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

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до дипломної роботи бакалавра

Галузь знань – 27 – Транспорт
Спеціальність – 274 Автомобільний транспорт
Рівень вищої освіти – Перший бакалаврський
Освітньо-професійна програма – Автомобільний транспорт

на тему: ***«Покращення працездатності кермової рейки автомобіля методом фрикційного плакування»***

Шифр: ДРАТТАМ 24. 21195.000. ПЗ

Виконав студент 4 курсу, група АТзс-21-2 _____ Василь ВАСІЛЬЄВ

Керівник роботи к.т.н., доц. _____ Олег МАКОВКІН

До захисту допускаю:
Зав. кафедри ТАМ _____ Олександр ДИХА
6 06 2024 р.

Хмельницький, 2024 р.

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет *інженерії, транспорту та архітектури*

Кафедра *трибології, автомобілів та матеріалознавства*
Галузь знань *27 – Транспорт*
Спеціальність – *274 Автомобільний транспорт*
Рівень вищої освіти – *Перший бакалаврський*
Освітньо-професійна програма – *Автомобільний транспорт*

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри *ТАМ*
проф., д.т.н. Диха О.В.
20 – 02 *2024* року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Васільєву Василю Васильовичу
Прізвище, ім'я, по батькові

1. Тема проекту (роботи) *«Покращення працездатності кермової рейки автомобіля методом фрикційного плакування»*

керівник проекту (роботи) *Маковкін Олег Миколайович к.т.н., доцент*.
Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом університету від *15 лютого 2024р. № 8 додаток 29*
2. Строк подання студентом проекту на кафедру *10 червня 2024 року*
3. Вихідні дані до проекту (роботи) *Матеріали практики; робочі креслення досліджуваних деталей; нормативно – технологічна документація по розбиранню, дефектації, складанню і регулюванню вузлів паливної систкми; вимоги з охорони праці і безпеки роботи при виконанні ремонтних робіт; техніко – економічні показники роботи підприємства.*

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

1. Аналіз стану питання; 2 Розробка конструкції гальмівного стенда для дослідження працездатності вузлів паливної систкми автомобіля; 3 Технологічний процес; 4 Розрахунок ефективності спроектованої конструкції

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

Графічна частина роботи представлена у вигляді презентації на слайдах

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

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

7. Дата видачі завдання 01.03.2024

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	
1	*Літературний огляд*	*15.05.2024*	
2	*Технологічний розділ*	*25.05. 2024*	
3	*Конструкторський розділ*	*30.05. 2024*	
4	*Оформлення розрахунково–пояснювальної записки*	*2.06. 2024*	
5	*Оформлення презентації бакалаврської роботи*	*5.06. 2024*	
6	*Нормоконтроль магістерської роботи*	*9.06. 2024*	
7	*Підписання розділів. Затвердження дати захисту*	*10.06. 2024*	

Студент Підпис *Василь ВАСІЛЬЄВ*
Ініціали, прізвище

Керівник проекту (роботи) Підпис *Олег МАКОВКІН*
Ініціали, прізвище

РЕФЕРАТ

У рамках випускної кваліфікаційної роботи бакалавра запропонована розробка методики покращення ефективності кермового керування автомобіля за допомогою поверхневого пластичного деформування. Аналіз об'єкта дослідження включав дослідження пристрою кермового керування, вимог до системи кермового управління та аналіз причин несправностей кермових механізмів із підсилювачем керма.

Методика плакування гнучким інструментом була спроектована та досліджена для досягнення оптимальних результатів у покращенні міцності та довговічності великих деталей машин. Розрахунково-аналітичне дослідження процесу плакування рульової рейки дозволило оптимізувати параметри обробки гнучким інструментом.

Результати роботи презентовано у чотирьох розділах.

У першому розділі проведено аналіз об'єкта дослідження,

у другому - описано методику плакування гнучким інструментом,

у третьому - розрахунково-аналітичне дослідження процесу плакування рульової рейки,

у четвертому - оптимізацію процесу плакування рульової рейки.

Випускна кваліфікаційна робота складається з 75 сторінок, і містить у собі 28 ілюстрації, 4 таблиці, 50 джерел, 1 додаток.

Ключові слова: КЕРМОВЕ КЕРУВАННЯ, ПОВЕРХНЕВЕ ПЛАСТИЧНЕ ДЕФОРМУВАННЯ, ПЛАКУВАННЯ ГНУЧКИМ ІНСТРУМЕНТОМ, РУЛЬОВА РЕЙКА, ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ.

ЗМІСТ

	ВСТУП	5
1	АНАЛІЗ ОБ'ЄКТА ДОСЛІДЖЕННЯ	7
1.1	Пристрій кермового керування	7
1.2	Вимоги до системи кермового управління	12
1.3	Аналіз причин несправностей кермових механізмів із підсилювачем керма	15
2	ПЛАКУВАННЯ ГНУЧКИМ ІНСТРУМЕНТОМ	23
2.1	Методика плакування гнучким інструментом	23
2.2	Визначення методики розрахунку параметрів у зоні контакту	29
2.3	Аналіз джерел ефективності методики поверхневого пластичного деформування	33
2.4	Математичне моделювання параметрів зони контакту процесу ПДМ	40
3	РОЗРАХУНКОВО-АНАЛІТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПЛАКУВАННЯ РУЛЬОВОЇ РЕЙКИ	49
4	ПРИСВЯЧЕНО ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ПЛАКУВАННЯ РУЛЬОВОЇ РЕЙКИ.	58
4.1	Методика вибору оптимальних режимів та параметрів обробки гнучким інструментом	58
4.2	Висновок	69
	СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	71
	ДОДАТКИ	75

ВСТУП

З моменту появи перших транспортних засобів і до сьогодні, система кермового управління залишається однією з найважливіших частин автомобіля. Її працездатність є критичною не тільки для безпеки життя та здоров'я водія і пасажирів, але й для всіх учасників дорожнього руху.

Одним з основних факторів, що впливає на надійність і працездатність системи кермового управління, є тертя. Зношування вузлів системи є головною причиною виходу її з робочого стану. Втрата точності взаємного розташування деталей, негерметичність вузлів, непередбачені відносні переміщення та дефекти, які виникають внаслідок зношування, можуть призвести до небезпечних ситуацій на дорозі.

Тому є необхідність у проведенні науково-технічних робіт, спрямованих на підвищення рівня технічного обслуговування автомобілів, що допоможе запобігти можливим несправностям у процесі експлуатації, які можуть призвести до непрацездатності рульового управління. Також важливо аналізувати та впроваджувати сучасні методи і способи зміцнення вузлів кермового механізму, відповідно до вимог безпеки.

Для досягнення цих цілей необхідно вирішити завдання підвищення ефективності методів обробки та зміцнення елементів кермової системи. Це, у свою чергу, сприятиме збільшенню терміну експлуатації автомобільного транспорту.

Дипломна робота присвячена розв'язанню питань, пов'язаних з розробкою методики фрикційного плакування зносостійких покриттів на рульовій рейці з метою підвищення її експлуатаційної довговічності.

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

Для досягнення мети в роботі поставлено і вирішено такі завдання:

1. Проаналізовано механізм кермового управління та його вимоги до безпеки.

2. Визначено основні місця зношування кермової рейки.

3. Розглянуто основні способи зміцнення цієї деталі та зроблено висновок, що зубчастий сектор рейки є найбільш придатним для застосування методу фрикційного плакування.

Аналіз умов роботи деталей рульового механізму показав, що значний відсоток зношування спостерігається на бічних поверхнях зубців рульової рейки. Це зношування призводить до зниження ефективності та надійності кермового управління, що, в свою чергу, може створити небезпеку для учасників дорожнього руху.

Для розв'язання цієї проблеми обґрунтовано застосування методу фрикційного нанесення покриттів з одночасною обробкою пластичним деформуванням за допомогою гнучкого інструменту. Цей метод дозволяє значно підвищити зносостійкість бічних поверхонь зубців рульової рейки, зменшуючи тим самим ризики, пов'язані зі зношуванням деталей кермового механізму.

Проведено літературний огляд теорії та практики застосування фрикційного плакування з використанням гнучкого інструменту, а також його розрахунково-аналітичне обґрунтування. Літературний огляд підтвердив доцільність використання цього методу, показавши його високу ефективність у підвищенні зносостійкості деталей.

Методика фрикційного плакування була оптимізована шляхом розробки спеціальних пристосувань, які замінюють стандартні покупні пристрої та обладнання. Це дозволило підвищити точність і ефективність процесу плакування, а також знизити витрати на його реалізацію.

Також було розроблено технологічний маршрут плакування рульової рейки. Для конкретизації та наочності, дослідження проводилося на прикладі кермової рейки автомобіля lada granta. Це дозволило наочно продемонструвати ефективність розробленої методики та її застосовність до реальних умов експлуатації.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ОБ'ЄКТА ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Пристрій кермового керування

Для вирішення поставлених завдань необхідно, перш за все, проаналізувати систему вузлів та механізмів кермового управління, і зокрема, розглянути кермо як один з найважливіших елементів даної системи. У легкових автомобілях використовується рейковий кермовий механізм, який може бути обладнаний підсилювачем управління електромеханічного, гідравлічного або комбінованого типу.

Останнім часом системи кермового управління з електропідсилювачем складають серйозну конкуренцію системам з гідравлічним підсилювачем. Незважаючи на це, гідравлічні системи поки що залишаються домінуючими на автомобільному ринку завдяки їх більшій допоміжній силі при повороті керма, вищій надійності та нижчій вартості.

Система кермового управління дозволяє водієві, повертаючи кермо, передавати зусилля на кермовий механізм, який перетворює це зусилля для здійснення повороту коліс автомобіля. Це забезпечує водію можливість контролювати напрямок руху транспортного засобу. Якщо навантаження на передню вісь збільшується, то необхідне зусилля для передачі моменту на рульове колесо також зростає.

Існують системи кермового управління як з гідравлічним підсилювачем, так і з електропідсилювачем, які широко використовуються в сучасних транспортних засобах. Вони покращують керованість автомобілем та знижують необхідне вхідне зусилля на кермовому колесі, що, у свою чергу, запобігає підвищеній стомлюваності водія. Система кермового управління представлена на малюнку 1.

Доповнення та розширення цього розділу може включати більш детальний опис кожного компонента системи кермового управління, його

функцій та взаємодії з іншими елементами. Також можна додати інформацію про новітні технології в галузі кермового управління, такі як адаптивні системи кермування, які автоматично змінюють характеристику підсилювача в залежності від швидкості руху та умов дороги.

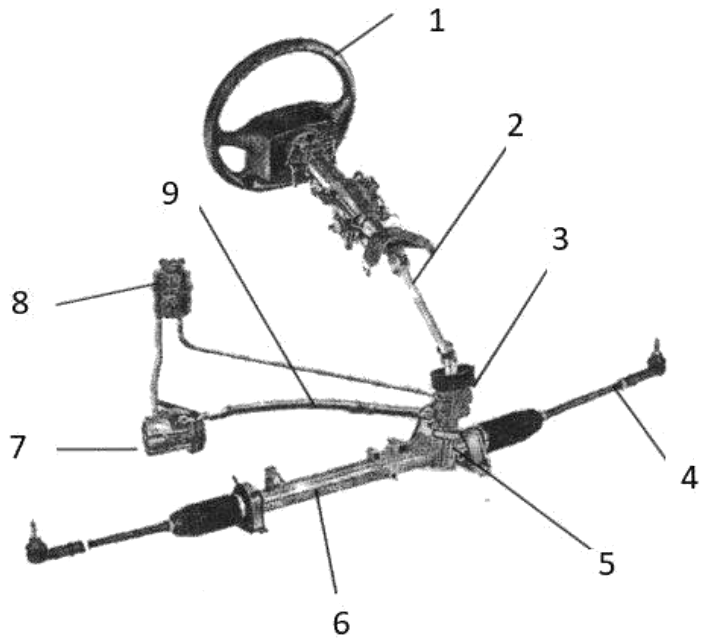

Рисунок 1 – Пристрій кермового керування

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.

Особливість пристрою кермового управління сучасних автомобілів. Кермове управління сучасних автомобілів має унікальну особливість: рульова рейка та електропідсилювач або гідропідсилювач об'єднані в інтегральну систему. У обох типах систем використовується рейковий механізм, який передає зусилля від кермового валу до поворотних тяг. Електричний підсилювач розташовується на кермовому валу автомобіля, елементи якого з'єднані між собою торсіонним валом. Датчик, встановлений на цьому валу, фіксує значення крутного моменту.

При обертанні рульового колеса водієм торсіонний вал скручується, і цей процес фіксується датчиком моменту, що крутить. На основі інформації, переданої датчиками моменту, швидкості та обороту колінчастого валу, електронний блок розраховує необхідне зусилля для компенсації та передає сигнал на електричний двигун. Алгоритм роботи та рівень допоміжної сили залежать від кута повороту та швидкості автомобіля.

Хоча електронна архітектура електропідсилювача важлива, у даному контексті варто зосередитися на механічній передачі, оскільки вона відіграє ключову роль у поставленій меті. Будь-яка несправність електроніки такого підсилювача зазвичай веде до заміни всієї рульової рейки.

Механічна рульова рейка має як переваги, так і недоліки. З одного боку, її конструкція є максимально простою. З іншого боку, рульова рейка може зношуватися до критичного стану без видимих ознак несправностей.

Компоненти типового кермового управління з гідравлічним підсилювачем поділяються на механічні та гідравлічні. Механічні компоненти включають кермо, рульову колонку, кермовий механізм, рейкову передачу та рульові тяги до передніх коліс. До гідравлічних компонентів належать насос рульового управління, бачок, шланги високого та низького тиску, поворотний золотниковий клапан (розподільник), штуцер, що підводить, і силовий циліндр.

Функція кермового механізму полягає у передачі обертального руху керма на поступальний рух елементів кермового приводу. Рейковий механізм є одним з найпопулярніших типів кермових механізмів і може бути встановлений на широкий спектр транспортних засобів. Це дослідження зосереджено на гідравлічній системі рульового управління, оснащеній рейковою передачею.

Серед переваг рейкового механізму можна відзначити простоту конструкції, надійність, високий ККД та жорсткість. Однак такий механізм є дуже чутливим до нерівностей на дорозі, що призводить до биття у зачепленні рейкової передачі та швидкого зношування. На малюнку 2 представлена схема системи кермового управління з рейковою передачею. Шестерня, встановлена на рульовому валу, знаходиться у постійному зачепленні з рейкою. Для продовження терміну служби цих деталей вони повинні перебувати в середовищі мастила. Проте, рано чи пізно, під дією навантажень настає момент, коли необхідний ремонт рейкового механізму.

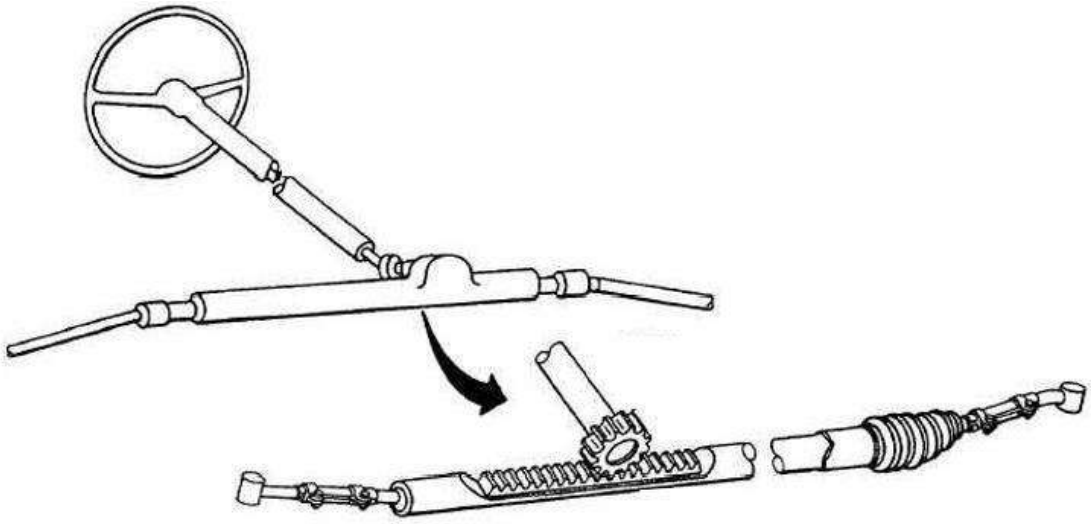

Рисунок 2 – Схема системи рейкової передачі

Гідропідсилювач керма: конструкція та обслуговування. Гідропідсилювач керма є конструктивно складним механізмом, який потребує постійного технічного обслуговування. Деякі компоненти цієї системи дуже чутливі до зношування, тому порушення умов експлуатації може призвести до їх поломки. Завдяки установці розподільника кермовий механізм забезпечує високу надійність. Навіть у разі виходу з ладу одного з елементів гідропідсилювача керма або при його повній чи частковій розгерметизації, автомобіль може продовжувати рух.

Торсіон завжди передаватиме обертання від рульового валу до шестерні, що забезпечує збереження керованості автомобіля. Однак, у такій ситуації зусилля, необхідне для керування кермом, значно зросте. У разі поломки механічної рейкової передачі типу «черв'як – зубчаста рейка», зуби якої перебувають у постійному контакті, може виникнути серйозна аварійна ситуація.

Об'єктом цього дослідження є рульова рейка з гідропідсилювачем керма, яка є найпоширенішою системою в Росії. Подальші проектні та технічні завдання будуть зосереджені на аналізі системи з гідропідсилювачем керма на прикладі кермового механізму lada granta.

На малюнку 3 представлено ескіз рульової рейки, що демонструє її конструкцію та основні компоненти.

Рисунок 3 – Загальний вигляд кермової рейки

Матеріал кермової рейки: Фізико-механічні властивості та хімічний склад. Матеріал деталі визначає її фізико-механічні властивості, такі як витривалість, втомна міцність, зносостійкість та інші характеристики, які є критично важливими для виконання службового призначення. Для виготовлення кермової рейки використовується сталь марки 50, яка є конструкційною, вуглецевою, якісною сталлю. Її фізико-механічні властивості представлені в таблиці 1.

Хімічний склад сталі 50 включає:

- Марганець (Mn): 0,50% - 0,80%
- Вуглець (C): 0,47% - 0,55%
- Кремній (Si): 0,17% - 0,37%
- Інші елементи: трохи більше 0,25%

Цей склад забезпечує сталі оптимальні характеристики для виготовлення деталей, які піддаються значним навантаженням і вимагають високої зносостійкості та міцності. Сталь 50 також забезпечує достатню жорсткість і витривалість, що є важливим для довготривалої експлуатації кермових рейок в автомобільних системах.

Таблиця 1

Фізико-механічні властивості сталі 50

σ0,2, МПа	σв, МПа	ψ, %	δ5, %	KCU, кДЖ/м2	НВ
315	570	55	17	39	167-207

Технічні вимоги для забезпечення безперебійної роботи кермового управління. Далі необхідно розглянути технічні вимоги для забезпечення безперебійної роботи механічної передачі та системи кермового управління в цілому.

1.2 Вимоги до системи кермового управління

Основні вимоги до системи кермового управління викладені в технічному регламенті митного союзу (ТР МС) 018/2011 «Про безпеку колісних транспортних засобів (зі змінами на 11 липня 2016 року)». Цей регламент було прийнято рішенням комісії митної спілки від 9 грудня 2011 року та є чинним нормативним актом щодо безпеки колісних транспортних засобів. Регламент сформовано на основі «Угоди про єдині принципи та правила техрегулювання» який базується на правилах «Європейської економічної комісії Організації Об'єднаних Націй» (ЄЕК ООН).

Цей документ визначає перелік вимог до транспортних засобів, що експлуатуються, незалежно від того, де вони були вироблені або ввезені. Нижче наведено основні пункти цього технічного регламенту.

Відповідно до пункту 2.3, «сумарний люфт у рульовому управлінні не повинен перевищувати граничних значень, встановлених виробником транспортного засобу, а за відсутності зазначених даних – таких граничних значень: транспортні засоби категорії M1 та створені на базі їх агрегатів транспортні засоби категорій M2, N1 та N2, а також транспортні засоби категорій L6 та L7 з автомобільним компонуванням - 10°»

Відповідно до пункту 2.1, «зміна зусилля при повороті кермового колеса має бути плавною у всьому діапазоні кута його повороту. Непрацездатність підсилювача рульового керування транспортного засобу (за його наявності на транспортному засобі) не допускається».

Вимоги до системи кермового управління

Ці вимоги спрямовані на забезпечення високої надійності та безпеки системи кермового управління, що є критично важливим для запобігання аварійним ситуаціям на дорозі. Відповідно до пункту 5.1.2, «має бути забезпечена можливість руху прямою ділянкою дороги без незвичайної корекції кермового управління водієм і без незвичайної вібрації в системі кермового управління при максимальній розрахунковій швидкості транспортного засобу».

Відповідно до пункту 2.5, «застосування у кермовому механізмі та кермовому приводі деталей зі слідами залишкової деформації, з тріщинами та іншими дефектами не допускається» .

Відповідно до пункту 2.6, «підтікання робочої рідини в гідросистемі підсилювача рульового управління не допускається» .

Правила, пов'язані з органами управління рульовим механізмом

Якщо водій безпосередньо впливає на органи управління рульовим механізмом, вони і всі механічні частини рульового механізму повинні бути стійкими до поломок. Вони мають бути достатніх розмірів, легко

доступними для обслуговування і володіти характеристиками безпеки, рівними або вищими за ті, що запропоновані для інших основних компонентів транспортного засобу, таких як гальмівна система. Якщо відмова будь-якої такої деталі може призвести до втрати керування транспортним засобом, ця деталь повинна бути виготовлена з металу або матеріалу з еквівалентними характеристиками і не повинна зазнавати значних деформацій при нормальній роботі системи кермового управління.

Вимоги до інтегральної системи управління із підсилювачем керма. Основні вимоги до інтегральної системи управління із підсилювачем керма викладені у правилах ЄЕК ООН №79-01. Основні пункти цього документа включають:

- Відповідно до пункту 5.1.4, «кермо має бути спроектоване, сконструйоване та встановлене таким чином, щоб воно могло витримувати навантаження, що виникають при нормальній експлуатації транспортного засобу або складу транспортних засобів» .

- Відповідно до пункту 5.7, «конструкції інтегрального та напівінтегрального кермових механізмів повинні забезпечувати можливість регулювання механічного люфта кермового механізму».

Ці вимоги забезпечують безпеку та ефективність роботи системи кермового управління, що є важливим аспектом для надійного функціонування транспортних засобів на дорозі. Відповідно до пункту 5.9 «поворот рульового колеса в інтегральних та напівінтегральних рульових механізмів повинен відбуватися плавно, без заїдань, з одного крайнього положення в інше при вільному валі сошки як при включеній, так і вимкненій подачі рідини. При цьому кути повороту рульового колеса та валу сошки повинні відповідати вимогам КД» [7].

Відповідно з пунктом 5.18 «виріб має бути працездатним та придатним до транспортування та зберігання в умовах, що відповідають умовам роботи транспортного засобу» [7].

Щоб забезпечити вищезгадані вимоги законодавства України, необхідно встановити причини можливого недотримання цих правил. Аналіз та оцінку конструкції рульового управління, так само як і будь-якого іншого механізму, слід проводити відповідно до тих вимог, які до неї пред'являються і з даного аналізу підібрати методи та способи вирішення встановлених проблем зносу механічної передачі.

1.3 Аналіз причин несправностей кермових механізмів із підсилювачем керма

Під час експлуатації автомобіля в кермовому механізмі з гідропідсилювачем керма (ГУР) можуть виникати різноманітні проблеми, такі як заклинювання, зношування вузлів, витік оливи та вібрації, які призводять до несправності автомобіля. Основні ознаки несправності рульової рейки включають шум або інші сторонні звуки під час руху транспортного засобу, помітні люфти рульового колеса навіть при незначних кутах повороту, надмірний опір при повороті керма, а також протікання робочої рідини. Несвоєчасне усунення несправностей у кермовому механізмі або неправильні регулювання можуть прискорити зношування деталей.

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

Розглянемо основні місця несправностей на прикладі рейки lada granta, представленої на малюнку 4.

Додатково до перерахованих проблем, можна виділити наступні типові причини несправностей:

1. Механічне зношування: Постійний контакт між черв'яком і рейкою призводить до зношування робочих поверхонь, особливо за відсутності належного змазування.

2. Гідравлічні проблеми: Витікання робочої рідини через ущільнення або з'єднання може знизити ефективність підсилювача керма, а також спричинити забруднення системи.

3. Заклинювання: Накопичення бруду і сміття в механізмі або недостатнє змазування можуть призвести до заклинювання деталей, що ускладнює поворот керма.

4. Вібрації та шуми: Неправильне налаштування або зношування вузлів можуть спричинити вібрації та сторонні звуки під час керування автомобілем.

5. Люфти: Неправильне налаштування або зношування підшипників і втулок можуть призвести до появи люфтів у рульовому механізмі, що знижує точність керування.

Регулярне технічне обслуговування, своєчасне змазування і належне налаштування всіх компонентів рульової системи можуть значно зменшити ймовірність виникнення цих проблем. Особливу увагу слід приділяти виявленню та усуненню навіть незначних несправностей, щоб запобігти серйозним аваріям і забезпечити безпеку на дорозі.

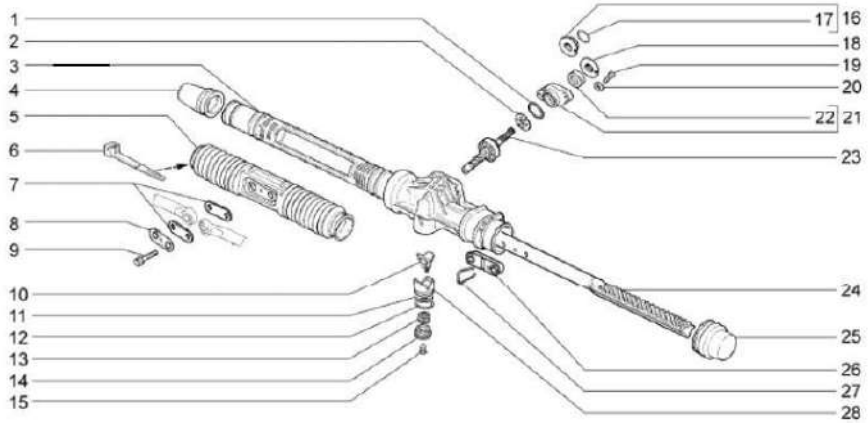

Рисунок 4 – Схема кермового механізму lada granta

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.

По-перше, варто зазначити, що знос гумових ущільнювачів у системі ГУР (гідропідсилювача керма) є поширеною проблемою. Це стосується, насамперед, сальників та ущільнювачів у рульовій рейці, а також з'єднань у інших частинах системи. Під впливом механічних навантажень і з часом, гумові елементи втрачають свої властивості, що призводить до розгерметизації системи та витоку робочої рідини. Внаслідок цього рівень рідини в системі знижується, що негативно впливає на її роботу.

По-друге, поломка клапанів розподільника може серйозно порушити роботу системи ГУР. Неправильне функціонування клапанів призводить до некоректного розподілу рідини, що ускладнює роботу підсилювача і може спричинити подальші несправності.

По-третє, поломка поршневої системи гідравлічного циліндра є ще однією критичною проблемою. Несправність поршневої системи призводить до того, що у системі не створюється необхідний тиск, що робить роботу підсилювача неможливою.

Крім того, однією з основних причин непрацездатності системи з ГУР є зношування елементів рейкового механізму. Розглянемо

детальніше ці несправності, що виникають внаслідок зношування поверхонь деталей розподільника та рульової рейки.

Найбільше навантаження виникає у місці контакту черв'яка з рульовою рейкою. Під час експлуатації в цьому місці може частково або повністю зруйнуватися поверхня зубів через виникнення неприпустимих зазорів як у зубчастому зачепленні, так і між упором та рейкою. Нерівномірне зношування бічних поверхонь зубів зазвичай є причиною збільшеного зазору у зачепленні черв'яка з рейкою, що може виникнути і внаслідок зменшення антифрикційного матеріалу на вкладиші упору рейки.

Регулювальний гвинт забезпечує притиск упору рульової рейки безпосередньо до самої рейки, що в процесі роботи може призвести до двостороннього зношування контактних поверхонь. Для усунення невідповідності крутного моменту і забезпечення правильного розташування регулювальних та фіксуючих деталей рульового механізму проводиться регулювання загального моменту прокручування провідного черв'яка та положення упору рейки з контролем затягування регулювальної гайки. Проте закручування гайки не вирішує проблеми зношування зубчастого сектора. Максимальне закручування гайки може тимчасово усунути постукування і прослизання фрикційної пари, але водночас посилить загальну ситуацію.

Проблему зношування упору рейки можна вирішити лише шляхом заміни вкладиша упору рейки після відпрацювання його ресурсу, оскільки відновлення вкладки неможливе. Якщо втулка також відпрацювала і має ознаки пошкодження, необхідно виправити цю несправність методом заміни втулки із спеціального ремкомплекту, оскільки відновлення втулки також не можливе. Відпрацювання виникає через корозію, що утворюється внаслідок зовнішніх факторів, таких як волога або солоність. Це може призвести до утворення абразиву у внутрішній порожнині сполучення, що в свою чергу призводить до його руйнування. Щодо зносу

сальників, можливе тимчасове вирішення за допомогою підтискних пружин. Проте, оскільки сальник щільно притиснутий до валу, таке рішення може спричинити деформацію вузлів рейки та заДСТУрення ситуації. Таким чином, ущільнювачі, сальники та кільця з дефектами підлягають утилізації та заміні на нові.

Аналізуючи причини та способи усунення несправностей у вузлах рейкового механізму, виникає необхідність у вирішенні проблеми зношування зубчастої рейки в рульовому управлінні. Зношування цієї деталі рульового механізму, як правило, призводить до збільшення люфту у напрямних коліс і кермі, що суперечить зазначеним вище вимогам. Наступним кроком є розгляд основних заходів зміцнення та відновлення зубчастої рейки.

Один з основних методів відновлення зношених поверхонь кермової рейки - нанесення антифрикційного металопокриття. Розглянемо деякі варіанти цієї обробки, зокрема гальванічне хромування, газотермічне та плазмове напилення. Окремо розглянемо метод підвищення довговічності зубчастого сектора за допомогою фрикційного плакування, який є одним із небагатьох на ринку послуг з технічного обслуговування транспортних засобів і потребує подальшого дослідження.

Технологія покриття валу хромом [33] включає декілька етапів. Серед них: шліфування та полірування поверхні, яка буде покрита хромом; створення ізоляції для місць, що потребують хромування (зубчастий сектор); створення екранів для рельєфів та ДСТУрих граней; зачищення абразивним матеріалом; підвішування на рамки; обробка електролітами; промивання у рідині з високою температурою; анодне декапірування; хромування; промивання холодною рідиною; нейтралізація у розчині з лугом. Після цього виріб знімається з рамки, на яку він був закріплений раніше. Останнім етапом є механічна обробка виробу, що вже покритий хромом. Шліфування та полірування на

першому етапі необхідні для відновлення необхідної форми валу, видалення його овальності та очищення від іржі. Поверхня повинна бути очищена до рівня чистоти, щоб перейти до наступного етапу.

Процес хромування має свої особливості. Під час нанесення захисного шару хрому на робочі поверхні штока рейки, товщина покриття значно перевищує товщину, яку можна отримати іншими методами. Зазвичай покриваються окремі ділянки, а решта поверхні деталей ізолюється за допомогою целулоїду, що не передбачає обробки зубчастого сектора рульової рейки. Процедура відновлення штока рейки хромуванням досить складна та дорога, і у деяких випадках може мати вартість, що порівнюється з вартістю нового вала від виробника. Принцип дії газотермічного напилення [28] полягає у нанесенні на підготовлену поверхню малих розплавлених частинок певного металу. Напилюваний матеріал потрібного сплаву поміщається у високотемпературне середовище, де розпилюється на необхідну поверхню за допомогою струменя стиснутого повітря або газу. Частинки, утворені під час розпилення матеріалу, рухаються з великою швидкістю в заданому напрямку. Після того, як вони потрапляють на поверхню, що обробляється, частинки остигають і формують шар з необхідними властивостями.

У процесі плазмового напилення [6] на поверхню оброблюваного виробу наноситься рівномірне порошкове покриття за допомогою розпеченого плазмового струменя. Це покриття щільно зчіплюється з металевою поверхнею за рахунок високої швидкості подачі. Процес відновлення форми та зовнішнього покриття деталей за допомогою плазмового напилення характеризується високою точністю та відсутністю будь-яких похибок, дефектів чи напливів. Нагрівання деталей під час відновлення відбувається при температурі, не перевищуючи 150 °C, що дозволяє уникнути деформації та зміни розмірів деталей. Такий підхід унеможливлює небажані структурні зміни.

Товщина покриття, нанесеного методами газотермічного або плазмового напилення на вал, обмежена 2 мм. Мінусами цих методів є висока вартість пристроїв для напилення, здатних нанести якісне щільне покриття. Необхідні капіталовкладення можуть ускладнити застосування цих методів для ремонтно-відновлювальних робіт на дрібних підприємствах.

Зношування зубів рульової рейки можна усунути методом вдавлювання. Варто зазначити, що такий дефект зазвичай знаходиться в середній частині рейки та поступово вирівнюється до країв. Вдавлювання є одночасно осадом і роздачею, під час яких рейку нагрівають у спеціальних пристроях. Вдавлювання здійснюється за допомогою роликів та клинів, що протидіють необхідній деформації профілю зубів. Далі отриману канавку доводять шляхом наплавлення. Недоліками цього методу є подвійна технологічна обробка, необхідність подальшого шліфування для збереження профілю, а також те, що покриття при наплавленні має досить значну товщину. Також у наплавленому металі може спостерігатися утворення газових пор та тріщин, що призводить до зниження межі витривалості поверхневого шару.

У літературних джерелах майже не зустрічаються інші рекомендації щодо відновлення кермової рейки. Це свідчить про актуальність розробки технології зміцнення робочих поверхонь рухомих з'єднань рульового механізму в зоні черв'ячної передачі для збільшення ресурсу механізму після завершення ремонтно-відновлювальних робіт.

Технічний результат полягає у збільшенні міжремонтного періоду інтегральних кермових механізмів з підсилювачем керма шляхом створення на поверхнях деталей пар тертя зносостійких покриттів із заданими службовими властивостями.

Висновки.

Поверхні деталей рульового механізму в умовах експлуатації схильні до різних видів зносу, який 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. Для детальнішого вивчення необхідні подальші дослідження щодо специфіки та особливостей даного методу.

РОЗДІЛ 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: дробеструменева та піскоструминна 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]. Оскільки зубчаста рейка схильна до втомного зношування, актуальним є метод поверхневого зміцнення деталей пар тертя, який створює на поверхні залишкові напруження 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 призводять 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]. Описавши 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 на малюнку 5.

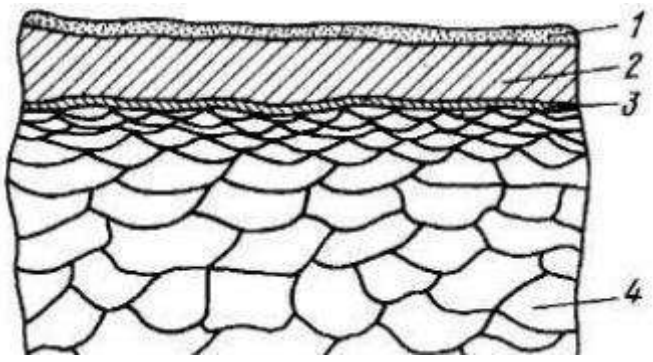

Рисунок 5 – Структура поверхні після ПДМ

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

Вивчення поверхневого шару, який утворився під час фрикційного плакування гнучким інструментом, показало, що початковою зоною є покриття, яке формується під час обробки. Друга зона – перехід між матеріалом покриття та основою матеріалу виробу. Третьою зоною стає шар, який зазнав деформації. Оскільки при ПГІ відбувається пластичне деформування поверхні оброблюваної деталі, її твердість збільшується. Найбільший інтерес представляє перехідний шар, який відрізняється від матеріалу основи, так і від матеріалу покриття. Він формується за рахунок дифузії матеріалів, що дає йому нові особливі властивості, такі як висока твердість, змінений мікрорельєф та підвищена зносостійкість. Покриття відіграє роль твердого мастила, особливо в період опрацювання деталі, і майже повністю видаляється, залишаючись тільки у западинах мікрорельєфу, що знижує тертя. Збільшення швидкості обертання щітки відбувається зняття отриманого фрикційного шару» [3], [12], [27].

Зараз існують дві важливі схеми проведення процесу ПГІ. Перша схема передбачає, що ворсинки гнучкого інструменту є елементами матеріалу покриття. Схема виконання операції продемонстрована на малюнку 6.

Під час першого проходу гнучкого інструменту відбувається очищення поверхні основи від забруднень та окалин, зрізання невеликих нерівностей. Додатково відкриваються ювенільні поверхні для формування містків схоплювання матеріалу ворсинок та частинок елементів покриття. Схоплювання сприяють спільна пластична деформація та підвищення температури в місці обробки поверхні. Далі, при обертанні щітки, з'являється ковзання ворсинок з частинками матеріалу по поверхні. Це призводить до взаємного проникнення частинок матеріалу покриття та матеріалу, що обробляється, і формування кількох шарів перехідної ділянки у місці схоплювання.

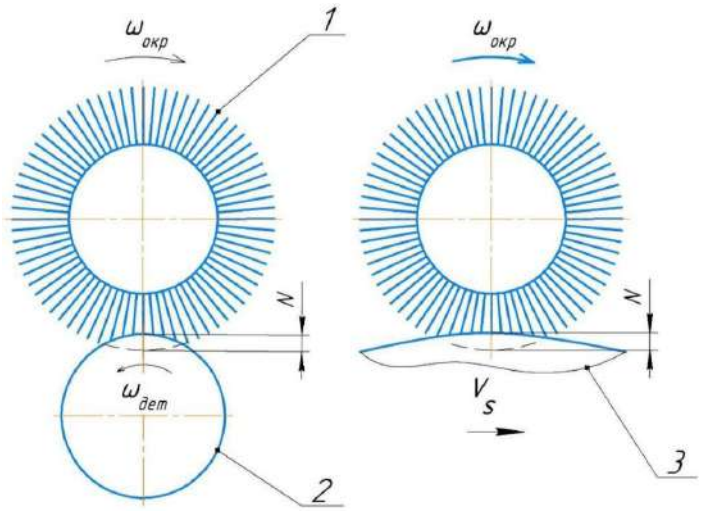

Рисунок 6 – Принципові схеми реалізації процесу ПДМ №1

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

Істотним недоліком першої схеми є невеликий ресурс інструменту, що призводить до його подальшої утилізації без можливості повторного використання. Після тривалої експлуатації ефективність методу знижується, що також пов'язано зі складністю дотримання технологічного режиму через знос ворсинок щітки.

У другій схемі ворс гнучкого інструменту стає механічним переносником частинок матеріалу покриття на основу виробу, що обробляється. Інструмент притискають до елементів матеріалу покриття у вигляді твердотільного компонента з деяким зусиллям. Гнучкий інструмент являє собою дротяну щітку, що обертається. Фрикційне підвищення температури з високим рівнем інтенсивності допомагає зруйнувати вузли, у яких відбувається схоплювання, через товщу розміцненого шару поверхні елемента матеріалу покриття. Після контакту гнучкого інструменту з поверхнею, що обробляється, матеріал переноситься з ворсу на основу. Ця схема використовується найчастіше для утворення покриття за допомогою фрикційного плакування.

Механічна щітка може встановлюватися під кутом до поверхні, що плакується деталі, або перетинати її під кутом від 25° до 45°. Подача оброблюваної деталі може відбуватися в обох напрямках – вздовж та поперек інструменту. Ця схема застосовується найчастіше для плакування циліндричних і плоских поверхонь.

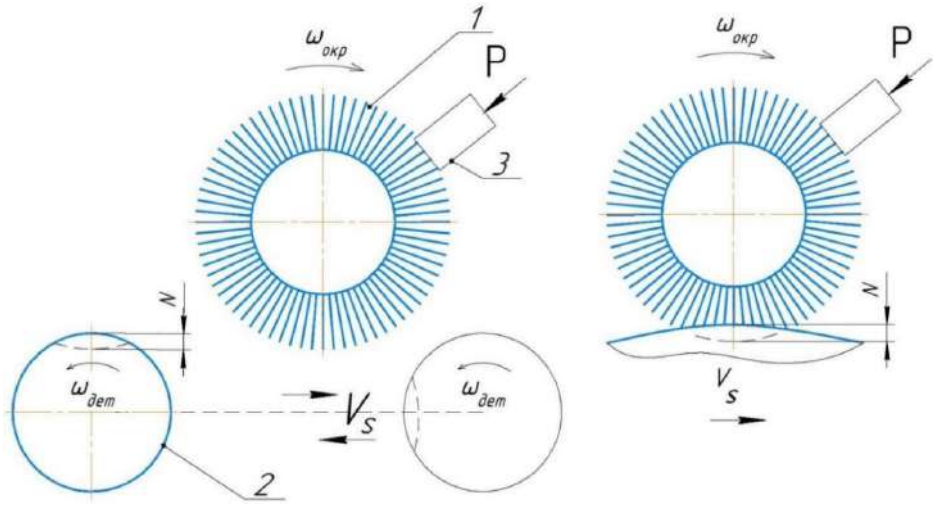

Рисунок 7 – Принципові схеми реалізації процесу ПДМ №2

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

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 основа для подальшого опрацювання конструкції установки для обробки кермової рейки. На основі цієї принципової схеми необхідно розробити установку плакування для зубчастої рейки з урахуванням її конструктивних особливостей.

Однією з виявлених проблем є складність обробки бічних поверхонь зубів кермової рейки. Плакування існуючими методами неможливе через постійне розташування ворсинок уздовж оброблюваної деталі, що негативно впливає на верхню область зубів. Для обробки крайніх зубів немає жодних технічних перешкод, але проведення обробки

проміжних зубів є неможливим. І, як вже зазначено, саме там спостерігається вищий знос. Тобто потрібно продумати таку схему обробки, щоб дотримуватися постійного натягу, однакового вильоту ворсу, і при цьому ворс був перпендикулярний оброблюваній поверхні при вході в контакт з нею. На малюнку 8 представлена схема обробки зубчастої рейки методом плакування з урахуванням виявлених особливостей.

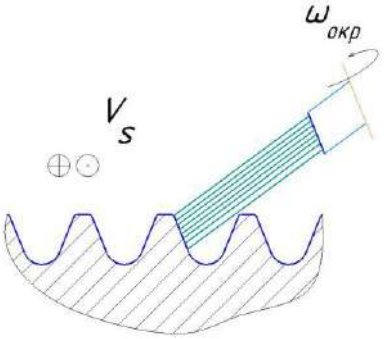

Рисунок 8 – Принципова схема встановлення плакування зубчастого сектора рульової рейки

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 натяг N для всіх ворсинок, що знаходяться в контакті в інтервалі від 1 до 2 мм.

Однак, для отримання постійної високої якості покриттів потрібно точно реалізувати технічні параметри процесу за вказаною схемою. Тоді правильно підібрані режими обробки не призведуть до швидкого виходу інструменту з ладу через руйнування втоми. Подальше дослідження цих 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 визначення сил в зоні контакту, виходячи з умов роботи рульової рейки.

2.2 Визначення методики розрахунку параметрів у зоні контакту

Поворот коліс здійснюється завдяки дії моменту, що створює крутний момент. Момент, який водій застосовує до керма з допомогою ГУР.

На малюнку 9 зображено схему зони контакту. Під час здійснення повороту черв'як 20 обертає зубчастий сектор 21. Він повертається разом з золотником 15 та торсіоном 9. Тоді у черв'яку виникає сила P_скр, яка прагне змістити його у напрямку осі. Сила пружності торсіону утримує його від цього зміщення. Якщо сила P_скр зменшується, черв'як не зміщується у напрямку осі, і золотник 15 залишається в нейтральному положенні. У цей момент не виникає достатнього тиску в порожнинах гідроциліндра. Таким чином, поворот автомобіля здійснюється лише завдяки прикладеному моменту M_вод через кермо. У цій ситуації момент опору повороту черв'яка M_повз від сил тертя M_тр менше, ніж момент, що повертає, від сил пружності торсіону M_торс.

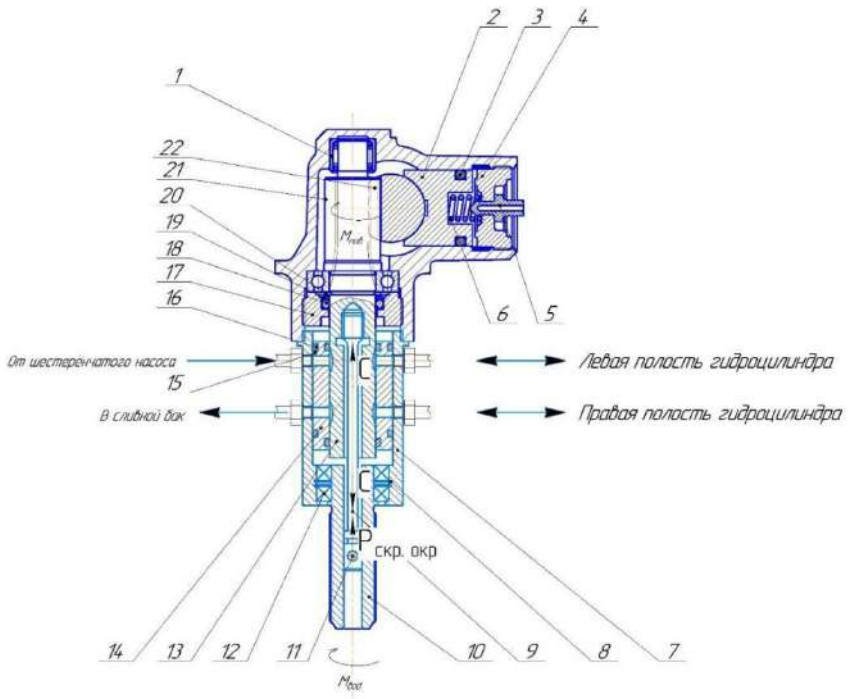

Рисунок 9 – Схема зони контакту на розподільнику під час передачі зусиль на поворот

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.

У випадку, коли опір повороту є великим і момент М_повне здатний подолати його, черв'як повертається у зубчастий сектор. Це призводить до його зміщення в напрямку осі при повороті праворуч і назад при повороті ліворуч. Потік спеціальної рідини від розподільника направляється до робочого гідроциліндра у відповідні порожнини, де під тиском рейка 22 переміщується вперед і повертає зубчастий сектор. Від цього сектора поворотний момент передається колесам через кермові тяги. Сили та переміщення, що виникають внаслідок дії механізму кермового управління з ГУР, спричиняють знос рейкового механізму.

На малюнку 10 видно, що при повороті кермового валу на хробак діють сили: Р_ч-р.ос, яка намагається перемістити черв'яка з певною швидкістю в осьовому напрямку; Р_ч-р., яка тягне черв'як у напрямку від рейки; момент сил М_пов, що передається від кермового колеса через розподільник. У результаті взаємодії сил Р_ч-р.ос і Р_ч-р. з навантаженням через черв'як, рульова рейка виконує зворотно-поступальний рух.

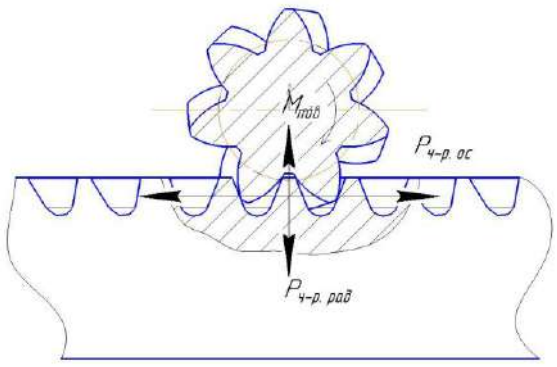

Рисунок 10 – Схема зони контакту на рульовій рейці під час передачі зусиль на поворот

У цьому вузлі кермового механізму з складним профілем поверхні тертя, який працює в умовах тертя з коченням та проковзуванням, відбувається витіснення мастила з зони контакту. Це призводить до того, що контакт поверхонь стає подібним до тертя без мастила. У такій ситуації зношування поверхні внаслідок проковзування є досить значним, що скорочує термін експлуатації рульового механізму.

Таким чином, під дією сил Р_ч-р.ос, Р_ч-р. та моменту М_пов у кермовому механізмі при виникненні циклічних навантажень відбувається знос бічних поверхонь зубів черв'яка 21 і рульової рейки 22 у місцях сполучення. Внаслідок взаємодії сил Р_ч-р.ос і Р_ч-р. та моменту М_пов, особливо при великому опорі повороту, відбувається проковзування витків черв'яка щодо зубів сектора, що супроводжується зношуванням зубів рейки 22 по бічній поверхні і витків черв'яка 21. Це спричиняє циклічне контактне навантаження. Руйнування тіл, що труться, відбувається під впливом тангенціальних зусиль, що викликають у поверхневих шарах напруги, що перевищують межу плинності або міцності. Працюючи в умовах рідинного мастила, коли поверхні тертя не завжди розділені шаром мастила навіть малої товщини, виникає граничне тертя, що також сприяє зносу.

З урахуванням кінематики зношування функціональної пари "черв'як-кермова рейка" виникає питання щодо застосування різних методів захисту поверхонь від втомного руйнування. Основною методикою підвищення надійності та довговічності деталей, що працюють в умовах тертя, є формування антифрикційного захисного покриття на поверхні контакту, яке забезпечує захист поверхневого шару від зносу. Тому методика фрикційного плакування гнучким інструментом є найбільш підходящою для обробки зубів кермової рейки.

Базою для математичної моделі є дослідження контактної геометричної взаємодії інструмента з поверхнею, що обробляється. З урахуванням запропонованої схеми установки та конструктивних

особливостей обраної рейки та розподілу навантажень, які викликають зношування, виникає питання про зміцнення саме бічних поверхонь зубів рульової рейки. Виходячи з кінематики процесу взаємодії ворсинки з оброблюваною поверхнею, представленої на малюнку 11, можна прийняти, що бічну поверхню зуба при обробці ПГІ можна розглядати як плоску поверхню. У цьому випадку методика розрахунку параметрів зони контакту при плакуванні бічної поверхні зубів базується на методиці розрахунку параметрів для виробів плоскої форми [15].

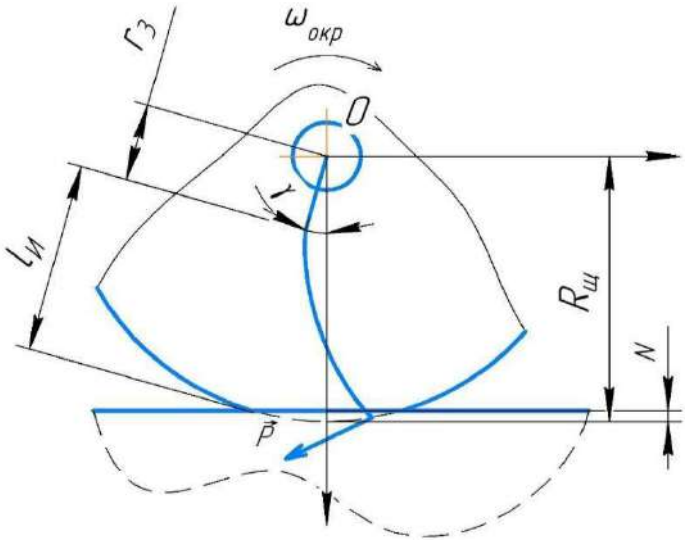

Рисунок 11 – Контакт щітки з плоскою поверхнею зуба рульової рейки

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

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

де *N*- Натяг ворсу до виробу, що обробляється, мм;

Rщ=l_I+*r3* - Радіус щітки, мм;

r_3 - Довжина частини ворсу, яка деформується, мм;

l_I - Виліт частини ворсу, що згинається, мм.

Встановивши методику та обґрунтувавши причини зношування оброблюваної поверхні, можна зробити висновок, що обробка зубів рульової рейки під кутом еквівалентна обробці плоскої поверхні.

2.3 Аналіз джерел ефективності методики поверхневого пластичного деформування

Для переконання у ефективності запропонованого методу потрібно вказати умови, за яких обробка вважається успішною. Порівняльний аналіз існуючих методів поверхневого пластичного деформування (ППД), проведений з використанням відкритих джерел, допоміг визначити напрямок дослідження у вибір користувача. Надійність та ресурс деталей значною мірою залежать від стану поверхневого шару. Методи ППД вирізняються простотою втілення, екологічною чистотою, високою продуктивністю, широким застосуванням, стійкістю та стабільністю. Однак ці методи мають певні обмеження, такі як вимога до попередньої обробки деталі в разі низького рівня вихідної шорсткості, а також можливість перенаклепу або лущення оброблюваної поверхні.

Методи ППД передбачають силовий контакт деформуючого інструменту з поверхнею виробу в умовах відносного переміщення. Удари, нанесені на виріб в заданому порядку або хаотично, залишають на ньому багато локальних пластичних слідів, які покривають всю поверхню. Ці обробки мають різні масштаби, що залежать від матеріалу виробу, параметрів інструменту, його розмірів та сили удару. При статичних методах ППД, наприклад, накатці за допомогою ролика або кульки, центр деформації постійно зміщується.

Поряд зі статистичними методами обробки в сфері машинобудування застосовують технології поверхневого пластичного деформування (ППД), що реалізуються завдяки динамічному (ударному) впливу. До них відносять також метод ПДМ. Дослідження низки джерел,

наведених у літературі, спрямоване головним чином на виявлення загальних закономірностей ППД при великому розмаїтті методів реалізації цього виду обробки. Для забезпечення необхідної якості поверхневого шару під час використання динамічних методів розглядаються характерні параметри поверхневого шару, які залежать від режимів обробки ППД.

При здійсненні плакування за допомогою гнучкого інструменту, наклепаний шар утворюється внаслідок великої кількості дискретних ударів ворсу по оброблюваній поверхні, що випадково повторюються в часі і залишають на поверхні відбитки. Ці відбитки можуть випадково розміщуватися по всій площі обробки.

Під час вивчення процесу ППД були створені різні системи математичних розрахунків, на основі яких можна скласти попередній прогноз очікуваних характеристик зміцнення, таких як ступінь деформації та глибина зміцненого шару. Ці параметри зміцнення залежать від технологічних режимів обробки та фізико-механічних властивостей виробу, що обробляється.

У процесі обробки поверхневого шару деталі в область контакту вводяться елементи, наприклад, наконечники ворсу щітки або дріб у вигляді кульок, що формують залишкові вм'ятини. Пластично деформований простір глибиною hs, що утворюється в результаті цього, відрізняється за властивостями від основного матеріалу.

Однією з перших залежностей для розрахунку глибини зміцнення є формула, яку отримав Хейфець С. Г.

$$h_s = \sqrt{\frac{P}{2 \cdot \sigma_T}}, \tag{2}$$

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, які не мають вираженого майданчика плинності на діаграмі розтягування, у якості σ_T приймають умовну межу плинності $\sigma_{0,2}$. Багато дослідників намагалися покращити, змінити та доповнити цю залежність. Автор [21], під час проведення експериментальних досліджень, довів, що розрахункові дані, отримані за використання цієї залежності, вище експериментальних на 20%.

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

Для матеріалів, які не мають вираженого майданчика плинності на діаграмі розтягування, у якості σ_T приймають умовну межу плинності $\sigma_{0,2}$. Багато дослідників намагалися покращити, змінити та доповнити цю залежність. Автор [21], під час проведення експериментальних досліджень, довів, що розрахункові дані, отримані за використання цієї залежності, вище експериментальних на 20%.

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

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

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

Дослідник Тамаркін М. А. запропонував "уточнену залежність, у межах якої враховується те, що площа контакту сферичного індентора з площиною практично завжди має еліпсоподібну форму:

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

де $V_{ок}$ - Швидкість обробки, м/с;

k_s- Коефіцієнт, що враховує вплив шорсткості деталі;

$\rho_{ш}$ - Щільність матеріалу індентора, кг/м3;

$r_{відп}$ - Радіус індентора, м;

с - Коефіцієнт несучої здатності контактної поверхні [34].

Відповідно до досліджень Кудрявцева І. В., "ступінь деформації ε виражається як відношення діаметра лунки d, яка формується в результаті впливу індентора, до діаметра сфери, що вдавлюється D" [20]:

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

"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

Для практичного використання раніше розглянутих залежностей, на підставі яких можна встановити показник глибини зміцненого шару hs, необхідно знати показник контактного навантаження P, а також межу плинності матеріалу T, з якого виготовлено виріб. Формула (3) вже містить у собі розкладені технологічні та геометричні умови, у тому числі силу удару, але це все одно не допоможе у раціональному контролі технологічних параметрів.

Враховуючи результати роботи [12], "при описі деформаційного зміцнення, зі збільшенням ступеня розподілу деформації відбувається безперервний приріст межі плинності матеріалу деталі за рахунок наклепу, тому потрібно прагнути максимального ступеня рівномірності деформації поверхневого шару" [12].

Таким чином, щоб здійснити процес обробки за допомогою застосування динамічного методу ПГІ, в ролі основних показників були встановлені такі характеристики - ступінь, глибина та рівномірність шару, що зміцнюється.

Посилаючись на експериментальні дослідження, можна відзначити результати авторів, які проводили зміцнення методом ПГІ штоків гідроциліндрів, виготовлених зі сталі 45. Отримана товщина покриття склала від 20 до 25 мкм. І що найголовніше можна виявити з цього дослідження, це те, що проводилося зміцнення зубчастих вінців хвильових передач, що конструктивно близько до кермових рейок, що розглядаються. Зуби вінців також, як і у обраної рульової рейки мають трапецеїдальну форму. Кращий результат при зміцненні вінців показало покриття, що містить мідь, товщина якого склала близько 1 мм. При покритті вінця покриттям мідь містить термін служби збільшився вдвічі і склав 30 годин. При нанесенні покриття мідь на штоки і плунжери гідравлічних циліндрів результати показали значні поліпшення експлуатаційних характеристик. Ресурс збільшився у 3 рази, а на зуби коліс хвильових передач торцевого виконання – у 6 разів сумарно. Було встановлено, що методом ударно-фрикційної обробки гнучким інструментом можливе одержання твердого наноструктурованого поверхневого шару. Як і було описано в методиці плакування, процес зміцнення поверхні йде з одночасним дослідженні [4] зміцнювалися циліндричні поверхні із сталі 45 різними покриттями за наступних технологічних параметрів: довжина ворсу l1 складала 75 мм, діаметр ворсу dв - 0,20 мм, швидкість обертання Vок - 35 м/с, кількість проходів n

склала від 6 до 9. Товщина сформованого покриття на зразках із сталі 45 склала від 30 до 150 мкм. Також було проведено дослідження щодо закономірності формування глибини покриттів із різних матеріалів на пластини із сталі 45, а саме міді, алюмінію, латуні та олова. За технологічні параметри було обрано натяг N від 1 до 3 мм та час обробки від 1 до 3 хвилин. Результати експерименту представлені у таблиці 2.

Таблиці 2

Результати експерименту

Номер досвіду	Матеріал покриття								Технологічні параметри	
	Мідь		Алюміній		Латунь		Олово			
	H,	σ_B,	*H*,	σ_B,	*H*,	σ_B,	*H*,	σ_B,	*N*,	Час, хв
	мкм	*МПа*	мкм	*МПа*	мкм	*МПа*	мкм	*МПа*	мм	
1	75	6,53	150	9,56	120	6,32	170	6,4	3	3
2	100	7,17	100	4,78	150	7,43	120	7,2	3	3
3	150	8,46	120	5,99	100	6,94	140	8,4	1	1
4	87	6,1	87	4,68	170	8,8	100	7,4	1	1
Позначення: H - Товщина сформованого покриття; σ_B - Адгезійна міцність покриття										

Проаналізувавши результати експерименту, можна сказати, що вплив режимів обробки не є однозначним. Збільшення натягу при тривалості обробки, що дорівнює 1 хв, призводить до зростання товщини та адгезійної міцності покриття, але при подальшому збільшенні тривалості обробки збільшення натягу дає зворотний ефект.

Цікава робота [23] проводилася з порівняння критеріїв працездатності мідних покриттів, отриманих гальванічним способом та методом фрикційного плакування. Технологічні параметри плакування були наступні: натяг N від 1,2 до 4 мм, довжина ворсу l1 дорівнювала 60 мм, діаметр ворсу db - 0,20 мм, швидкість обертання Vок становила 20–35 м/с, кількість проходів n варіювалося від 5 до 12. Товщина сформованого покриття на сталевих зразках сталі 08кп становила від 6 до 8 мкм. Автори

виділили кількість циклів поперечного вигину до виникнення відшаровування мідного покриття та поломки зразка як основні характеристики працездатності. Також проведено дослідження щодо опору тертю сферичного індентора щодо зміцненої поверхні. Зміцнені зразки методом ПГІ забезпечують задовільну працездатність лише при навантаженнях, що не перевищують 8 МПа. Плаковані покриття виявилися більш стійкими до навантажень, що виникають при циклічному перегинаному згинанні. Навіть після ламання виробу плаковані покриття залишалися на місці.

Основоположник методу обробки механічними щітками, що обертаються, Ю. І. Кургузов, випустив статтю [22] у 2009 році, де розглядалися питання зміцнення газотурбінних лопаток двигунів. Технологічні параметри обробки були наступні: виліт ворсу l1 - 75 мм, діаметр ворсу dв - 0,3 мм, швидкість обертання Vок - 19 об/хв. Встановлено, що обробка, що згладжує поверхню і призводить до зниження її шорсткості, можлива за умови, що глибина відбитка вбирається у радіус відбитка. Аналіз результатів показав підвищення мікротвердості поверхневого шару на 17% - 22%. Однак приріст мікротвердості спостерігався під час обробки при високих швидкостях щітки. Товщина зміцненого шару становила від 20 до 25 мкм.

Товщина покриття, що наноситься, помітно відрізняється в кожній роботі, але на підставі вивченої інформації можна стверджувати, що застосування запропонованого методу дозволяє формувати покриття різної товщини, від 3 до 25 мкм і навіть до 150 мкм за певних умов. У проаналізованих джерелах стверджується, що основна дія процесу реалізації ПГІ полягає у формуванні досить тонких антифрикційних покриттів та рівноважної шорсткості.

Таким чином, на показник стабільності рівномірного нанесення захисного покриття різною мірою впливають технологічні (частота обертів щітки, швидкість пересування оброблюваної деталі, натяг, час

обробки) та конструктивні (довжина та діаметр щітки, радіус окремої ворсинки) фактори.

Проаналізувавши реальні експерименти та теоретичну основу, можна припустити, що впровадження плакування для підвищення зносостійкості пар тертя дозволить суттєво збільшити довговічність зубчастих рейок.

2.4 Математичне моделювання параметрів зони контакту процесу ПДМ

Метод фрикційного плакування гнучким інструментом виступає як комбінований метод обробки. У ході первинної стадії реалізується процес пластичного поверхневого деформування оброблюваної поверхні під впливом ударів дротяних компонентів інструменту. Після цього покриття наноситься. Відомо, що для встановлення товщини шару зміцнення необхідно знати як силу удару, так і показник упругопластичної деформації, що формується в результаті цього впливу. Також важливо розуміти, яка точно кількість ударів потрібна для певної площі за одиницю часу. Це обумовлено тим, що з формуванням шару зміцнення слід розуміти процес рівномірного розподілу його за глибині під оброблюваною поверхнею. І тому необхідно знати поверхневу щільність розподілу відбитків від ударів ворсу [16]. На сьогоднішній день існує модель, розроблена Зотовим А. В., яка дозволяє оцінити ступінь розподілу відбитків по поверхні оброблюваної деталі, що утворюється в ході удару гнучкого ворсу інструменту, враховуючи фізико-механічні властивості матеріалу. Так, ворс гнучкого інструменту на її периферійній поверхні розташований нерівномірно і при обробці відбитки на оброблюваному виробі з'являються у випадковому порядку. З цього можна застосувати теорію ймовірності. При цьому той факт, що будь-які очевидні закономірності процесу розподілу ворсу по периферійній

поверхні інструменту відсутні, доцільно застосовувати ймовірнісний підхід під час моделювання розподілу відбитків. При цьому розподіл відбитків здійснюватиметься відповідно до закону Пуассона [17].

Закон Пуассона моделює випадкову величину, яка є числом подій, що відбулися за фіксований час, за умови, що дані події відбуваються з деякою фіксованою середньою інтенсивністю і незалежно одна від одної. Так, ймовірність появи тієї чи іншої ворсинки в будь-якій області оброблюваної поверхні не залежить від кількості ворсинок, що потрапили в будь-які області, які не перетинаються з даною. Поруч із вкрай незначною є потенційна можливість того, що у певну область потрапить дві чи більше ворсинки, особливо з урахуванням того, що попадання однієї ворсинки є можливим.

У процесі здійснення моделювання слід розрізняти ділянку ударного впливу при вході ворсу в контакт і ділянку ковзання стисло-вигнутого ворсу по поверхні виробу, що обробляється, до виходу його з контакту. Необхідно, щоб щільність ворсу гнучкого інструменту була менше або дорівнювала 0,2. Фактичний показник заповнення робочої поверхні обчислюється за такою формулою:

$$\eta_{\text{ф}} = \frac{n_{\text{в}} \cdot d_B^2}{8 \cdot B \cdot R_{\text{щ}}} \tag{7}$$

де $n_в$ – загальна кількість тяганини на периферійній поверхні щітки;

d_B - Діаметр, мм;

$R_щ$ – Радіус щітки, мм;

B – Ширина щітки, мм [17].

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

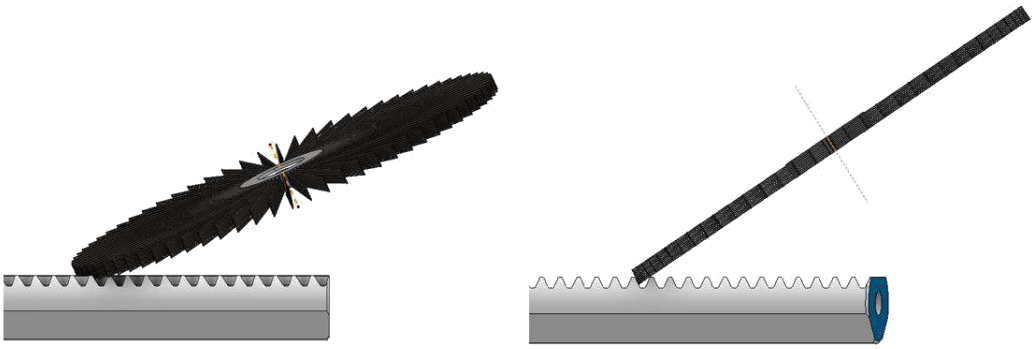

Рисунок 13 – Обробка рульової рейки гнучким інструментом: а – вид збоку; б – вид нормаллю до периферії інструменту

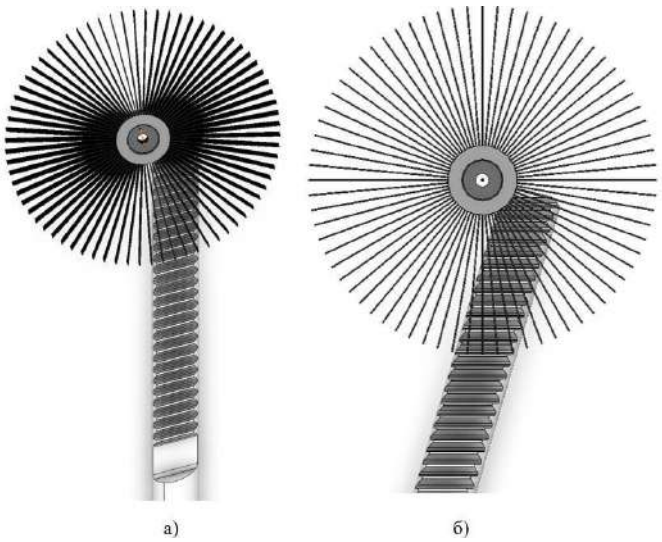

Рисунок 14 – Обробка рульової рейки гнучким інструментом: а – вид зверху; б – вид нормаллю до інструменту

Тоді, "поверхнева щільність розподілу відбитків, що сформувалися від впливу ворсу на поверхні деталі, є прямо пропорційним показнику окружної швидкості обертання інструменту Vок, коефіцієнта ηф, а також обернено пропорційним квадрату діаметра ворсу dB та швидкості переміщення V_S оброблюваної поверхні щодо гнучкого інструменту" [16].

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

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)*:

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

$$P(a)^* = \frac{a_{отп}^n}{n^*!} e^{-a_{отп}}, \quad (9)$$

де $\alpha_{отп} = \pi \cdot (r_{отп})\ 2 \cdot \lambda_s$ – середньоймовірне (математичне очікування) число ударів ворсинки в площу, що дорівнює площі власного відбитка радіусом $r_{отп}$.; n^*,k^* - кратність покриття.

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 радіуса $r_{відп}$, 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:

$$b = 2 \cdot k_{\text{ф}} \sqrt{\frac{d_B^2}{4} - \left(\frac{d_B}{2} - \frac{h_{\text{отп}}}{\sin\gamma}\right)^2}, \tag{10}$$

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

$h_{відп}$- Глибина залишкового відбитка, мкм;

γ – кут входу, під яким ворсинка контактує з деталлю, град [16], [17].

Для розрахунку глибини залишкового відбитка скористаємося відомою формулою:

$$h_{\text{отп}} = K \cdot P_y^{n_k} \cdot \sin\gamma, \tag{11}$$

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:

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

де σ_T- 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:

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

де $r_м = r_s/(2 \cdot a_{отп})^{\frac{1}{2}}$ – найбільш ймовірна відстань між центрами двох найближчих відбитків [25].

Зона перекриття деформованих обсягів шару наклеп схематично продемонстровано малюнку 15.

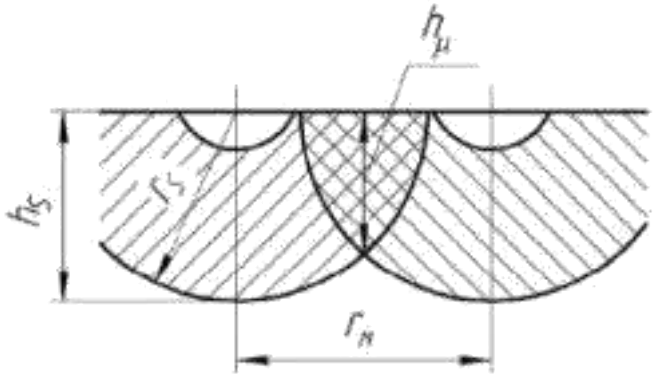

Рисунок 15 – Зона перекриття деформованих обсягів зміцненого шару

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

$$\Psi_s = \sqrt{1 - \frac{1}{8 \cdot \pi \cdot h_s^2 \cdot \lambda_s}} \,. \tag{14}$$

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:

$$P_{y_i} = g^2 \cdot \frac{V_{\text{ок}}}{R_{\text{щ}} \cdot l_{\text{И}}^2} \cdot \sqrt{m \cdot \left[R_{\text{щ}}^3 - \left(R_{\text{щ}} - l_{\text{И}}\right)^3\right] \cdot E \cdot J}\,, \tag{15}$$

де g- Коефіцієнт, що враховує динаміку обертання дротяного інструмент;

$V_{ок}$- Окружна швидкість інструменту, м / с;

$R_{щ}$- Радіус гнучкого інструменту, м;

l_I- Довжина згинається частини тяганини, м;

m- Маса тяганини, кг;

E- Модуль пружності, Па;

J- осьовий момент інерції площі поперечного перерізу, м^4 [21].

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:

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

де n – кількість проходів інструменту (кількість незалежних випробувань);

k– 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.

Висновки.

Аналізовано метод фрикційного плакування, що полягає у одночасному зміцненні поверхневого шару виробу та нанесенні захисного покриття. Основні принципи цього методу включають комбінацію механічного зміцнення і хімічного плакування, що забезпечує підвищену зносостійкість та корозійну стійкість оброблюваних деталей.

На основі огляду основних схем обробки виробів була розроблена схема установки для обробки кермової рейки, що має трапецієподібну форму зубів. Дослідження показали, що косозубе розташування зубів не дозволяє застосовувати стандартні методи обробки плакуванням. Схема обробки зубів кермової рейки передбачає обробку під кутом, при цьому взаємодія ворсинок з бічною поверхнею зубів відбувається аналогічно обробці плоскої поверхні.

Обґрунтування необхідності плакування бічної поверхні зубів кермової рейки проведено на основі аналізу умов роботи та розподілу сил, які викликають зношування зубів. Аналіз кінематики процесу обробки та геометричних параметрів взаємодії ворсинок щітки з оброблюваною поверхнею дозволив визначити методику обробки та відповідний математичний апарат.

На основі літературного огляду встановлено, що запропонована методика є ефективною, що було підтверджено попередніми експериментальними дослідженнями. Розглянуто основні особливості

динамічного поверхневого зміцнення, при якому спостерігаються загальні закономірності щодо параметрів поверхневого шару. В якості основних критеріїв ефективності методики обрані такі технологічні параметри: глибина зміцненого шару та ступінь рівномірності розподілу зон пластичної деформації.

Таким чином, метод фрикційного плакування забезпечує високу якість поверхневого шару виробів за рахунок одночасного зміцнення та нанесення захисного покриття, що сприяє підвищенню їх експлуатаційних характеристик.

Визначено методику оцінки механізму деформаційних процесів під час обробки рульової рейки дротяним інструментом. Ця методика враховує технологічні режими обробки, такі як швидкість, глибина проникнення інструменту та сила притискання, а також конструктивні характеристики інструменту, зокрема, діаметр дроту, матеріал та геометрію ріжучої частини. Відповідні параметри інструменту і режими обробки визначають характер та інтенсивність деформаційних процесів, що відбуваються у поверхневому шарі матеріалу рульової рейки. Завдяки цьому підходу, можна ефективно контролювати якість обробки, забезпечуючи необхідну твердість, зносостійкість та геометричну точність обробленої поверхні.

Розширене дослідження дозволило встановити, що підвищення швидкості обробки та зменшення діаметра дроту сприяє інтенсивнішому формуванню пластичних деформацій, що позитивно впливає на зміцнення поверхневого шару. Однак, занадто висока швидкість або надмірне зусилля можуть призвести до пошкодження матеріалу та зниження якості обробки. Таким чином, оптимальні технологічні режими повинні бути підібрані для кожного конкретного випадку з урахуванням матеріалу рульової рейки та вимог до кінцевої якості обробки.

Цей підхід забезпечує комплексне розуміння механізмів деформації, дозволяючи більш точно прогнозувати результати обробки та розробляти ефективні технологічні процеси для виготовлення високоякісних рульових рейок.

ГЛАВА 3: РОЗРАХУНКОВО-АНАЛІТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПЛАКУВАННЯ РУЛЬОВОЇ РЕЙКИ

Математичне моделювання процесу плакування рульової рейки є надзвичайно складним та трудомістким завданням. Проте завдяки масовому поширенню спеціалізованого програмного забезпечення, стало можливим швидке та ефективне визначення характеристик обробки. Основна мета моделювання – визначення параметрів поверхневого шару, таких як густина розподілу відбитків та глибина зміцненого шару, які залежать від сили удару ворсу.

Розрахунок параметрів поверхневого шару. Спочатку розраховується густина розподілу відбитків на поверхні зубів рейки. Це значення визначається на основі кількості та інтенсивності ударів, що завдають ворсинки інструменту. Наступним етапом є визначення глибини зміцненого шару, яка безпосередньо залежить від сили удару кожної ворсинки. Ступінь рівномірності глибини поверхневого шару також оцінюється на основі показника щільності розподілу відбитків.

Оцінка зон пластичної деформації. Фінальним етапом є оцінка розподілу зон пластичної деформації. Це робиться для розуміння того, як відбувається зміцнення поверхневого шару під впливом обробки. Детальний аналіз кінематики процесу обробки дозволяє визначити методику та математичний апарат, необхідний для точного розрахунку цих параметрів.

Обчислення основних характеристик. Для гарантії точності розрахунків основних характеристик покриття, необхідно розглянути окремі аспекти з кількісними показниками поправочних коефіцієнтів, що залежать від матеріалу рульової рейки та застосовуваного інструменту. Наприклад, після завершення приробітку, в площині, що проходить вздовж осі зволікання по нормалі до площини обертання інструменту, формується дуга, яка виступає як проекція півсфери від удару. У таких

обставинах показник точності дорівнює $k_ф$ – 0,5. Коефіцієнт K при наголосі з твердою сталлю низьковуглецевої зволікання дорівнює $1,59 \cdot 10^{-6}$ м/Н^n, а для пружинної тяганини K = $6,4 \cdot 10^6$м/Н^n.

Поправочні коефіцієнти. При обчисленні глибини зміцненого шару (12) використовується поправочний коефіцієнт, який приймається рівним 1,07 для врахування різниці між обчисленими аналітичними та отриманими експериментальними даними. Ці коефіцієнти враховують вплив різних факторів на процес плакування та дозволяють досягти високої точності розрахунків.

Таким чином, розроблена методика дозволяє ефективно моделювати та аналізувати процес плакування рульової рейки, що забезпечує високу якість та надійність обробки.

Для полегшення та прискорення методики розрахунку основних параметрів була розроблена математична модель в середовищах MS Excel, MathCAD та КОМПАС-графік. Ця модель дозволяє автоматизувати обчислення та візуалізувати результати, що значно підвищує ефективність аналізу.

На поточному етапі розрахунку визначаються показники ступеня покриття поверхонь зубів рульової рейки на основі динаміки процесу обробки інструментом дротяного типу. Використовуючи початкові дані та відповідні формули (8–11), можна обчислити параметри покриття поверхні деталі. Одночасно з цим, побудова графіків залежності дозволяє наочно проаналізувати результати розрахунків ступеня покриття поверхні зубів рейки. Ці графіки базуються на середньоімовірній кількості ударів, що завдаються інструментом, та представлені на малюнках 16 і 17.

Модель забезпечує детальний аналіз процесу плакування, дозволяючи врахувати всі основні фактори, що впливають на якість покриття. Завдяки цьому можна досягти високої точності розрахунків та оптимізувати технологічні процеси. Користувачі можуть легко змінювати

вхідні параметри і миттєво отримувати результати, що значно скорочує час на проведення розрахунків та підвищує їхню надійність.

Таким чином, розроблена математична модель є ефективним інструментом для інженерів і технологів, дозволяючи швидко і точно оцінювати параметри плакування та приймати обґрунтовані рішення щодо оптимізації технологічних процесів.

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

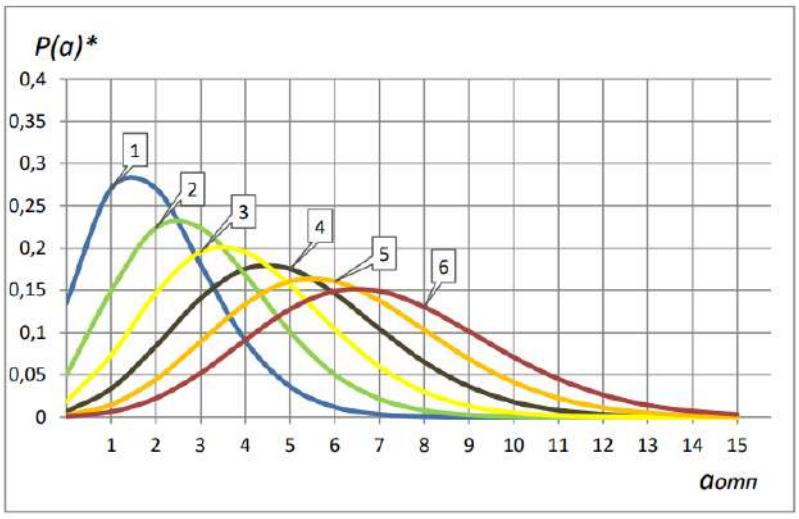

Рисунок 17– Залежність ступенів покриття P(a)* від середньо ймовірного числа ударів ворсинки в площу, що дорівнює площі власного відбитка: 1, 2, 3, 4, 5, 6 – ступінь покриття відповідно 1, 2, 3, 4, 5, 6 разів

Після проведення розрахунків отримано наступні дані: при контактній сили P, рівній 0,3 Н, поверхнева щільність розподілу λ_s становить 101,8 мм$^{-2}$ за таких параметрів: швидкість обробки (V_S = 150 мм/с, коефіцієнт $\eta_ф$ – 0,1, діаметр ворсу d_B – 0,2 мм. Радіус відбитка $r_{отп}$ приблизно дорівнює 12 мкм, а середньоймовірне число ударів $a_{отп}$ складає 4,6. Окружна швидкість обертання щітки Vок повинна знаходитися в діапазоні від 35 до 45 м/с. У процесі плакування швидкість обертання гнучкого інструменту повинна залишатися постійною. Глибина зміцненого шару при куті атаки γ, рівному 15 градусів, складе 11 мкм.

Аналізуючи графіки, видно, що ступінь покриття має таку залежність: 99% площі буде покрито відбитками хоча б один раз, 86% – мінімум двічі, 55% – хоча б тричі, і 25% – хоча б чотири рази. Проте, 5% площі буде покрито лише один раз, 13% – лише двічі, 17% – лише тричі, і 18% – лише чотири рази.

Згідно з графіками залежностей, для того, щоб площа поверхні зуба рейки була повністю покрита, необхідно підвищити показник математичного очікування $a_{отп}$. Змінюючи параметри, можна отримати наступні дані: λs дорівнює 244 мм$^{-2}$, (V_S – 45 мм/с; $\eta_ф$ – 0,15; d_B – 0,25 мм). Якщо швидкість обертання інструмента залишається незмінною, то радіус відбитка становить $r_{отп}$ приблизно 12 мкм. Виходячи з цього, можна обчислити середньоймовірну кількість ударів на площу зуба, яка складе 12,4.

Ці результати дозволяють більш точно оцінити ефективність процесу плакування і роблять можливим оптимізацію параметрів обробки для досягнення максимальної якості покриття. Таким чином, розроблена математична модель не лише спрощує розрахунки, але й забезпечує високу точність та надійність отриманих даних, що є критично важливим для практичного застосування в умовах виробництва.

Для визначення глибини зміцненого шару за формулою (12) необхідно врахувати динамічний вплив дроту при постійній межі

плинності матеріалу. Враховуючи цю формулу, товщина області деформації під час натягу інструмента по відношенню до оброблюваної деталі N складе 2 мм при використанні ворсу діаметром d_B, рівним 0,25 мм, та силою удару P в 0,5 Н, при куті входження ворсинок у контакт γ – 12^o. У такому випадку глибина зміцненого шару становитиме 40 мкм.

Далі, використовуючи формулу (14), визначаємо ступінь рівномірності глибини наклепаного шару ψ_S, який дорівнює 0,99 при триразовому покритті площі.

Висновки та рекомендації. На основі проведеного аналітичного дослідження можна зробити висновок, що, змінюючи геометричні характеристики дротяного інструменту та технологічні режими обробки, можна обчислити необхідний показник ступеня покриття, рівень рівномірності та глибину зміцненого шару для поверхні будь-якого зуба рейки. Ці розрахунки враховують обмежуючі фактори обробки і можуть бути застосовані до всього зубчастого сектора рульової рейки.

Графічний аналіз. Після завершення обробки ступінь покриття бічної поверхні зуба рейки повинен стати рівномірним і повністю покритим слідами від впливу ворсу – відбитками. Для демонстрації взаємного впливу характеристик гнучкого інструменту та параметрів процесу обробки кермової рейки за допомогою дротяного інструменту слід розглянути графіки залежностей.

Залежність глибини зміцненого шару. Відповідно до формули (15), глибина зміцненого шару залежить від сили удару і кута входження ворсинки при незмінному параметрі межі плинності. Це дозволяє більш точно контролювати процес плакування та забезпечувати необхідну якість поверхні.

Таким чином, розроблені методики та моделі є ефективними інструментами для оптимізації процесу плакування, забезпечуючи високу якість обробки та довговічність рульової рейки.

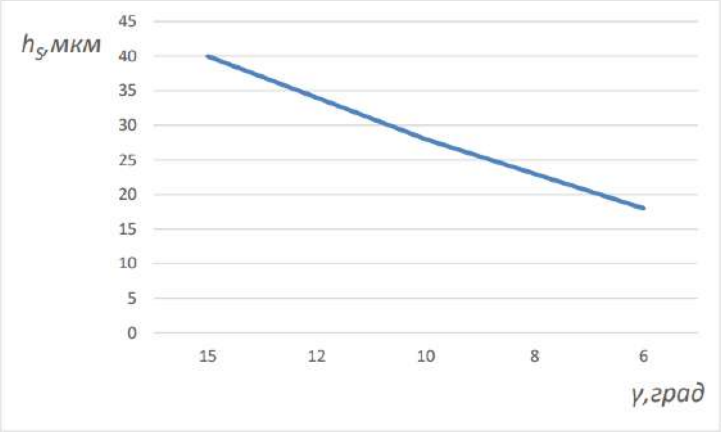

Рисунок 18 – Графік залежності глибини зміцненого шару від кута атаки

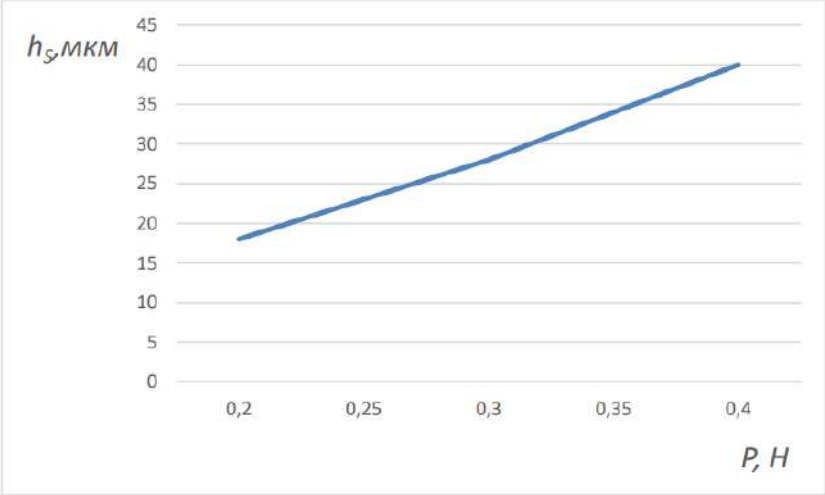

Рисунок 19 – Графік залежності глибини зміцненого шару від сили удару

Малюнки 20 і 21 ілюструють взаємозв'язок між глибиною зміцненого шару та радіусом та глибиною відбитка, який утворюється під час удару ворсу при вході в контакт. Ці параметри нерозривно пов'язані з силою удару. Як показано на рисунках, їхнє взаємозв'язок досить значний, що вказує на важливість правильного вибору цих параметрів для досягнення оптимального результату в обробці.

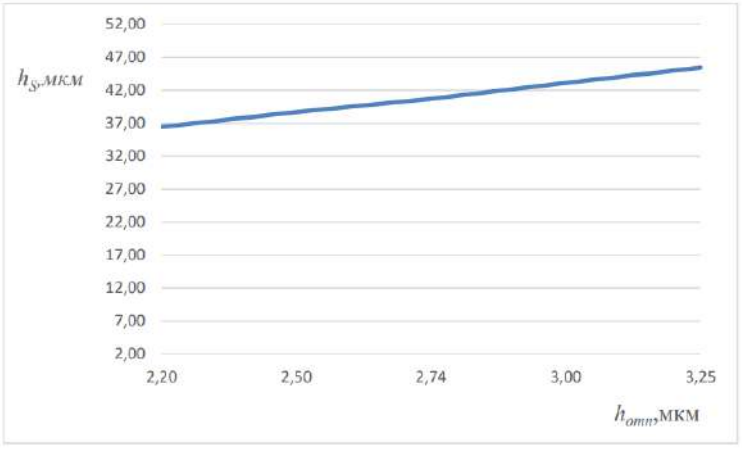

Рисунок 20 – Графік залежності глибини зміцненого шару від глибини відбитка при ударі ворсу

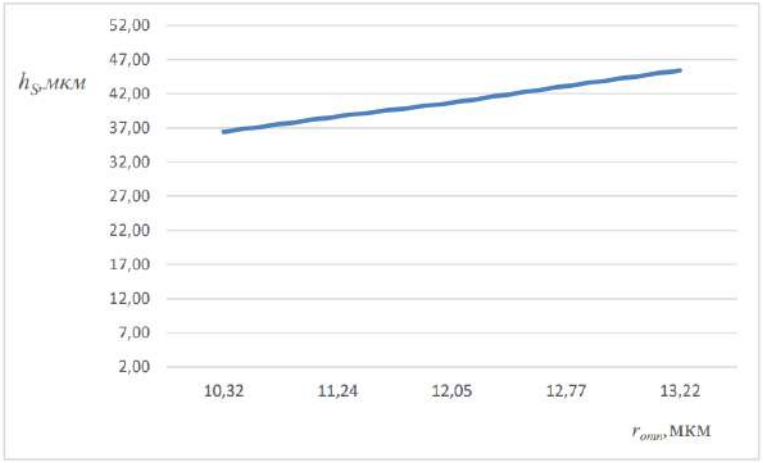

Рисунок 21 – Графік залежності глибини зміцненого шару від радіусу відбитка при ударі ворсу

Згідно з аналізом, проведеним у даному дослідженні, можна зробити висновок, що сила удару відіграє ключову роль у формуванні задовільної глибини зміцненого шару під час обробки гнучким інструментом. Змінюючи лише силу обробки, можна ефективно контролювати весь процес та практично впливати на всі техніко-економічні показники процесу.

Подальший аналіз формул показує, що сила впливу ворсинок щітки може бути обчислена за допомогою варіювання параметрів довжини та

діаметра ворсу, натягу і швидкості обертання щітки. Це підтверджується експериментальними дослідженнями, які були проведені у підрозділі 2.3.

На рисунках 22 та 23 зображені графіки, які ілюструють залежність сили удару від зазначених параметрів за рівних умов. Вони відображають вплив різних значень цих параметрів на силу удару, що дозволяє більш точно регулювати процес обробки.

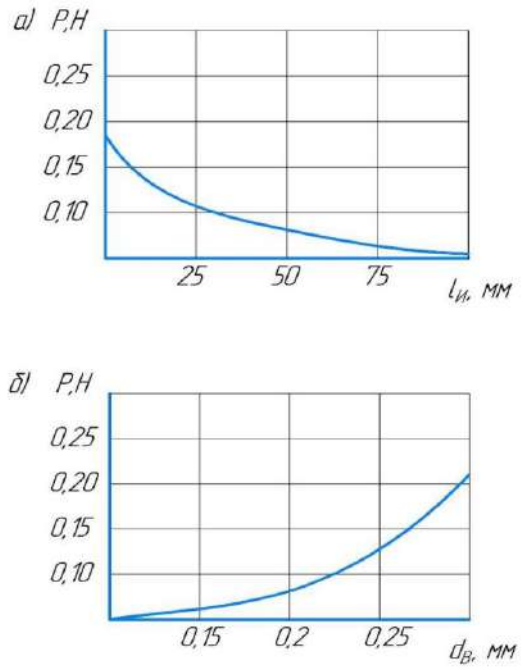

Рисунок 22 – Графіки залежності сили удару від характеристик гнучкого інструменту: а – залежність від довжини ворсу; б – залежність від діаметра ворсу.

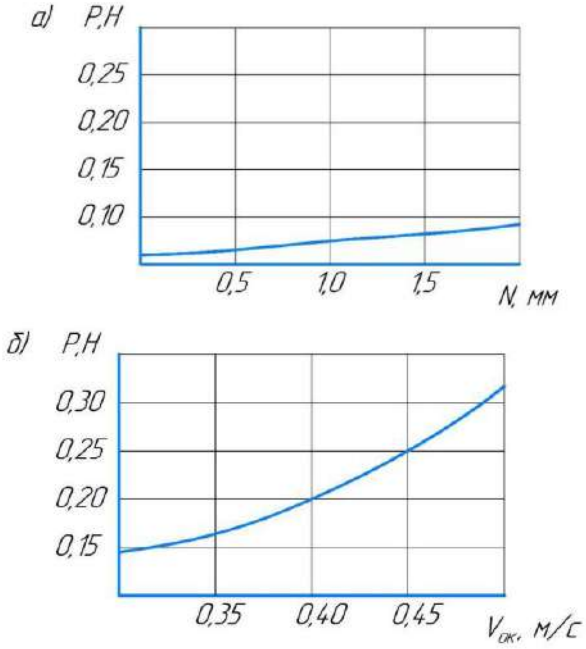

Рисунок 23 – Графіки залежності сили від технологічних параметрів обробки: а – залежність від натягу інструмента; б - залежність від швидкість обертання інструменту.

Висновки.

Було проведено аналітичні обчислення ступеня розподілу зон пластичної деформації, глибини зміцненого шару та однорідності процесу зміцнення.

В результаті досліджень було виявлено, що глибина пластично деформованого зміцненого шару та область деформації можуть бути точно визначені за допомогою аналітичних формул, які знаходять підтвердження в експериментальних дослідженнях.

Знаходження повного й однорідного покриття поверхні оброблюваного зуба відбитками від впливу дротяного інструменту свідчить про достатню рівномірність зміцненого шару по глибині. Це свідчить про ефективність та точність процесу обробки, що має важливе значення для забезпечення якості та довговічності оброблюваного виробу.

РОЗДІЛ 4 ПРИСВЯЧЕНО ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ПЛАКУВАННЯ РУЛЬОВОЇ РЕЙКИ.

4.1 Методика вибору оптимальних режимів та параметрів обробки гнучким інструментом

Для досягнення ефективності та максимальної продуктивності в плакуванні рульової рейки, було розроблено спеціальний алгоритм, який дозволяє систематизувати вибір оптимальних технологічних режимів.

Алгоритм включає кілька ключових етапів. По-перше, на основі аналітичних обчислень відбувається відбір конструктивних параметрів дротяного інструменту. Далі відбувається вибір можливих значень технологічних параметрів для процесу плакування. На завершальному етапі проводяться обчислення та оцінка деформаційних параметрів плакування, а також аналіз характеристик надійності та довговічності гнучкого інструменту. У разі виявлення несуперечливих результатів проводяться коригування початкових даних і повторний розрахунок параметрів процесу.

Цей алгоритм дозволяє оперативно вибрати необхідні технологічні режими для плакування рульової рейки з врахуванням необхідних експлуатаційних характеристик. Важливо враховувати, що неправильний вибір режиму обробки може призвести до передчасного зношування інструменту і низької якості обробленої поверхні. Також нераціональний режим може призвести до зайвого витрати ресурсів. Наприклад, в разі втомного руйнування ворсу вартість ремонту інструменту може становити від 25% до 50% від вартості обробки одного виробу [2].

Розрахунки максимального напруження, що виникає в гнучких компонентах під час деформаційного процесу, проводяться з використанням теорії гнучких пружних стрижнів за відповідною формулою.

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

де ω_i- Коефіцієнт моменту подоби;

β_i– силовий коефіцієнт подібності;

P_{maxi} - Максимальна контактна сила, Н;

l_I- Довжина згинається частини, мм;

d_B- Діаметр ворсу, мм;

J- момент осьової інерції, мм4. [16].

Згідно з дослідженнями та науковими роботами при нанесенні покриття за допомогою гнучкого інструменту найчастіше застосовуються універсальні та прості щітки дискового типу, які виготовлені з дроту різних видів сталі, включаючи: низьковуглецеву (ДСТУ 3282-74), леговану пружинну (ДСТУ 14963-78), вуглецеву інструментальну У7А, У8А (ДСТУ 938-75), металокорд (ДСТУ 14311-85), а також пасма канатів із сталі за ДСТУ 7372-79 [8], [14], [27].

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:

$$\sigma_{max} \leq [\sigma_В], \quad (18)$$

де $[\sigma в]$ – межа витривалості ворсу щітки.

Враховуючи відомості про діаметр дроту, силу удару ворсу та інші параметри процесу обробки, розумно використовувати гнучкий інструмент, який виготовлений із сталевого дроту відповідного класу - 1,

2, 2А або 3 [29]. Однак, якщо ми обираємо інструмент з міцністю, що відповідає заданим показникам, він може швидко витратитися через високий рівень втомного зношування. Використання дроту з такого матеріалу може бути неефективним через низький ресурс, що призведе до негативного впливу на економічний показник процесу плакування.

Обробка поверхні рульової рейки відбувається з урахуванням характеристик матеріалу рейки та покриття, які повинні відповідати встановленим експлуатаційним вимогам. В умовах постійного тертя, механічні та структурні характеристики покриття мають важливе значення для підвищення його стійкості до зносу. Тому, вибір матеріалу покриття та його властивості визначають ефективність та тривалість експлуатації рульової рейки.

Щоб нанести покриття на поверхню деталі, можна використовувати електро-механічну плакувальну (ЕМП) технологію у формі брусків. Цей процес може включати контакт гнучкого інструменту з різними фрикційними матеріалами, що дозволяє отримати складні та однорідні покриття.

Вибір параметрів формування матеріалу на поверхневому шарі деталей є результатом зіставлення технічної та економічної доцільності, основних вимог до вузла тертя, технічних та конструктивних обмежень, сумісності зі змащувальним матеріалом, а також можливості забезпечення стабільного значення коефіцієнта тертя у рухомому з'єднанні [10]. Важливими факторами, що впливають на вибір покриття, є товщина захисного шару та його рівномірний розподіл по оброблюваному виробі.

Мідь стала одним із найбільш поширених матеріалів основи покриття для роботи в маслі. При нанесенні мідного покриття коефіцієнт тертя у контакті щітки з деталлю знаходиться у діапазоні від 0,6 до 0,74 [18]. Проте, висока температура на поверхні тертя може призвести до схоплювання матеріалів на основі міді (бронзи), які мають низьку температуру плавлення, що в свою чергу може призвести до виривання

частинок матеріалу. Тому використання мідних сплавів і аналогічних матеріалів дозволяється лише у вузлах, де температурний режим на поверхнях тертя не перевищує 300 градусів Цельсія [24]. Наприклад, для обробки механізму рейки рекомендується використовувати мідно-цинковий сплав (латунь) Л63. Цей двокомпонентний сплав містить мідь на 65%, цинк на 37,5% та домішки до 0,5%. Покриття з латуні мають досить хороші механічні та експлуатаційні характеристики, підвищену антикорозійність порівняно з чистою міддю, але меншу теплопровідність та електропровідність [24].

Отже, у випадку фрикційних пар тертя, які функціонують у середовищі рідинного мастила, особливо мінеральних (або синтетичних) олій, рекомендується переважно застосовувати матеріали на основі мідних сплавів. Серед важливих функцій додаткового технічного обладнання та оснащення - це процес закріплення та фіксації виробів, які обробляються, у зручному для взаємодії з ними положенні, а також можливість переміщення деталей під час нанесення покриття. Для досягнення цих цілей можна використовувати універсальне або спеціалізоване обладнання, таке як маніпулятори, призми, обертачі, лещата, затискачі, кантувачі та роликові стенди.

Підбір обладнання потребує уважного аналізу технічного оснащення підприємства. Розгляд варіантів установки та пристосування слід проводити враховуючи наявне металеве обладнання та технічні можливості. Наприклад, при наявності кутової шліфувальної машини можна використовувати металеві щітки з ворсинками, що складаються з матеріалу покриття [3]. Однак, цей метод може не забезпечити точних параметрів обробки. Основні методи плакування спрямовані на обробку плоских або циліндричних поверхонь, і не дозволяють обробку під кутом. Тому для вирішення цієї проблеми потрібне спеціальне обладнання.

Для стандартизації процесу плакування рекомендується використовувати широко поширене обладнання, таке як вертикально-

фрезерний, радіально-свердлильний або універсально-шліфувальний верстат з можливістю кутової обробки. Приклад такого універсального обладнання зображений на малюнку 25.

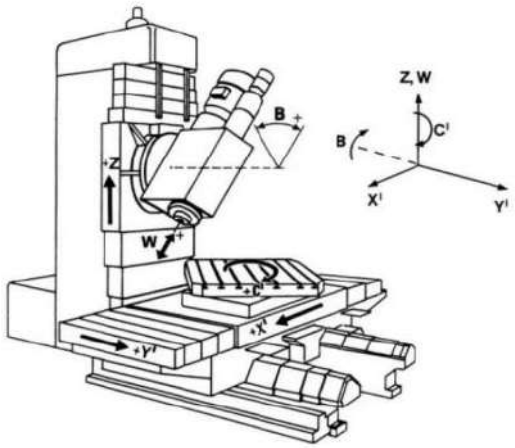

Рисунок 25 – Фрезерний верстат з можливістю кутової обробки

Необхідний кут обробки кермової рейки показаний малюнку 26.

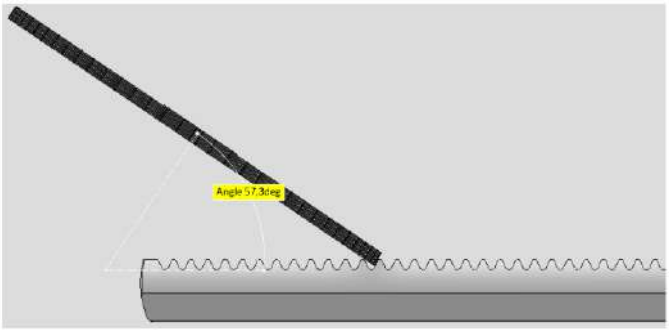

Рисунок 26 – Кут обробки зубів на прикладі кермової рейки lada granta

Під час обробки рульових реек стійка розташовується на столі таким чином, щоб бокова поверхня зубів була перпендикулярною до гнучкого інструменту, тоді як вісь шпинделя виробу розташована перпендикулярно оброблюваній поверхні. Сама рейка закріплена у жорсткому оснащенні. Регулювання кута обробки зубчастих рейок виконується або шляхом обертання столу, або за допомогою обертання оснастки, яка їх фіксує. Пересування рейки відносно інструмента

здійснюється вздовж станини залежно від технічних можливостей шпинделя верстата.

Коли використовується гнучкий інструмент з покриттям, проблема з підведенням електромеханічних покриттів може бути вирішена, оскільки покриття формується з ворсинок щітки. Однак варто враховувати, що такі щітки мають свої недоліки. Тому виникає питання про використання змінних металевих щіток під час такої обробки. Це дозволить пристосуватися до перспективних тенденцій щодо стандартизації та уніфікації методів обробки у сучасному машинобудуванні.

Для здійснення цього процесу було розроблено спеціальне обладнання, зразок якого можна побачити на малюнку 27.

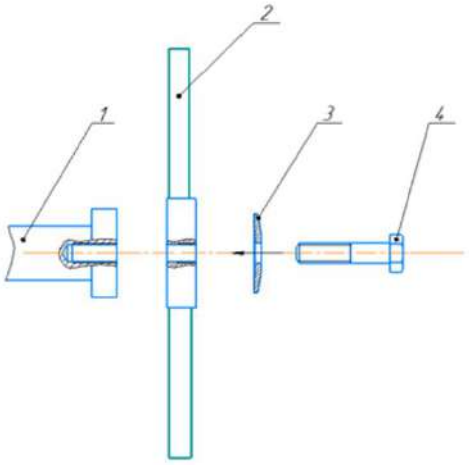

Рисунок 27 – Ескіз оснастки для змінної щітки 1 - спецпристосування; 2 – гнучкий інструмент; 3 – шайба; 4 – кріпильний елемент.

Тут металева щітка 2 прикріплюється за допомогою гвинтового з'єднання. Кріпильний елемент 4 може мати два різних виконання: "шпилька-гайка" або затяжний болт. Для збільшення площі контакту з'єднання, запобігання зсуву елементів і забезпечення надійної фіксації вводиться додаткова шайба 3, яка індивідуально підбирається під металеву щітку певного діаметру. Оснащення 1 закріплюється в цанговий патрон і встановлюється в шпиндель верстата.

Це обладнання не лише впливає на економічні аспекти процесу плакування, але й забезпечує можливість використовувати методику на найбільш поширеному обладнанні.

Варто відзначити, що у випадку з ворсинками-покриттями проблеми з методикою виникають рідше, але через це можуть виникнути складнощі у дотриманні технологічних параметрів обробки через інтенсивне зношування ворсинок, що може призвести до погіршення якості обробки. Тому необхідно дослідити конструкцію спеціального пристрою, який вирішить проблему подачі ЕМП за запропонованою методикою обробки під кутом.

Проблему подачі ЕМП до периферії робочого інструменту вдалося вирішити шляхом розробки спеціальної оснастки, яку представлено на малюнку 28.

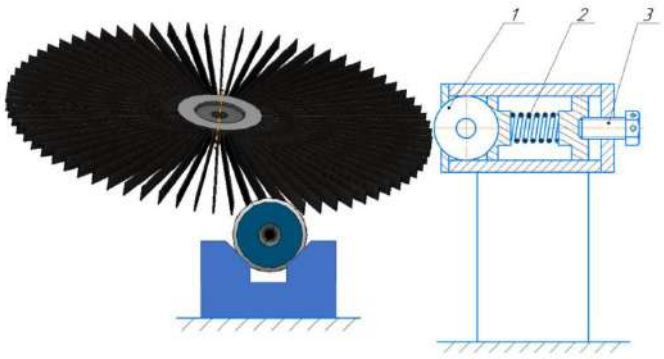

Рисунок 28 – Ескіз оснастки підведення ЕМП 1 – ЕМП; 2 – пружина; 3 – регулювальний болт.

Спеціальне обладнання було розроблене на основі патенту. Однак сам пристрій, зазначений у патенті, не можна використовувати, оскільки він призначений для обробки циліндричних виробів. Конструкція цього спеціального обладнання не є пристроєм плакування з вбудованим джерелом живлення та редуктором; замість цього, вона представляє собою пристосування, яке підводиться до інструменту. Тут еластомерно-металевий покриття (ЕМП) у формі бруска 1 зажимається з

використанням пружини 2, яка діє на розтяг, та фіксується за допомогою сил тертя. Притиск забезпечується регульованим болтом 3.

Отже, після вивчення всіх підготовчих операцій перед фрикційним плакуванням та опису особливостей вибору технічного обладнання, можна переходити до складання технологічного процесу обробки рульової рейки методом фрикційного плакування.

Розглянемо технологічний маршрут обробки бічної поверхні зуба рульової рейки. Технологічні процеси розробляються відповідно до стандартів ЕСТД та ЕСКД, де враховуються різноманітні матеріали, коментарі та обмеження, що містяться у керівній технічній документації підприємств. При проектуванні технологічного процесу обробки бічної поверхні зуба рульової рейки інтегральних кермових механізмів необхідно враховувати наступні особливості:

- Детальне вивчення можливих несправностей та передбачення програми відновлення цих деталей важливо для забезпечення ефективності та надійності рейки. Необхідно враховувати можливі дефекти деталей у кермовому інтегральному механізмі та їх вплив на показники робочої здатності рейки.

- Під час розробки технологічного процесу слід враховувати потенціал ремонтних організацій та їх рівень матеріального та технічного оснащення.

- Конструкція кермового механізму може відрізнятися залежно від виробника кермової рейки, що може впливати на технологічний процес, хоча зміни будуть незначними.

- Варто враховувати, що обробка може мати свої особливості залежно від типу та моделі верстата, наприклад, використання поздовжньої подачі інструменту до кермової рейки, що може здійснюватися переміщенням столу або шпинделя.

Таблиця 3 надає детальний огляд маршруту технологічного процесу плакування гнучким інструментом зубчастого сектора рульових рейок від моменту аналізу до перевірки працездатності.

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 ДСТУ 9.047.
015	Оцінно-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 відбувається у декілька етапів, ретельно спланованих для забезпечення оптимального результату. Початковим етапом є установка гнучкого інструменту у вигляді циліндричної щітки на спеціальне оправлення, яке потім закріплюється за допомогою кріпильного елемента. Оправлення встановлюється в цанговий патрон, який, у свою чергу, закріплюється в шпинделі верстата. Рульова рейка затискується в спеціальному механізмі та фіксується на станині верстата.

Для досягнення необхідного кута обробки бічної поверхні зубів рульової рейки використовується поворотний супорт шпинделя верстата з координатами ZX. Під час обертання дротового інструменту з певною кутовою швидкістю та підведення його до фіксуючого пристрою, що поздовжньо переміщається, забезпечується натяг рульової рейки в межах від 1 до 2 мм.

Брусок ЕМП Л63 кріпиться у спеціально розробленому оснащенні, притиск якого регулюється за допомогою регулювального елемента. Потім до периферії інструменту підводиться спецпристрій із закріпленим на ньому ЕМП. Протягом певного часу обробки при обертанні щітки створюється потрібна температура контакту інструменту з бічною поверхнею зуба рульової рейки, що забезпечує міцне зчеплення покриття зі сталлю 50, матеріалом рейки.

Цей процес дозволяє не лише досягти високої якості обробки, але й забезпечує уніфікацію обладнання, що може використовуватися в широкому спектрі випадків. Варто зазначити, що плакування може бути виконано безпосередньо після виготовлення кермової рейки на заводі-виробнику з невеликими змінами у технологічному процесі.

У таблиці 4 наведений перелік мінімально необхідного оснащення для процесу ПДМ, що відповідає вимогам технологічного процесу та стандартам пожежної безпеки та охорони праці. Більшість з цих засобів інструменту широко використовується на автотранспортних підприємствах, де вони стали невід'ємною частиною технологічних процесів. Цей перелік стане в пригоді для підприємств у визначенні необхідного обладнання та інструментів.

При вивченні цього списку можна врахувати різні аспекти, що відповідають потребам та можливостям підприємства. Такі речі, як

високоякісні інструменти, ефективні пристрої безпеки та захисні засоби, є ключовими у забезпеченні безпеки та ефективності виробничих процесів. При цьому необхідно враховувати можливості бюджету підприємства та здатність кадрового складу пристосуватися до нового обладнання.

Цей перелік може слугувати основою для розробки стратегії поступового впровадження необхідного обладнання та інструментів на підприємстві, що дозволить покращити ефективність виробничих процесів та забезпечити високий рівень безпеки працівників.

Таблиця 4

Відомість технологічного оснащення

Найменування	Тип та модель	Кількість
Стенд для перевірки та регулювання кутів установки коліс	КДС	1
Лінійка для перевірки сходження коліс автомобілів	ПСК-ЛГ	1
Установка для перевірки гідросистем рульового керування	К-465М	1
Манометр	МТА-2	1
Динамометр-люфтомір	К-524	1
Мийка ручна	AM1000 PM	1
Вертикально-фрезерний верстат	FV401	1
Цанговий патрон	SOVIS ER15	1
Комплект торцевих ключів	1.46.05.89	1
Металева циліндрична щітка	Lessman	1
Набір викруток	13С-550	1
Пристрій для змінних щіток у зборі	Нове	1
Пристосування підведення ЕМП	Нове	1
Пасатижі	-	1
Брусок елемент покриття	Л63	1
Комплект гайкових ключів	І-153	1
Мікротвердомір	ПМТ-3	1
Верстак	В 1	1
Настінна шафа для приладів	-	1
Вогнегасник	ОХЛ-10	1
Ящик з піском	-	1
Скриня для відходів	0.1-0.3-000-01	1

4.2 Висновок.

Після проведення аналітичного розрахунку технологічних параметрів виникло питання про підготовку до виконання методики ПГІ для кермової рейки. В цьому контексті були розглянуті аспекти вибору оптимальних режимів обробки, матеріалу для гнучкого інструменту, елементів матеріалу покриття і необхідного обладнання.

Створено алгоритм, який, базуючись на розрахунково-аналітичному дослідженні, дозволяє ефективно підібрати необхідні технологічні режими процесу ПГІ для формування поверхневого шару з потрібними характеристиками.

Проведено аналіз матеріалу для гнучкого інструменту, з урахуванням максимальної напруги, що виникає у ворсі, для вибору матеріалу ворсу відповідного класу.

Також розглянуто питання вибору елемента матеріалу покриття, і зроблено висновок, що для фрикційних пар, що працюють з рідинним мастилом, оптимальним варіантом є матеріали на основі мідних сплавів.

У зв'язку з тим, що обробка рульової рейки відбувається під кутом, запропоновано уніфіковану методику плакування, що дозволить застосувати цей метод на широкому спектрі обладнання. Для цього розроблено спеціальне оснащення для застосування змінних щіток та підведення ЕМП до гнучкого інструменту.

Після розгляду підготовчих питань розроблено технологічний маршрут обробки кермової рейки методом фрикційного плакування гнучким інструментом.

Також наведено необхідний перелік оснастки для проведення плакування рульової рейки.

Пріоритетним напрямком дослідження вибрано питання підвищення довговічності рульової рейки в області з'єднання черв'яка розподільника і зубчастого сектора. Для досягнення цієї мети пропонується використання методу поверхневої обробки, а саме -

фрикційного плакування гнучким інструментом зубчастого сектора рульової рейки.

Проведено літературний огляд з метою визначення причин несправностей рульової рейки та методів їх усунення. Оскільки існуючі методи відновлення зубів рульової рейки обмежені, вироблення альтернативного підходу є важливим завданням.

Аналіз кінематики обробки зубів кермової рейки гнучким інструментом показав, що фрикційне плакування можливе. У процесі плакування здійснюється обробка плоскої поверхні трапецієподібних зубів.

На основі математичної моделі та аналітичних розрахунків параметрів обробки розроблено технологічний маршрут плакування бічної поверхні зуба рульової рейки.

Розроблено методику стандартизації процесу плакування рульової рейки, що дозволить проводити технологічний процес на різноманітному обладнанні. Це було досягнуто завдяки розробці двох спеціальних пристроїв, які спрямовані на ефективне використання гнучких змінних інструментів та підведення елементів матеріалу покриття до робочої поверхні щітки.

Підготовлений маршрут був детально описаний та розглянутий на прикладі рульової рейки lada granta.

Загальні цілі магістерської дисертації щодо підвищення експлуатаційної довговічності рульової рейки методом фрикційного плакування успішно досягнуті.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Halderman, J. D. Automotive Steering, Suspension, and Alignment. Pearson, 2016. 480 p.

2. Heisler, H. Advanced Vehicle Technology. 2nd ed. Butterworth-Heinemann, 2002. 608 p.

3. Harrer, M., Pfeffer, P. (Eds.). Steering Handbook. Springer, 2016. 629 p.

4. Heißing, B., Ersoy, M. (Eds.). Chassis Handbook: Fundamentals, Driving Dynamics, Components, Mechatronics, Perspectives. Springer, 2010. 591 p.

5. Gillespie, T. D. Fundamentals of Vehicle Dynamics. Society of Automotive Engineers, 1992. 516 p.

6. Crolla, D. A. Automotive Engineering: Powertrain, Chassis System and Vehicle Body. Butterworth-Heinemann, 2009. 608 p.

7. Genta, G., Morello, L. The Automotive Chassis: Volume 1: Components Design. Springer, 2009. 645 p.

8. Borgeest, K. Automotive Mechatronics: Operational and Practical Issues. Springer, 2013. 241 p.

9. Bargende, M., Reuss, H. C. (Eds.). Automotive Steering Systems: Trends and Technologies. Springer, 2010. 454 p.

10. Rajamani, R. Vehicle Dynamics and Control. 2nd ed. Springer, 2012. 516 p.

11. Altan, T., Lilly, B. Processing and Applications of Surface Treatments in Metal Forming. Springer, 1992. 344 p.

12. Totten, G. E., Liang, H. (Eds.). Surface Modification and Mechanisms: Friction, Stress, and Diffusion. CRC Press, 2003. 1080 p.

13. Davis, J. R. (Ed.). Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance. ASM International, 2001. 296 p.

14. Lu, J. (Ed.). Laser Shock Processing of FCC Metals: Mechanical Properties and Microstructural Strengthening Mechanism. CRC Press, 2003. 144 p.

15. Brostow, W., Damarla, G., Deborde, J. L., Jaklewicz, M., Olszynski, P. Tribology of Polymeric Nanocomposites: Friction and Wear of Bulk Materials and Coatings. Elsevier, 2007. 784 p.

16. Tschätsch, H. Metal Forming Practise: Processes - Machines - Tools. Springer, 2006. 419 p.

17. Rudkins, R. H. Shot Peening Theory and Application. Springer, 1990. 291 p.

18. Bushlya, V., Zhou, J., Lenrick, F., Stahl, J. E. Surface Integrity of Hard Turned Steel with Application of Hardness Gradients. Springer, 2014. 251 p.

19. Yao, Z., Chen, X., Wu, D., Zou, Y. Surface Deformation-Induced Hardening: Principles, Applications, and Recent Advances. Springer, 2020. 314 p.

20. Blunt, L., Jiang, X. Advanced Techniques for Assessment Surface Topography: Development of a Basis for 3D Surface Texture Standards “SURFSTAND”. Kogan Page Science, 2003. 358 p.

21. Johnson, K. L. Contact Mechanics. Cambridge University Press, 1987. 452 p.

22. Barber, J. R. Elasticity and Contact Mechanics. Springer, 2018. 606 p.

23. Hills, D. A., Nowell, D. Mechanics of Elastic Contacts. Butterworth-Heinemann, 1994. 300 p.

24. Popov, V. L. Contact Mechanics and Friction: Physical Principles and Applications. Springer, 2010. 362 p.

25. Lacey, R., Lacey, S. Elastic and Plastic Contact of Rough Surfaces: Theoretical, Experimental, and Numerical Analysis. Elsevier, 2015. 416 p.

26. Ciavarella, M., Demelio, G., Barber, J. R. Elastic-Plastic Contact of the Rough Surfaces. Springer, 2000. 240 p.

27. Maugis, D. Contact, Adhesion and Rupture of Elastic Solids. Springer, 2000. 420 p.

28. Goryacheva, I. G. Contact Mechanics in Tribology. Springer, 1998. 390 p.

29. Stupkiewicz, S. Mechanics of Contact and Interfaces. Springer, 2010. 259 p.

30. Johnson, K. L., Greenwood, J. A. Anelastic Contact of Rough Surfaces. Springer, 2001. 380 p.

31. Mattox, D. M. The Foundations of Vacuum Coating Technology. Springer, 2003. 949 p.

32. Davis, J. R. (Ed.). Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance. ASM International, 2001. 296 p.

33. Bunshah, R. F. (Ed.). Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings: Science, Applications and Technology. 2nd ed. Noyes Publications, 1994. 887 p.

34. Gottstein, G. Physical Foundations of Materials Science. Springer, 2004. 502 p.

35. Sudheer, N., Harsha, S. P., Jayathirtha Rao, Y. Surface Modification Technologies: An Engineer's Guide. CRC Press, 2020. 362 p.

36. Budinski, K. G. Surface Engineering for Wear Resistance. Prentice Hall, 1992. 240 p.

37. Schwarzkopf, P., Kiefer, R. Refractory Hard Metals: Borides, Carbides, Nitrides, and Silicides. Macmillan, 1953. 580 p.

38. Shetty, D. K., Wright, I. G. (Eds.). Surface Modification and Alloying. ASM International, 1981. 232 p.

39. Hihara, L. H., Adler, R. P., Latanision, R. M. (Eds.). Environmental Degradation of Advanced and Traditional Engineering Materials. CRC Press, 2014. 726 p.

40. Rickerby, D. S., Matthews, A. Advanced Surface Coatings: A Handbook of Surface Engineering. Springer, 1991. 390 p

41. ASM Handbook, Volume 7: Powder Metal Technologies and Applications. ASM International, 1998. 608 p.

42. Chawla, K. K. Metal Matrix Composites. Springer, 2013. 548 p

43. ASM Handbook, Volume 5: Surface Engineering. ASM International, 1994. 944 p.

44. Davis, J. R. (Ed.). Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance. ASM International, 2001. 296 p

45. Ghosh, A. Advanced Thermally Assisted Surface Engineering Processes. Springer, 2014. 394 p.

46. Dutta Majumdar, J., Gnanamoorthy, J. B. Surface Modification of Magnesium and its Alloys for Biomedical Applications: Volume II: Modification and Coating Techniques. Springer, 2015. 218 p

47. Suryanarayana, C., Norton, M. G. X-Ray Diffraction: A Practical Approach. Springer, 1998. 260 p

48. Liu, S., Li, X., Zhang, G., Zhang, J. Surface Modification of Metals by Ion Beams, Sputtering, and Laser-Induced Plasma. Elsevier, 2012. 544 p

49. Aghajani, H. Surface Modification of Biopolymers. Springer, 2015. 307 p

50. Stott, F. H. Physical Metallurgy and Advanced Materials. Butterworth-Heinemann, 2019. 628 p.

ДОДАТКИ