залежності від типу та моделі верстата обробка може мати деяку специфіку, таку як реалізація поздовжньої подачі інструменту щодо кермової рейки, що може здійснюватися або переміщенням столу або переміщенням шпинделя.

Маршрут технологічного процесу плакування гнучким інструментом зубчастого сектора рульових рейок від моменту аналізу до перевірки працездатності представлений у таблиці 3.

Таблиця 3 – Технологічний маршрут плакування рульової рейки

Номер операції	Найменування операції	Опис операції
005	Слюсарна	Розібрати інтегральний кермовий механізм згідно з інструкціями виробника.
010	Мийна	Промити деталі кермового механізму ГУР у мийній ванні з очисним розчином. Промити рульову рейку у мийній ванні з очисним розчином або хімічним способом відповідно до ГОСТ 9.047.
015	Дефектувальна	Оцінити технічний стан кермової рейки відповідно до вимог. Якщо спостерігаються сколи, злами, явне зношування на зубчастому секторі, подальші заходи щодо відновлення не рекомендовані – рейка підлягає утилізації. При задовільному стані кермової рейки застосувати метод ПГІ.
020	Підготовча	Підготувати гнучкий інструмент для обробки. Підготувати елемент покриття для обробки. Підготувати обладнання та оснащення до обробки. Підготовку виконувати відповідно до рекомендацій, викладених у підрозділі 4.1.
025	Плакування гнучким інструментом	Встановити кермову рейку за запропонованою схемою. Нанести на робочі поверхні зубчастого сектора покриття за технологічними рекомендаціями, описаними у розділі 3.
030	Контрольна	Перевірити якість поверхневого шару.
035	Слюсарна	Зібрати кермовий механізм ГУР.
040	Контрольна	Перевірити працездатність рульового механізм на стенді. Перевірити люфт кермового колеса.

Процес формування покриттів здійснюється в такий спосіб. Гнучкий інструмент у вигляді циліндричної щітки встановлюється на оправлення і закріплюється елементом кріплення.

Висновок

Проведено літературний огляд з метою з'ясування причин несправностей кермової рейки та методів їх усунення. Так як заходи щодо відновлення зубів рульової рейки обмежуються одним методом, то це дослідження є актуальним.

Аналіз кінематики обробки гнучким інструментом зубів кермової рейки показав, що подібна обробка можлива. При цьому процес плакування відбувається під кутом – обробляється плоска поверхня трапецоїдних зубів.

На основі математичної моделі та аналітичного розрахунку геометричних та технологічних параметрів процесу обробки було розроблено технологічний маршрут плакування бічної поверхні зуба рульової рейки.

Розроблено методику уніфікації процесу плакування рульової рейки, яка дозволить провести технологічний процес на широкому спектрі обладнання. Це було забезпечено завдяки розробці двох спеціальних пристроїв, які дозволять вирішити питання ефективності використання гнучких змінних інструментів і підведення елементів матеріалу покриття до робочої периферійної поверхні щітки.

Маршрут докладно описаний та розглянутий на прикладі рульової рейки. Поставлені завдання бакалаврської роботи для досягнення мети підвищення експлуатаційної довговічності рульової рейки методом фрикційного плакування виконані.

Список використаних джерел

1. ДСТУ 2322-93 Автомобілі легкові відремонтовані. Загальні технічні умови [Електронний ресурс]. – Режим доступу: Budstandart.
2. Дубовий Ю. Б. Модернізація технічного обслуговування та ремонту рульової рейки автомобіля Nissan Qashqai з дослідженням керованості автомобіля : магістерська робота : спец. 274 / Ю. Б. Дубовий ; наук. кер. О. Л. Ляшук ; ТНТУ ім. І. Пулюя. – Тернопіль, 2025. – 72 с.
3. Мельник В. О. Відновлення валу рульової сошки автомобілів в умовах авторемонтного підприємства : дипломна робота бакалавра : 132 Матеріалознавство / В. О. Мельник ; Хмельниц. нац. ун-т. – Хмельницький, 2024. – 69 с.
4. Колодій М. Б. Удосконалення технологічного процесу ремонту рульового механізму автомобіля Ford Scorpio / М. Б. Колодій, В. В. Дережицький // Матеріали магістерської роботи. – Тернопіль : ТНТУ, 2024.
5. Свистельник Д. В. Проект легкового автомобіля з дослідженням технологічного процесу відновлення вала-шестерні рульового механізму : випускна кваліфікаційна робота : 274 / Д. В. Свистельник ; НУ "Чернігівська політехніка". – Чернігів, 2022. – 192 с.
6. Чабанний В. Я. Ремонт автомобілів : навч. посібник / В. Я. Чабанний, С. О. Магопець та ін. – Кіровоград : Центр.-Укр. вид-во, 2007. – 348 с.
7. Відновлення деталей автомобілів : навч. посібник / за ред. В. І. Кальченка ; Чернігів. держ. технол. ун-т. – Чернігів, 2011.
8. Любар І. В. Підвищення довговічності трибоспряжень рульового керування малотонажного вантажного автомобіля : магістерська робота / І. В. Любар ; ДДАЕУ. – Дніпро, 2023.
9. Кисликов В. Ф. Будова й експлуатація автомобілів : підручник / В. Ф. Кисликов, В. В. Лущик. – К. : Либідь, 2005.

10. Удосконалення системи рульового керування транспортного засобу [Електронний ресурс] // Репозитарій ХНАДУ. – Режим доступу: DSpace KHADI.
11. Harrer M. Steering Handbook / M. Harrer, P. Pfeffer. – Springer International Publishing, 2016. – 565 p.
12. Knowles D. Automotive suspension and steering systems : Shop manual / D.
13. Ellinger H. E. Automotive Suspension and Steering: Theory and Service / H. E. Ellinger, R. B. Hathaway. – Prentice Hall, 2002.
14. A Review of the Steering Column: Corrosion, Wear, and Mechanical Damage / A. K. Singh et al. // Journal of Failure Analysis and Prevention. – 2025.
15. Durability Testing of a Polymer Worm Gear Used in a Vehicle Electric Power Steering System / M. S. et al. // Materials. – 2025. – No 18(18).
16. Lizarte – The European Remanufacturing Council : Study on remanufacturing of steering racks and pumps [Електронний ресурс]. – Режим доступу: European Reman Council.
17. Modelling and simulation of rack-pinion steering systems with manufacturing errors for performance prediction / F. C. et al. // ResearchGate. – 2019.
18. Improving the Durability of the Power Steering System of a Truck // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – Springer, 2025.
19. Automotive parts remanufacturing models: Consequences for ELV / G. M. et al. // Journal of Cleaner Production. – 2023.
20. Birch T. Automotive Suspension and Steering Systems / T. Birch. – Delmar Cengage Learning, 1999.