

ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерно-технологічний
Кафедра механічної та електричної інженерії

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи на здобуття ступеня вищої освіти

магістр

на тему: «Удосконалення експлуатаційних характеристик зубчастих передач за допомогою поверхневого пластичного зміцнення»

KPM.133ГМмд_21.01.000 ПЗ

Виконав: здобувач вищої освіти
за освітньо-професійною програмою
«*Машинні засоби механізації
сільськогосподарського виробництва*»
спеціальності 133 «*Галузь
машинобудування*»
ступеня вищої освіти *магістр*
групи 133ГМмд_21
БАБЕНКО Владислав

Керівник: канд. с.-г. наук, доцент
ОПАРА Надія

Полтава – 2025 року

ВСТУП

Зубчасті передачі відіграють важливу роль у сільськогосподарській техніці, забезпечуючи передачу обертового моменту і зміну швидкості обертання між різними вузлами і агрегатами машин. Їх використовують у тракторах, комбайнах, сівалках, косарках та інших видах сільськогосподарської техніки.

Основні функції зубчастих передач у сільському господарстві:

- 1) передача потужності: Зубчасті передачі забезпечують передачу потужності від двигуна до різних механізмів, таких як валів або робочі органи техніки;
- 2) регулювання швидкості: За допомогою редукторів і коробок можна змінювати швидкість обертання валів, що дозволяє техніці адаптуватися до різних умов роботи (наприклад, змінювати швидкість руху трактора або швидкість обертання ріжучого пристрою);
- 3) зміна напрямку обертання: У деяких випадках зубчасті передачі використовуються для зміни напрямку обертання робочих органів;
- 4) збільшення або зменшення крутного моменту: Залежно від співвідношення зубчастих коліс, передача може або збільшувати крутний момент (наприклад, при необхідності роботи на низьких швидкостях), або зменшувати його для високошвидкісної роботи.

Зміцнення зубчастих коліс має ключове значення для підвищення їх надійності, довговічності та стійкості проти зношування, особливо у важких умовах експлуатації, характерних для сільськогосподарської техніки. У процесі роботи зубчасті передачі піддаються високим навантаженням, тертю та впливу агресивного середовища (пил, бруд, волога), що може призвести до швидкого зношування зубів.

Причини необхідності зміцнення зубчастих коліс.

1. Збільшення терміну служби: зміцнені зубчасті колеса мають велику стійкість до механічного зношування та деформацій, що значно продовжує термін їх експлуатації.

2. Підвищення міцності: сільськогосподарська техніка працює за умов високих навантажень, і зміцнення дозволяє зубцям витримувати великі сили при передачі обертового моменту без пошкоджень.

3. Зниження ризику поломок: зміцнені поверхні зубів менш схильні до розтріскування, фарбування та інших дефектів, що зменшує ймовірність виходу з ладу важливих вузлів техніки.

4. Опір втомним руйнуванням: при тривалих циклічних навантаженнях зміцнені зуби менш схильні до втомних руйнувань, що особливо важливо для обладнання, яке працює в інтенсивних режимах.

5. Стійкість до корозії: У деяких випадках застосовуються спеціальні методи зміцнення, які збільшують стійкість матеріалу до впливу агресивних середовищ, таких як волога та хімікати.

Таким чином, зміцнення зубчастих коліс є важливим фактором для покращення характеристик сільськогосподарської техніки, що безпосередньо впливає на її продуктивність та експлуатаційні витрати.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Зношування зубчастих передач

Однією з основних умов, якій має задовольняти технологічне обладнання, є його безвідмовна робота з необхідною надійністю відповідно до технічних умов експлуатації протягом заданого періоду часу. Основними причинами виходу з ладу деталей є знос, на частку якого припадає 60-80% від загальної кількості виходів з ладу вузлів і деталей, а також втомні руйнування. Тому особливу увагу слід приділяти підвищенню їх зносостійкості і втомної міцності, що суттєво залежать від правильного вибору матеріалу, технологічних, конструкторських і інших методів підвищення надійності і довговічності, закономірності впливу різних чинників.

На даний час найбільш повне пояснення явищ, що відбуваються при терті, наведено в молекулярно-механічній теорії, розробленій Г.Е. Дерягіним і І.В. Крагельським [1]. За цією теорією тертя має подвійну молекулярно-механічну природу. Воно зумовлено об'ємною деформацією матеріалу і подоланням міжмолекулярних зв'язків, що виникають на плямах дотику між зближеними ділянками поверхонь, що труться. Молекулярна взаємодія проявляється у вигляді адгезії і схоплювання, що механічне обумовлено об'ємним деформуванням і взаємним впровадженням елементів стиснутих поверхонь.

Механізм зносу за І.В. Крагельським являє собою процес механічного руйнування, ускладненого фізико-хімічними змінами поверхневих шарів матеріалу. Руйнування поверхонь контактуючих деталей відбувається внаслідок наявності нерівностей на поверхнях тертя, що спричиняють виникнення напружень і деформацій в зоні контакту.

Число навантажень, необхідне для руйнування, залежить від початкової міцності матеріалу, його опору втомі і умов навантаження. У загальному вигляді, на підставі проведених досліджень, М.М. Хрущов і М.А. Бабічев [2, 3] запропонували таку класифікацію зношування (див. рисунок 1.1).

Рисунок 1.1 – Класифікація зношувань

У той же час в роботах Б.І. Костецького [4, 5] на підставі аналізу суті явищ, що протікають в поверхневих шарах деталей машин, зношення підрозділяється на п'ять видів: знос захопленням першого роду, окислювальний знос, тепловий знос (захоплення другого роду), абразивний знос і відпоподібний (втомний) знос.

У результаті зносу відбувається поступова зміна розмірів деталей спряження. Мірою зносу є сумарна одиниця руйнування, яка визначається зменшенням лінійних розмірів деталі, її об'єму або маси. Основною мірою зносу є лінійний знос, який визначається зміною розмірів деталі по нормалі до поверхні тертя. Внаслідок того, що знос є функцією часу, для його кількісної характеристики застосовується показник – швидкість зносу, тобто відношення лінійного зносу деталі до часу, протягом якого визначається знос.

Аналіз втомного характеру механічних і корозійно-механічних видів зношування важконавантажених вузлів тертя наведені в роботах [6, 7]. В ході проведення досліджень автори визначили, що втомні тріщини, що призводять до викришування зубів шестерень, розвиваються не з глибини, а з поверхневого шару. При наявності рідкого змащення на контактуючих поверхнях з тріщину проникає масло і при відносному переміщенні деталей, що труться відкритий кінець тріщини закривається, виникає високий тиск, що розклинає тріщину. З плином часу при наступних навантаженнях тріщина поглиблюється і сколює з поверхні частинки матеріалу, утворюючи ямки (пітінги).

Однією з основних причин недовговічності важконавантажених вузлів тертя є інтенсивне абразивне зношування деталей [2], тобто дріпання металу безліччю твердих зерен. В результаті, як показано в роботі [8], зношування поверхні металів абразивними частинками відбувається шляхом зрізу відриву, втомного руйнування при порушенні фрикційних контактів в пружній області і багаторазового передеформування (переклепу).

У зв'язку з посиленням режимів і підвищенням ресурсу роботи обладнання чимала кількість дефектів і поломок припадає на частку саме важконавантажених зубчастих передач [9, 10]. Причинами відмов їх роботи є:

- конструктивні недоліки;
- недостатня точність виготовлення і монтаж;
- висока вібропруженість елементів конструкції коліс;
- дефекти технології механічної обробки і складання;
- застосування об'ємного і поверхневого зміцнення без урахування конструктивних особливостей контактної пари і умов експлуатації.

У роботі [11] наведені приклади зносу робочих профілів зубів під дією ударних навантажень при взаємодії зубів у контакт один з одним. Показано, що найбільш часто в практиці зустрічаються характерні види зносу по головці зуба, по робочому профілю зуба, по ніжці зуба.

Проникнення твердих тіл (піску, пилу, забрудненого масла і ін.) у вузол тертя призводить до інтенсивного руйнування поверхонь тертя, внаслідок мікропластичної деформації і зрізу металу абразивними тілами [12].

На процес абразивного зношування зубчастих передач має вплив велика кількість різних факторів, у тому числі основними є твердість, міцність, розміри і форма абразивного тіла, механічні властивості поверхні зубів, співвідношення твердості абразивних частинок і металу, швидкість відносного переміщення і величина питомих тисків на поверхнях тертя [13, 14].

Великий вплив на довговічність вузлів тертя, особливо на початковий період їх роботи, надає якість поверхні, отриманої при технологічному припрацьовуванні [15].

Д.Н. Гаркунов і інші [16] встановили, що при терті ковзання, незалежно від початкової шорсткості робочих поверхонь, до кінця припрацьовування встановлюється для кожної з поверхонь пари тертя певна, властива даному поєднанню матеріалів і умов тертя шорсткість, яка зберігає стабільність при подальшому постійному режимі тертя. Відхилення на два і вище класи чистоти шорсткості від оптимальної негативно позначається на зносостійкості, так як в процесі припрацьовування зростає знос контактуючих при високих питомих тисках поверхонь грубої шорсткості.

Тривалість припрацьовування тим коротше і об'єм зношеного металу тим менше, чим ближче початкова шорсткість по класу до експлуатаційної шорсткості. І тут необхідно враховувати, що опір зубів колес заїданню визначається шорсткістю їх поверхонь, що виходить після припрацьовування, а не шорсткістю, що виникла внаслідок остаточної обробки. Внаслідок цього початковий період роботи третьових елементів найбільш небезпечний щодо заїдання [17].

Руйнування зубів приводу кульових млинів при тривалій роботі, можна, в основному, поділяти на два види:

1) поломка зуба від вигину в зоні його переходу в обід, де має місце висока концентрація напружень (рисунок 1.2);

2) пошкодження робочої поверхні зуба, яке зазвичай починається з викришування і може привести до обминання, задирам і поломок зуба (рисунок 1.3).

У основи недостатньо міцного зуба при підвищеній концентрації напружень на розтягнутій стороні з'являється втомна тріщина, яка, поступово поширюючись вглиб тіла зуба і уздовж його заснування, призводить до руйнування.

Причинами втомного викришування і відшаровування поверхневого шару є: недостатній запас міцності; дефекти термообробки; невідповідність в'язкості мастила; підвищена шорсткість поверхні; спотворення профілю зуба внаслідок інтенсивного зносу або заїдання; локалізація контакту внаслідок перекосів корпусу, похибок по напрямку зуба або надмірної величини поздовжньої модифікації [18].

Рисунок 1.2 – Руйнування зуба від згину

Рисунок 1.3 – Викришування поверхні зуба

У деяких випадках зуб може зламатися або отримати неприпустиму залишкову деформацію у результаті великої короткочасної (навіть одноразового) перевантаження. На рисунку 1.4 показаний фрагмент катастрофічного руйнування зубів.

Рисунок 1.4 – Катастрофічне руйнування зубів

Відкриті передачі схильні до абразивного зносу внаслідок попадання між зубами твердих частинок пилу або бруду.

Знос супроводжується потоншенням зуба і порушенням його поверхні.

Зуби розраховують: а) на витривалість і статичну міцність при згині; б) на контактну витривалість активних поверхонь (на викригування).

Типові пошкодження робочих поверхонь зубчастих передач визначаються конструкцією і особливостями експлуатації. Сили, що діють на зубці, викликають їх згин, стиск і тангенціальні деформації за рахунок тертя в зоні контакту.

Перенапруження зубців може викликати концентрацію навантаження по довжині зуба внаслідок неправильного монтажу (найчастіше непаралельності валів), а також через грубу обробку поверхні западин зубів, заклинювання зубів при нагріванні передачі і недостатньої величини бічних зазорів. Найчастіше спостерігаються відколи кутів зубів, пов'язані з концентрацією навантаження.

Абразивний знос зубів – основний вид руйнування відкритих передач. Вид поверхні – ряд дрібних паралельних смуг, перпендикулярних осі колеса. Знос поверхневого шару, що має найбільшу твердість, призводить до значного збільшення швидкості зношування. В процесі зносу зменшується розмір зуба по товщині, збільшуються зазори в зацепленні, порушується евольвентні робочі ділянки профілю зуба.

На рисунку 1.5 показано потоншення зубів при роботі з двох сторін зуба, зверху для порівняння показаний новий зубчастий вінець до експлуатації.

Рисунок 1.5 – Потоншення зубців при роботі із двох боків зуба

У початковий період внаслідок неточностей виготовлення, монтажу навантаження на їх окремих ділянках розподіляється нерівномірно. Це призводить до місцевого руйнування масляної плівки, змінання і стирання нерівностей на найбільш навантажених ділянках, на поверхнях зубів з'являються натири із металевим блиском.

Найбільший знос робочих поверхонь спостерігається на ніжках зубів, де має місце максимальне ковзання. Самий швидко розвиваючийся вид ушкодження – руйнування починається з утворення тріщини і закінчується сколом або полумкою

зубів. Тріщини починають з'являтися в основі зубів на стороні розтягнутих волокон і розташовуються перпендикулярно до робочих поверхонь зубів. Виникнення тріщин призводить з плином часу до руйнування зубів і часто до пошкодження інших деталей механізму через попадання в них шматків зубів. Зменшення шорсткості робочих поверхонь зубів значно знижує миттєву температуру в зоні контакту, підвищує довговічність і покращує умови роботи зубчастої передачі [19].

Складність і неоднозначність чисельної оцінки процесу зношування підтверджується великою кількістю публікацій, присвячених цій темі. Найбільш чіткий, системний підхід до розробки методів розрахунку на знос дано Дроздовим Ю.М. в роботі [20]. Однак труднощі отримання інформації про чисельні значення трибологічних чинників і їх зміни в конкретній контактній зоні не дозволяють реалізувати підхід Дроздова в інженерних розрахунках зносостійкості контактних поверхонь. Так, наприклад, в роботі [21] стверджується, що довговічність знову спроектованої передачі, скільної до втомних руйнувань, можна оцінити в якійсь мірі тільки на підставі досвіду експлуатації аналогічних передач, що працюють в умовах, близьких до тих, в яких буде працювати спроектована.

Дроздовим Ю.М. була розроблена схема зносу поверхонь зубів, що дозволяє враховувати значну кількість факторів, що впливають на знос: фізичних, хімічний, механічних властивостей самого матеріалу, характеристик змащення, агресивності середовища, умов навантаження, температури, топографії контактуючих поверхонь і т.д.

Як критерій зносу пропонувалося також використовувати питому потужність, затрачену на подолання тертя контактних поверхонь [22, 23]. Залежність об'ємного зносу від роботи сил тертя була також використана Флейшером при розробці енергетичної теорії зносу [24].

В. Онищенко [25] увів в динамічну модель змінне передавальне число, внаслідок спотворення в результаті зносу зубів форми профілів.

Узагальнюючи матеріали цих та інших робіт, можна виділити наступні види пошкоджень зубчастих коліс:

- злам зубів (втомний, статичний, через потрапляння стороннього предмета, тріщини, сколювання торців, сколювання вершин);

- контактні пошкодження зубів (втомне викридування, відшарування поверхневого шару);
- знос зубів (абразивно-механічний, заїдання, піднутрення);
- пластичні деформації робочих поверхонь зубів;
- корозія.

Аналізуючи виконані дослідження ряду авторів по роботі кульових млинів і заходи щодо підвищення їх ресурсу роботи, а також дослідження в області підвищення зносостійкості деталей в машинобудуванні, оцінку зносостійкості важконавантажених зубчастих передач, нами встановлено, що, в даний час, існує цілий ряд завдань дослідницького характеру, розрахункового і технологічного напрямку, що дозволяють продовжити дослідження в напрямку підвищення ресурсу важконавантажених зубчастих передач рудорозмельних млинів.

Основними напрямками дослідження щодо підвищення ресурсу роботи зубчастих передач приводу кульових млинів і млинів в цілому, є наступне:

- на стадії проектування необхідний вибір раціональних геометричних параметрів евольвентного зачеплення зубчастих передач, що впливають на зносостійкість;
- облік динамічних параметрів роботи млина, що має істотний вплив на зносостійкість поверхні зубчастих зачеплень;
- вибір способу поверхневого зміцнення зубів передач;
- розробка прогресивної технології виготовлення зубчастих коліс великого модуля і розмірів.

Запропоновані напрямки досліджень і отримані позитивні результати дозволять істотно підвищити термін служби важконавантажених зубчастих передач.

1.2 Підвищення довговічності зубчастих коліс

Підвищення довговічності важконавантажених зубчастих коліс є досить складним і взаємопов'язаним комплексом різних проблем. Недооцінка факторів, що впливають на термін служби коліс на всіх етапах їх виготовлення і експлуатації, різко знижує терміни служби обладнання в цілому. Рішення проблем експлуатації

довговічності вимагає використання всього арсеналу технологічних засобів з метою забезпечення високої якості робочих поверхонь, так як саме поверхневий шар надає великий вплив на їх експлуатаційні характеристики.

Підвищення плавності передачі, і тим самим зниження динамічних навантажень і шуму може бути досягнуто різними способами. Жорсткість зачеплення, що надає певний вплив на плавність роботи передачі, істотно залежить від товщини ободу h_0 зубчастого колеса. Зміною конфігурації тіла колеса можна домогтися зниження жорсткості зачеплення, однак, значне зменшення товщини ободу і товщини тіла вінця призводить до зменшення їх міцності.

В роботі [26] показано, що зниження параметричних коливань системи і деяке підвищення плавності роботи передачі можна досягти зменшенням величини пружних деформацій зубів в точках переспряження. Коефіцієнт перекриття ε має дорівнювати цілому числу, тоді в зачепленні буде знаходитися завжди одне і те ж число пар зубів. Однак, внаслідок зносу кромки зубів, пружних деформацій елементів конструкції коліс і інших чинників, підтримувати коефіцієнт перекриття, що точно дорівнює кількості дуже важко. Тому ефективним і широко поширеним в практиці методом, що підвищує експлуатаційні показники роботи зубчастих передач, є модифікація профілю зубів.

Як показано в роботі [27], є два поняття модифікації: природна і отримана навмисною зміною форми профілю зубів. Під природною модифікацією профілів зубів розуміють деякий знос головки зубів в процесі роботи коліс або деяке зішліфовування частини профілю на голівці, що викликається зменшенням відтискання шліфувального крута в момент його виходу із зачеплення з колесом. Однак, як зазначається в роботі [28], модифікація навмисною зміною форми профілю зубів, як спосіб покращення експлуатаційних показників передач, є більш ефективною. Застосування профільної модифікації дозволяє знизити нерівномірність розподілу навантаження по ширині зуба [29, 30] і в деякій мірі компенсує дію помилок виготовлення і пружних деформацій, тим самим підвищуючи плавність роботи передачі [31].

Існує кілька видів профільної модифікації коліс, хоча на практиці застосовують в основному два види модифікації ведучих та ведених коліс, що зображені на

рисунку 1.6. Це фланкування головок зубів, а також головок і ніжок зубів. Експериментальними дослідженнями [32] було встановлено, що в результаті збільшення такого параметра як висота зрізу k головки зуба, ефективність профільної модифікації підвищується.

На ефективність профільної модифікації впливають не тільки параметри, але і форма фланкування. Ефективність різних форм профільної модифікації, а саме прямолінійної та криволінійної (кругова форма), автори [33] оцінювали по зниженню питомої окружної динамічної сили ω_{nv} та рівня шуму зубчастих коліс. Було встановлено, що для важковантажених коліс кругова форма є більш ефективною, так як для цієї форми значення коефіцієнта зниження питомої колової динамічної сили K_{pr} , що є відношенням ω_{nv} до профільної модифікації до ω_{nv} після модифікації, вище, ніж для прямолінійної форми.

Рисунок 1.6 – Параметри профільної модифікації:

а – профільна модифікація головки зуба; б – профільна модифікація головки та ніжки зуба

Поряд з модифікацією профілю, вплив на надійність за міцністю зубів коліс, особливо за допустимими напруженнями згину надає значення модуля m [34]. Однак крупномодульні колеса менш чутливі до перевантажень, а неоднорідності матеріалу і похибки виготовлення в меншій мірі впливають на міцність зубів. Тому для важковантажених зубчастих передач рекомендується застосовувати крупномодульні колеса, проте при збільшенні модуля знижується їх контактна витривалість і протизадирна стійкість.

Зі збільшенням відносної ширини вінця b/m знижується опір зубів всіма видами руйнування. Навантаження по ширині зубчастого вінця розподіляється нерівномірно, що пов'язано з деформацією зубів, крученням ободів і валів, згином валів та ін.

Як зазначалося вище, під природною модифікацією профілів зубів розуміють певний знос головок зубів в початковий період їх роботи. Інакше цей період можна уявити як заключний етап процесу виготовлення виробу або його технологічне припрацьовування.

В сучасних машинах до зубчастих коліс висувають високі вимоги. Зубчасті колеса кульових млинів є важконавантажених деталями. Зуби коліс відчувають високі тиски в зоні контакту. Питомі тиску в контакті досягають 0,025...0,035 МПа.

Встановлено, що більшість зубчастих коліс в процесі роботи зазнають динамічних навантажень, що змінюються по симетричному або асиметричному знакозмінному циклу. Неминучі дефекти форми і взаємного розташування зубів в передачах викликають неплawnу роботу передавального механізму, що характеризується шумом, вібраціями і додатковими динамічними навантаженнями, виникаючими як безпосередньо на зубах передачі, так і в вузлах приводу.

Найбільш поширеним способом отримання зубчастих коліс є нарізання черв'ячною фрезою на зубофрезерних верстатах. Така обробка призводить до відхилення основного кроку на всіх спряжених зубах передачі, яке для 7...8-го ступенів точності зубчастих коліс може доходити до 22-25 мк. Тому, щоб повніше і правильніше оцінювати міцність зубчастих коліс і енергетичні резерви матеріалу, потрібно обов'язково оцінювати опір матеріалів циклічним і ударно-циклічним навантаженням [35].

У тих випадках, коли експлуатаційна міцність зубчастих коліс визначається втомною міцністю зуба, стан поверхневого шару набуває особливо важливого значення. Слід зазначити, що наведені в літературі дані про вихід з ладу 10-40% зубчастих коліс в результаті втомних поломок зуба недостатньо повно відображають справжній стан питання. Автори цих робіт не враховують конструктивних змін деталей, застосування більш легованих сталей, збільшення

модуля зубчастих коліс. Всі ці заходи дозволили знизити відсоток втомних руйнувань зубчастих пар, але привели до істотного подорожчання і збільшення маси конструкцій. Підвищення модуля коліс, крім того, привело в ряді випадків до зниження контактної міцності зубів, до зниження їх стійкості проти заїдання.

Істотний вплив на міцність важконавантажених зубчастих коліс надають конструктивні і технологічні концентратори напружень такі, наприклад, як форма галтелі і чистота обробки западин.

При проектуванні і нарізанні зубчастих коліс не завжди вибираються оптимальні форми і розміри галтелей зубів. Висір оптимального радіуса перехідної галтелі зуба дозволяє знизити величину K_p на 20-25%. Мала величина радіуса галтелі зуба призводить до високої концентрації напружень в галтелі $K_p = 1,9 \dots 2,15$ і швидкого руйнування зуба.

Міцність зубів зубчастих коліс залежить не тільки від радіуса галтелі, але і від шерсткості поверхні галтелі зуба. Вплив шерсткості галтелі і дефектів на її поверхні може виявитися набагато сильніше, ніж наявність самої галтелі, особливо для твердих матеріалів. При виготовленні зубчастих коліс 7-8-го ступеня точності шліфування за галтелями часто вже не проводиться. В галтелях зубів залишаються риски, шерсткість поверхні відповідає 12,5-6,3 мкм.

Припрацювання зубчастих коліс представляє собою відносно нетривалу їх роботу в умовах, близьких до експлуатаційних, з метою виявлення і усунення прихованих дефектів, і відбувається в результаті пластичної контактної деформації або зношування контактних поверхонь [36]. Технологічне припрацювання залежить від ступеня нерівномірності розподілу навантаження, твердості робочих поверхонь, коєвої швидкості, часу роботи, мастильних матеріалів та інших чинників. Зазвичай припрацювання відбувається більш інтенсивно в перші години роботи передачі, коли навантаження по ширині вінця розподіляється найбільш рівномірно.

Для забезпечення надійності і довговічності важконавантажених зубчастих передач під час експлуатації, збереження регламентуючих зазорів і запобігання від пошкоджень спряжень пар тертя обкочування здійснюють вхолосту з поступовим їх навантаженням.

В основі процесу припрацювання, тобто переходу від початкового стану до робочого, лежать складні механічні, фізичні і хімічні процеси. Головним в процесі припрацювання слід вважати докорінну зміну властивостей тонких поверхневих шарів робочих поверхонь тертя зубів, пов'язану із виникненням специфічних вторинних структур на поверхнях спряжених деталей [37]. Виниклі структури блокують робочі поверхні деталей від безпосереднього контакту і неминуче пов'язаних з цим ушкоджень.

Значення періоду припрацювання особливо велике для важконавантажених зубчастих передач, так як вони працюють в умовах високих питомих навантажень, збільшених температур, і при недостатньому підводі змащення. Внаслідок цього змащення повинно безперебійно надходити в необхідній кількості в вузол тертя з метою поліпшення умов його роботи і, відповідно, підвищення довготривалості обладнання в цілому.

Всі ці технології здатні поліпшити припрацювання і певно підвищити довговічність зубчастих коліс, але радикально змінити ситуацію вони не можуть. Очевидно, вони доречні при спільному використанні з іншими технологіями, зокрема, з технологіями поверхневого зміцнення, які повністю змінюють стан поверхні деталей як по структурі так і за фізико-механічними властивостями.

При всіх основних видах навантажень поверхневі шари металу виявляються найбільш напруженими. Разом з тим ці шари найбільш ослаблені, так як на робочій поверхні зубчастих коліс зосереджена максимальна кількість концентраторів напружень (рисли, подрізи, галтели тощо).

Тому технологічні процеси, пов'язані з механічним зміцненням робочої поверхні зубчастих коліс і викликають підвищення згинальної міцності їх, є перспективними для сучасного машинобудування.

Широке поширення отримує один з методів поверхневого деформаційного зміцнення зубчастих коліс – наклеп дробом. Численні експерименти і заводська практика довели високу ефективність зміцнення дробом різноманітних деталей, виготовлених з чорних і кольорових металів. Особливо ефективним є застосування деформаційного зміцнення дробом позначилося на деталях з поверхневими

концентраторами напружень і з поверхнею, що втратила вуглець, працюючих при циклічних навантаженнях [35].

Цим питанням присвячені роботи М.М. Саверіна, І.Б. Кудрявцева, І.М. Шашина, М.А. Карасьова та інших. Сутність процесу наклепу дробом полягає в тому, що поверхня остаточно виготовленої деталі піддається холодної пластичній деформації за допомогою ударного імпульсу чавунним або сталевим дробом діаметром від 0,3 до 2,5 мм.

Позитивний ефект поверхневого деформаційного зміцнення сталей, які піддано хіміко-термічній обробці, пояснюється власним зміцненням металу в результаті пластичної деформації і збуренням стискаючих напружень в наклепаних поверхневих шарах деталей.

В процесі наклепу має місце якась зміна мартенсіту (дисперсійне твердіння) і випадіння карбідів не за всім об'ємом зразка (як в результаті відпускання), а за площинами ковзання. Випавши дисперсні карбіди заклинюють площини, викликають ковзання по новим площинах, в результаті чого метал зміцнюється.

Структурні перетворення в поверхневому шарі, а також пластична деформація цього шару, що виникає при наклепі, призводять до збільшення його об'єму і, внаслідок опору з боку недеформованих внутрішніх шарів, до пружного стискання, що викликає в поверхневих шарах залишкові стискаючі напруження, а всередині деталі – залишкові напруження розтягу. Стискають напруги, складаючись з робочими розтягу, зменшують шкідливу дію останніх.

Широке впровадження у виробництво зубчастих коліс процесів деформаційного зміцнення дробом пояснюється великим зміцнюючим ефектом наклепу дробом стосовно до високоміцних сталей, працюючих в умовах циклічного згину.

Наявні дані свідчать про значне підвищення межі витривалості, довговічності і ударно-втомної міцності цементованих зразків і зубчастих коліс. Так, в роботі [38] зазначалося, що межа витривалості цементованих зразків, виготовлених із сталей 18ХГТ, 12ХНВА, в результаті наклепу дробом підвищувалася на 6...60% в залежності від режимів наклепу; ударно-циклічна міцність аналогічних зразків зі сталі 30ХГТ при наклепі дробом підвищилася в 2 рази.

Дослідження, проведені на незміцнених і зміцнених зубчастих колесах [39], показали, що межа витривалості зубів в результаті наклепу дробом підвищується на 10-18%.

Про ефективність наклепу дробом свідить підвищення експлуатаційної довговічності цементованих зубчастих коліс. Проведені дослідження на зубчастих колесах, виготовлених із сталей 20ХНМ, 25ХГМ і 30ХГТ, показують, що експлуатаційна довговічність внаслідок наклепу підвищується в 2,5...3 рази.

1.3 Деформаційне зміцнення зубчастих коліс дробом

Важливе значення при розробці технології деформаційного зміцнення дробом має правильний вибір параметрів режиму наклепу. Форсовані режими наклепу дробом можуть привести до перенаклепу, появи чорних і білих смуг, зниження опору поверхневого шару руйнуванню [40].

Відомо, що поведінка матеріалу при дії навантаження визначається його об'ємно-напруженим станом. Тому змінюючи величину і сферу робочих напружень в зоні контакту, можна зробити деякий вплив на властивості зміцненого матеріалу при наклепуванні дробом.

Для деформаційного зміцнення зубчастих коліс дробом застосовують сталевий дроб (HRC 30-40) або литий чавунний дроб (HRC 62-64).

У тому випадку, коли твердість поверхні оброблюваних зубчастих коліс менше, ніж твердість дробу, найбільшій пружно-пластичній деформації в зоні силового контакту піддається оброблюване колесо. Таке явище спостерігається при обробці поліпшених зубчастих коліс (HRC 35-40) чавунним дробом. Клас чистоти поверхні зубів коліс в цьому випадку не перевищує $P_z = 6,3$. При обробці коліс, що мають після хіміко-термічної обробки твердість поверхні HRC 58-63, сталевим дробом найбільшій пружно-пластичній деформації піддається дроб. Клас чистоти поверхні зубів колеса збільшується до 6,3-1,6 мкм.

Розглядаючи зіткнення сталевого дробу з поверхнею оброблюваних зубчастих коліс, можна бачити, що воно носить пружно-пластичний характер. Процес пружно-пластичного навантаження при ударі можна записати у вигляді формули:

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2, \text{ коли } \sigma > \sigma_T; \quad (1.1)$$

де α – глибина місцевого пружно-пластичного змінання;

α_1 – глибина змінання в області пружних деформацій;

α_2 – глибина змінання в області пластичних деформацій;

σ – інтенсивність напружень, викликаних ударом;

σ_T – межа текучості матеріалу в зоні силового контакту.

У роботі [41] для опису процесу пружно-пластичного змінання експериментально апроксимована залежність для динамічного процесу навантаження:

$$\alpha = \theta \alpha_\delta P^n; \quad (1.2)$$

де P – величина прикладеного динамічного навантаження;

α_δ – коефіцієнт, що залежить від механічних властивостей матеріалу тіл, що стискаються;

θ – коефіцієнт використання кінетичної енергії дробу;

n – коефіцієнт, який визначається геометричною конфігурацією стиснених тіл.

При дослідженні процесу деформаційного зміцнення дробом нас перш за все цікавить величина максимальної динамічної сили, що викликає пластичну деформацію в зоні силового контакту. Обмежені можливості застосування рівняння Герца [42] ($\alpha_1 = kP^{2/3}$) призводять до заміни цього рівняння іншими співвідношеннями, що застосовуються у випадку пластичних деформацій при контакті [43]:

$$P = Nd_1^{n_c}; \quad (1.3)$$

де d_1 – діаметр відбитка,

N, n_c – коефіцієнти, що характеризують властивості матеріалу (для загартованих сталей $n_c = 2$).

Виходячи з рішення задачі зіткнення тіл, на підставі другого закону Ньютона, можна записати

$$m_\delta \frac{d^2\alpha}{d\tau^2} = -P(\tau); \quad (1.4)$$

$$\text{де } m_\delta = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2};$$

m_1 – маса дроби;

m_2 – маса зміцнюваної деталі.

Порівнюючи розміри дроби r_1 та розміри зброблюваних зубчастих коліс r_2 можна прийняти $r_1 = r_2 = \infty$, і так як $m_2 \gg m_1$, то $m_\delta = m_1$. Для дроби $m_1 = \frac{\pi d^2 \gamma}{6g}$

При виборі режимів наклепу повинна бути врахована значна нерівномірність фазового складу і характеристик міцності поверхневих шарів зубчастих коліс, підданих цементації і нітроцементації. Це необхідно тому що швидкість потоку, кут атаки, розмір дроби визначають ступінь і глибину фазових перетворень, інтенсивність зміни залишкових напружень і в кінцевому підсумку ті властивості опору, які обумовлюють опір поверхневого шару руйнуючим навантаженням.

Результати розрахунку критичних напружень для різних структурних станів матеріалів показують, що величина наведених напружень залежить від способу зміцнення. Так, наприклад, при швидкості потоку дроби 40 м/с напруження досягають 1100 МПа, 54 м/с – 1200 МПа, 80 м/с – 1380 МПа при 120 м/с – 1580 МПа; при обкочуванні роликком – 1200 МПа [35].

1.4 Обґрунтування раціонального методу обробки

Найважливішим завданням підвищення твердості і, як наслідок, зносостійкості поверхні важконавантажених зубчастих передач є створення такої технології зміцнення зубчастих зачеплень, яка дозволила б збільшити термін служби приводу кульового млина.

Аналізуючи існуючі способи і технології зміцнення деталей машин найбільш близьким для нас, є дробоструменевий спосіб, який є безконтактним, внаслідок відсутності контакту інструменту і деталі, що дозволяє зробити модифікацію поверхневого шару металу, тобто провести наклеп який значно підвищить твердість поверхні метала і, тим самим, створить передумови значно збільшити зносостійкість поверхні.

Наступним етапом підвищення процесу активізації металу є підготовка поверхні обробки металу під дробоструменевий вплив, шляхом створення енергетичних теплових полів в металі, що сприяють активізації процесу дробоструменевго впливу. Миттєві температурні поля, що вводяться в метал, дозволяють створити сприятливі умови для механічного впливу дробом і розвитку в поверхневому шарі залишкових напружень стиску.

Нами пропонується спосіб зміцнення зубчастих коліс на базі поєднання теплових потоків, що миттєво вводяться в поверхню металу, і механічний (ударний) вплив дробом або вплив профільованим деформуючим інструментом (ролик або кулька). Такий спосіб забезпечить високу зносостійкість зубчастого зачеплення, дозволить підвищити довговічність зубчастих передач; наприклад важконавантажених коліс приводу кульових млинів.

Також є відомий спосіб для поверхневого зміцнення виробів типу зубів зубчастих коліс, в якому інструмент для зміцнення містить навантажувач із підсилювачем для прикладання тиску по западині зуба. Недоліком вказаного способу є те, що зміцнення відбувається тільки по дну западини.

Відомий також спосіб, що полягає у нанесенні на робочі поверхні зубців зносостійкого матеріалу. На ведене колесо рівномірним шаром, а на ведуче – у вигляді виступаючих частин зносостійкого матеріалу. При обертанні зубчастих

коліс виступаючі частини зносостійкого матеріалу ведучого колеса, контактуючи з зносостійким покриттям веденого колеса, сприймають частину навантаження на себе.

Недоліком способів, в яких підвищення зносостійкості досягається об'ємним зміцненням (термічна обробка), є недостатня твердість поверхонь зубів зубчастого зачеплення дезінтегратора, працюючого в умовах інтенсивного абразивного зношування.

Поверхнєве зміцнення (хіміко-термічне та ін.) є малоефективним, оскільки тонкий шар зміцненого матеріалу поверхні зуба швидко стирається абразивними частинками матеріалу, що подрібнюється.

Відомий спосіб зміцнення металевих, що включає створення попередніх розтягуючих напружень в напрямку дії робочих навантажень і підвищення втомної міцності. Попередні напруження розтягу створюють шляхом послідовного нагрівання ділянок поверхні деталі до температури 0,3-0,9 температури плавлення металу імпульсами тривалістю 1,2-6,0 мс. Недоліком є досить складне обладнання для здійснення і контролю процесу, що знижує ефективність.

Найбільш близьким до вирішення описаних технологічних методів є спосіб зміцнення зубчастих коліс приводу кульових. Сутність його полягає в тому, що зубчасті колеса вінця млинерні (ведучого колеса) піддають попередньому припрацьовуванню протягом 10-12 год. при повному навантаженні робочого режиму млина. Потім здійснюють дробоструменевий наклеп зубів колеса по евольвенті і по ширині колеса. Це дозволить механічним зміцненням підвищити згинальну міцність зубів.

В даному випадку при наклепі підвищується щільність дислокації; процесу перетину дислокацій, а також їх пружне взаємодія вимагає додаткових витрат енергії, а отже, і підвищення деформуючих напружень. Дроблення блоків субструктури в процесі наклепу також сприяє гальмуванню дислокацій, тому що межі зерен слугують ефективною перешкодою руху дислокацій. Недоліком вказаного способу є недостатня твердість поверхневого шару і високі стискаючі напруження в ньому.

Технічним результатом є збільшення ресурсу роботи важконавантажених зубчастих зачеплень кульових млинів. Для досягнення цього зубчасті колеса вінця шестерні після припрацьовування і перед дробоструменевою обробкою додатково нагрівають. Нагрівання поверхневого шару зубів колеса до температури нижче структурних фазових перетворень здійснюють за допомогою високотемпературного і високошвидкісного факела пальника, шляхом створення зони контакту факела пальника по всій висоті зуба, включаючи дно зуба, що забезпечує граничну щільність внутрішньої енергії поверхневого шару. В результаті підвищується якість поверхні обробленого матеріалу, його стійкість до поверхневого стирання.

Для досягнення технічного результату пропонується спосіб зміцнення зубчастих коліс приводу кульових млинів, що включає попереднє припрацьовування зубчастого вінця веденого колеса зубчастим ведучим колесом загартованими зубами протягом 10-12 годин при робочому режимі млина. Потім здійснюють короткострокове нагрівання поверхні профілю зубів високошвидкісним і високотемпературним факелом пальника протягом 5-10,0 мс, шляхом переміщення факела пальника вздовж ширини зуба колеса, після чого поверхню зуба колеса піддають дробострумевій обробці.

Протікання в поверхневому шарі під впливом інструменту механічних, теплових і структурно-фазових явищ призводить до його зміцнення. Як наслідок, відбувається формування якісно нового поверхневого шару з більш високими фізико-механічними характеристиками. Вони впливають на підвищення таких експлуатаційних властивостей деталей, як втомна міцність, контактна витривалість, зносостійкість.

При цьому кінетична сутність процесу поверхневого пластичного деформування полягає в об'ємному пошкодженню поверхневого шару, при якому в основі деформованого елемента зароджуються і накопичуються різного роду дефекти і пошкодження. Також слід враховувати, що як тільки пошкоджуваність матеріалу в локальному мікроб'ємі досягає граничної (критичної) величини, починається процес його руйнування у вигляді мікро- та макрорушень.

Отже, найбільший ефект зміцнення поверхневого пластичного зміцнення досягається за проміжок часу або циклів навантаження, при якому в елементах

поверхневого шару накопичується критична (гранична) пошкоджувальність. Згідно з термодинамічною теорією процес йде в двох протилежних, взаємопов'язаних і одночасно протікаючих в деформованих об'єктах поверхневого шару явища: збільшення щільності прихованої енергії різного роду дефектів і пошкоджень, що накопичуються в матеріалі внаслідок роботи зовнішніх сил, і зниження її внаслідок різного роду релаксаційних процесів, що протікають в середині деформованого елемента поверхневого шару. При цьому зростання щільності прихованої енергії пов'язане із пошкоджувальністю матеріалу і, як наслідок, зміцненням поверхневого шару, а її зниження – з динамічним поверненням (розміцнення) внаслідок теплового ефекту пластичної деформації.

Значна частина теплової енергії пов'язаної з тепловим ефектом пластичної деформації, не затримується в деформованому елементі поверхневого шару, а розсіюється по тілу деталі, в деформуюче тіло і в навколишнє середовище за рахунок теплообміну. І лише незначна частина цієї енергії затримується в деформованому елементі, підвищуючи його внутрішню енергію на величину Δ_{ET} .

Таким чином, накопичувана в деформованому елементі поверхневого шару внутрішня енергія Δ_E визначається сумою двох складових потенційної (прихованої) Δ_{EC} і кінетичної (теплової) Δ_{ET} :

$$\Delta_E = \Delta_{EC} + \Delta_{ET}. \quad (1.5)$$

Ця енергія пов'язана з пошкоджувальністю матеріалу Δ_{EC} і його термічним розміцненням Δ_{ET} , є відповідальною за властивості міцності поверхневого шару, який формується в процесі поверхневого пластичного деформування.

Тому максимально зміцненим поверхневий шар вважається, коли щільність E внутрішньої енергії в деформованих елементах, що знаходяться на поверхні деталі, досягне граничної величини E^* . Цей стан поверхневого шару характеризується найбільш високими показниками міцності, такими як твердість, залишкові напруження і забезпечують максимальне підвищення експлуатаційних характеристик деталі. Гранична щільність E^* внутрішньої енергії, відповідно

порушення міжатомних зв'язків настає в результаті поглинання граничної для даної кристалічної решітки величини енергії.

При механічному навантаженні до руйнування поверхневого шару процесу порушення міжатомних зв'язків передують спотворення кристалічної решітки до критичної величини. При механічному навантаженні граничне спотворення кристалічної решітки обумовлено скупченням в деформованих локальних об'ємах поверхневого шару критичної щільності дислокації, при якій подальше поглинання енергії кристалічною решіткою призводить до порушення міжатомних зв'язків.

З огляду на, що питомі енергія, яка витрачається на граничне спотворення кристалічної решітки, не залежить від виду енергії, що підводиться (теплова або механічна), і відповідає величині тепловмісту (ентальпії) металу. Також в процесі нагрівання енергія поглинається кристалічною решіткою практично рівномірно по всьому об'єму металу. При пластичній деформації внаслідок анізотропії та недосконалості кристалічної решітки відбувається неоднорідне поглинання енергії.

Отже, для забезпечення максимального зменшення в процесі дробоструменевго навантаження в локальних об'ємах, які перебувають на межі контакту поверхні з дробом, спотворення кристалічної решітки повинні досягати гранично можливої величини.

Структурні перетворення в поверхневому шарі, а також пластична деформація цього шару, що виникає при наклепі, призводять до збільшення його об'єму і, внаслідок опору з боку недеформованих внутрішніх шарів, до пружного стиску, що викликає в поверхневих шарах запиткові стискаючі напруження, а всередині деталі – залишкові напруження розтягу. Стискаючі напруження, додаючись з робочими розтягу, зменшують шкідливу дію останніх.

Відповідно при пластичному поверхневому деформуванні доцільно насичення шару енергією за рахунок його попереднього нагрівання. Це не тільки прискорить процес поверхневого пластичного деформування і знизить енерговитрати, але дозволить регулювати величину щільності внутрішньої енергії, що накопичується локальним мікрооб'ємом поверхневого шару, а також задавати глибину його розташування від зовнішньої поверхні деталі. Це має важливе практичне значення,

особливо при проектуванні операцій зміцнення на стадії конструкторсько-технологічної підготовки виробництва.

На рисунку 1.7 показано пристрій для способу зміцнення зучастих коліс кульових млинів.

При запропонованому способі підігрів металу здійснюється факелом пальника. Зона нагріву розташована перед зоною пластичного деформування. Температура нагріву 320-550⁰С.

Рисунок 1.7 – Пристрій для зміцнення зучастих коліс кульових млинів:

- 1 – зучастий сектор; 2 – пристрої для дробоструменевого наклепу;
- 3 – пальник, 4 – пристрій для розпилення пального; 5 – камери зоряння пальника; 6 – пристрої кріплення пальника і дробоструменевого пристрою;
- 7 – канали подачі повітря, 8 – подача дробу, 9 – подача окислювача в пальник; 10 – подача пального; 11 – сопло пальника; 12 – факел пальника;
- 13 – факел потоку дробу; 14 – напрямки переміщення всього пристрою

Пристрій для зміцнення зучастих коліс кульових млинів працює наступним чином: на корпусі кульового млина монтується вінець ведучої шестерні і під робочим навантаженням здійснюється припрацювання зучастої передачі. Ведуча шестерня виконана з високолегованої сталі, а ведена – зі сталі 35Л, яка діє як оброблюваний інструмент, внаслідок того, що поверхня її зубів має твердість HRC 48 одиниць. Отже, піддає ведену шестерню швидкого зносу, тобто знімає

тонкий шар і, тим самим, здійснюється припрацювання, тобто усі поверхні зношуються і в цьому випадку припрацьовується ведене колесо і ведуча шестерня.

Після того, як зубчаста пара припрацьовується протягом 10-12 год (без кульового навантаження і мелючої маси), проводиться короткочасне нагрівання поверхні зуба колеса високошвидкісним і високотемпературним факелом пального протягом 5,0-10,0 мс, для цього факелом пального 12, який подається пальником 3 на поверхню зубів 1 з камери згоряння 5 через сопло 11. Усередині камери згоряння 5 через розпилувач 4 подається окислювач 9 і паливо 10 для утворення факела 12, потім з дробоструменевої насадки 2 подається через канал 8 дріб, а через канал 7 стиснене повітря, яке викидається з пристрою 2 з дробом потоком 13 на поверхню зубів 1.

В даному випадку ми маємо термодинамічний і дробоструменевий пристрій, що скріплені кронштейном 6, розташовані на деякій відстані L один від одного. Ці відстані вибираються з розрахунку часу нагріву паливом поверхні зуба протягом зазначеного вище часу, після чого здійснюється дробоструменева обробка на глибину наклепаного шару евольвентної поверхні зубів, що становить 2-3 мм.

При цьому одночасно обробляється вся евольвентна крива і западина зуба всього профілю і по довжині зачеплення. Після обробки першої западини, колесо млина повертається на один зуб. Процедура зміцнення повторюється. Після обробки поверхні очищається. Це дозволяє створити зміцнення по всій евольвенті зуба.

Дана обробка позитивно впливає на втомну міцність зуба, тим самим підвищується ресурс роботи на 30-50%. При характерних видах зносу дану обробку можна повторювати. Запропоноване зміцнення поверхневого шару пластичним деформуванням сприяє підвищенню контактної витривалості і зносостійкості деталей.

Запропонований спосіб забезпечує розширення області застосування зміцнюючої та підвищення продуктивності.

В якості робочого органу для термоімпульсної обробки зубів вибираємо малогабаритний ракетний паличник, що застосовується для термічного руйнування гірських порід і в якості робочого органу для напилення абразивних порошоків на поверхні тертя металів.

На рисунку 1.8 представлений робочий орган термоструменевого пальника. Термоінструмент складається з камери згоряння 1, в яку через завихрювач 2 подається повітря і форсунку 3 подається паливо всередину камери згоряння, де воно спалахує. Від електричної іскри свічки 4 утворені всередині камери згоряння 1 полум'я викидається через сопло Лавалю 5 на поверхню нагріву у вигляді високошвидкісного факела 6 на поверхню обробки. Як паливо можна використовувати горючі гази або горючі вуглеводневі (бензин, газ, солярка, масло) рідини.

Рисунок 1.8 – Термічний інструмент під час роботи

Технічна характеристика термоінструменту наступна:

- витрата повітря – 20 м³/хв;
- витрата пального – 10 л/год;
- діаметр камери згоряння – 40мм;
- критичний діаметр сопла – 15 мм;
- вага – 4кг;
- теплова потужність – 500-600 кВт;
- температура факела – 1800⁰С;
- швидкість газового потоку – 1500...1800 м/с.

Отже, нами запропонована технологія зміцнення поверхні зубів комбінованим способом, що полягає у нагріванні поверхні зуба ракетним пальником із подальшою дробоструменевою обробкою.

Висновки до розділу 1

За результатами проведеного літературного дослідження із проблематики обробки конструкційних матеріалів абразивними кругами на гнучкій основі робимо наступні висновки:

1) виконано аналіз причин та характер зносу зубців зубчастих передач кульових млинів в результаті тривалої роботи;

2) розглянуто технологічні способи підвищення довговічності зубчастих коліс. Технологічні процеси, пов'язані з механічним зміцненням робочої поверхні зубчастих коліс і викликають підвищення згинальної міцності їх, є перспективними для сучасного машинобудування. Широке впровадження у виробництво зубчастих коліс процесів деформаційного зміцнення дробом пояснюється великим зміцнюючим ефектом наклепу дробом стосовно до високоміцних сталей, працюючих в умовах циклічного згину.

3) пропонується спосіб зміцнення зубчастих коліс на базі поєднання теплових пошків, що миттєво вводяться в поверхню металу, і механічний (ударний) вплив дробом або вплив профільованим деформуючим інструментом (ролик або кулька). Такий спосіб забезпечить високу зносостійкість зубчастого зачеплення, дозволить підвищити довговічність зубчастих передач; наприклад важконавантажених коліс приводу кульових млинів (попереднє пропрацювання 10-12 годин, короткочасне нагрівання поверхні зубців до 350-550°C протягом 5-10 мс із подальшою дробоструменевою обробкою).

Отже, **мета роботи** – підвищення роботоздатності важконавантажених зубчастих передач та розробка ресурсозберігаючої технології їх виготовлення. **Об'єктом** розробки є технологічний процес поверхневого пластичного зміцнення, а **предметом** – взаємозв'язок технологічних параметрів із твердістю та шорсткістю поверхневого шару зубчастих коліс.

Для вирішення поставленої мети необхідно розв'язати наступні **задачі**:

1. Провести аналіз умов роботи зубчастих передач кульових млинів, а також технологічних способів підвищення їх довговічності.
2. Запропонувати способи підвищення міцності зубчастих коліс високонавантажених зубчастих передач.
3. Розробити методику розрахунку зубчастого вінця із застосуванням методів скінченноелементного аналізу.
4. Провести експериментальне дослідження ефективності запропонованого методу поверхневого пластичного деформування зубчастих коліс, виготовлених зі сталей 35Л та 35ХМЛ.
5. Приділити увагу питанням охорони праці, економічної ефективності та захисту довкілля.

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Робота щодо чисельного розрахунку зубчастого вінця приводу кульового млина методом скінчених елементів проходила в наступному обсязі і послідовності:

1 Складання розрахункової схеми, що відповідає схемі випробувального навантаження. Призначення режимів навантаження.

2 Призначення характеристик опору втоми конструкційних матеріалів. При відсутності експериментальних даних використовувалося два способи отримання початкових даних за допомогою вбудованого в програму MSC/Fatigue генератора за матеріалами:

- характеристик опору втоми матеріалу по його типу і основним;
- характеристики: модуля пружності і тимчасового опору розриву.

3 Побудова за допомогою програми MSC/Patran скінчено-елементної моделі (далі – СЕМ) конструкції, що розраховується. Граничні умови відповідно закріпленню зубчастого колеса в експериментальному оснадженні.

4 Проведення розрахунку напружено-деформованого стану (далі – НДС) СЕМ в обсязі, необхідному для виконання оцінки довговічності цієї конструкції за допомогою програми MSC/Fatigue. Використовувалися програми MSC/Patran, MSC/Nastran.

5 Розрахунок довговічності зубчастого вінця за допомогою модуля MSC/Fatigue, огляд можливостей цього модуля.

З огляду на особливості робочої конструкції, у якості розрахункової прийнята схема навантаження, зображена на рисунку 2.1.

Дані по силам, що діють у зачепленні зубчастого вінця і валу-шестерні були розраховані окремо:

- колове зусилля: $F_t = 5362315 \text{ Н}$;
- радіальне зусилля в зубчастому зачепленні: $F_r = 195972 \text{ Н}$;
- осьове зусилля: $F_a = 49333 \text{ Н}$.

Рисунок 2.1 – Схема навантаження

2.1 Характеристики опору втоми конструкційних матеріалів

Практичні способи отримання характеристик опору втоми матеріалу або деталі, необхідні для розрахунку довговічності (перераховані у напрямку зниження вірогідності розрахованої на їх основі довговічності).

1 Побудова експериментальної кривої опору втоми деталі. Для цього необхідно партію (20-30 шт.) однакових зубчастих коліс випробувати на згин з оберганням на різних рівнях навантаження і побудувати залежність числа циклів до руйнування від рівня навантаження. Цей метод дає найбільшу достовірність оцінки довговічності, але вимагає великих витрат часу і коштів.

2 Використання кривих втоми матеріалів, що реалізуються в конструкції зубчастого вінця, отриманих відповідно до «Методу випробування на втому».

3 Використання статистики по вже проведеним випробуванням зубчастих вінців. Для коліс з відомими числами циклів до руйнування при заданому навантаженні будується розрахункова модель для визначення НДС, реалізованого при випробуваннях. Розрахунком визначається рівень напружень, який призвів до руйнування вінця за відоме (по протоколу випробувань) число циклів навантаження. Отриманий результат поширюється на знову розроблювані вироби-аналоги, виконані з даного матеріалу за аналогічною технологією.

4 Розрахунок необхідних характеристик опору втомі матеріалу по відомим для цього матеріалу характеристикам статичної міцності. Рекомендується використовувати «Методи розрахунку характеристик опору втомі».

Програма MSC/Fatigue дозволяє отримати необхідні для розрахунку довговічності вихідні дані по характеристикам матеріалів за допомогою вбудованого генератора втомних характеристик матеріалу. При цьому використовується накопичений досвід розробників програми по характеристикам зарубіжних конструкційних матеріалів.

Особливості способу:

1 Для завдання необхідних характеристик матеріалу потрібно знати лише його тип (вибирається по таблиці "Table 3-1 Material Type Numbers and Descriptions" розділу "PFMAT Material Listing" керівництва "MSC Fatigue 2005. User's Guide Volume I") і найпоширеніші характеристики: модуль пружності E і тимчасовий опір розриву σ_b .

2 На виході, використовуючи емпіричні залежності статичних і втомних властивостей зарубіжних матеріалів, отримуємо характеристики матеріалу для всіх видів розрахунку довговічності, підтримуваних програмою MSC/Fatigue.

У задачі використовувалися характеристики опору втомі, отримані за допомогою вбудованого в MSC/Fatigue генератора втомних характеристик матеріалу.

2.2 Характеристики матеріалів зубчастого вінця

На зубчастий вінець маємо такі дані за матеріалами цього колеса:

- колесо виготовлено литвом, матеріал колеса – сталь 35ХМЛ;
- тимчасовий опір розриву $\sigma_b = 600$ МПа;
- модуль пружності першого ряду $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа.

По таблиці 3-1 керівництва "MSC Fatigue 2005 User's Guide Volume I" вибираємо найбільш близький до сталі 35ХМЛ тип матеріалу: "№13 – Plain carbon wrought steel with $< 0,2\%$ carbon (PCWS)". Програма MSC/Fatigue використовує криву втомі ступеневого вигляду, але записують її в різних термінах.

Характеристики опору втоми матеріалу описуються кривою втоми, що представляє залежність числа циклів N до руйнування стандартного зразка від рівня амплітуди циклів напружень S в розрахунковому перерізі цього зразка [44].

Вигляд кривої втоми:

$$N \cdot S^m = \sigma_{-1} \cdot N_b^m, \quad (2.1)$$

де σ_{-1} – межа витривалості матеріалу конструкції на базі N_b циклів навантаження;

m – показник нахилу кривої втоми, що апроксимована ступеневим рівнянням.

У логарифмічних координатах крива втоми має дві прямих ділянки з різним кутом нахилу щодо осі X (рисунк 2.2):

- при $N < N_b$ показник нахилу m для гладких стандартних зразків при відсутності експериментальних даних необхідно розраховувати за формулою:

$$m = 5 + \sigma_s / 80; \quad (2.2)$$

- при $N = N_b$ крива втоми паралельна осі X .

При відсутності експериментальних даних межу обмеженої витривалості для сталей даного типу допускається визначати на базі $N_b = 10^7$ циклів за формулою:

$$\sigma_{-1} = 0,5 \sigma_s - 0,0001 \sigma_s. \quad (2.3)$$

Рисунок 2.2 – Схематизація кривої втоми матеріалу

2.3 Крива втоми програми MSC/Fatigue

У програму MSC/Fatigue закладено опис характеристик опору втоми матеріалу у вигляді кривої втоми, що представляє собою залежність числа циклів до руйнування стандартного зразка N від рівня розмахів циклів напружень S в розрахунковому перерізі цього зразка S_f .

Вид кривої втоми:

$$S_f = SR_1(N) \cdot S_0 \quad (2.4)$$

де SR_1 – відрізок, що відсікається на осі розмахів в точці 0 циклів;

b – показники нахилів двох ділянок кривої втоми.

Імовірність досягнення граничного стану задається за допомогою логарифма числа циклів до руйнування, яке визначає ступінь розсіювання характеристик втоми. Для отримання достовірних результатів розрахунку довговічності дана характеристика повинна бути отримана узагальненням експериментальних даних за характеристиками матеріалів, що реалізуються на конкретному виробництві, з урахуванням розкиду властивостей всередині однієї партії заготовок між різними партіями.

Програма Log S, Log Nb, Log N MSC/Fatigue дозволяє отримати узагальнену характеристику розсіювання в залежності від типу матеріалу, модуля пружності і тимчасового опору розриву. Характеристика сталі 35ХМЛ представлена в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Характеристика сталі 35ХМЛ

Матеріал	σ_s , МПа	E , МПа	σ_{-1} , МПа	m	N_b
Сталь 35ХМЛ	600	$2,1 \cdot 10^5$	315	9,6	10^7

Зображення кривих втоми сталі Сталь 35ХМЛ, отримані за допомогою операції "Graphic display" з основного вікна модуля MSC/Fatigue, наведені на рисунку 2.3.

Рисунок 2.3 – Крива вгоми матеріалу сталі.

2.4 Створення скінчено-елементної моделі зубчастого вінця, моделі навантаження та граничних умов, що імітують закріплення

Створення 3D моделі здійснювалося в САD програмі КОМПАС модулі Shaft по геометричним параметрам.

При створення розрахункової моделі був вирізаний фрагмент колеса, для того щоб не витрачати ресурси машини, так як напруження будуть локалізовані по площі зуба вінця (рисунок 2.4).

Рисунок 2.4 – 3D модель зачеплення колеса та шестерні

Модель, створена в САПР була успішно імпортована за допомогою обмінних файлів в САЕ систему NASTRAN. Розбиття на кінцеві елементи змодельовані об'ємними елементами типу tet. Розрахункова схема для визначення діючих напружень приведена на рисунку 2.1. Вимоги до типу елементів і якості сітки повинні бути підвищені, так як для оцінки втомної міцності потрібно провести розрахунок локальних напружень з урахуванням їх концепції (рисунок 2.5).

Як впливає з попереднього розділу, показник нахилу кривої втоми сталі 35ХМЛ становить 7,5...9,6. Різниця кривої втоми має вигляд (2.1).

Механічна розрахункова схема включала жорстке закріплення. Передбачає накладення зв'язку з шести ступенів вільності і навантаження у вигляді результуючого розподіленого навантаження по межі зуба. Модуль навантаження по осях був підрахований за такою формулою:

$$q_x = \frac{F_x}{s}; \quad (2.5)$$

$$q_x = 536231 / 1,9141 = 280114 \text{ Н/м};$$

$$q_y = \frac{F_y}{s}; \quad (2.6)$$

$$q_y = 195972 / 1,9141 = 102388 \text{ Н/м};$$

$$q_z = \frac{F_z}{s}; \quad (2.7)$$

$$q_z = 49333 / 1,9141 = 25773 \text{ Н/м}.$$

Рисунок 2.5 – Сгенерована сітка

Таким чином, для визначення за допомогою програми MSC/Nastran НДС зубчастого вілля вирішувалася статична задача (рисунок 2.6).

Результати розрахунку напружень збережені в одному файлі з розширенням *.xdb.

2.5 Результати розрахунку напружено-деформованого стану

Після того, як програма MSC/Nastran успішно закінчить рішення завдання "coleso.bdf", для оцінок довговічності будуть доступні результати розрахунку НДС для кожного кроку прикладання навантаження, збережені в одному файлі "coleso.xdb". В даному розділі наведені розподілу еквівалентних напружень, обчислені за формулою Мізеса. Результати узагальнені. Шкала напружень на рисунках відповідає розмірності в Па.

Результати напружень показують достатній запас статичної міцності. За діаграмою результатів максимальне напруження має значення $\sigma_{max} = 330$ МПа, допустиме напруження $[\sigma] = 600$ МПа, коефіцієнт статичної міцності склав 1,72 і був визначений за формулою:

$$k = \frac{[\sigma]}{\sigma_{max}}. \quad (2.8)$$

Рисунок 2.6 – Розподіл еквівалентних напружень у вінці

Але позитивні результати статичного розрахунку не прогноують повною мірою довговічність конструкцій або деталей машин. Як показує практика, навантаження, що цільно змінюються в часі за величиною або за величиною і за знаком, можуть привести до руйнування конструкції при напруженні, істотно менших, ніж межа текучості або межа міцності. Таке руйнування прийнято називати «втомним». Матеріал нібито «втомлюється» під дією багаторазових періодичних навантажень.

2.6 Втомна міцність, різновиди

Втомою називають процес поступового накопичення пошкоджень матеріалу під дією змінних напружень, що призводять до зміни його властивостей, утворення і розвитку тріщин і руйнування.

Розрізняють два основні різновиди втомного пошкодження:

1 Малоциклова втома, що виникає при максимальних напруженнях, які перевищують межу текучості матеріалу. Супроводжується знакозмінним пластичним деформуванням об'єму матеріалу, більшого в порівнянні з розмірами структурних складових (зерен, пор, включень). Число циклів до утворення помітної тріщини (довжиною 0,5 – 1 мм і більше) залежить в основному від величини

пластичної деформації деталі в кожному циклі і від здатності матеріалу чинити опір малоцикловому руйнуванню. Для сталевих конструкцій воно не перевищує 10^4 . Явище малоциклової втоми знайоме кожному хто ламав дріт, пластично деформуючи його в різні боки.

2 Багатоциклова втома має місце при напружених значно нижче межі текучості ($\sigma_{max} < 0,6\sigma_T$). В цьому випадку в макрооб'ємі матеріал деформується пружно (його властивості із цілком задовільною точністю описуються законом Гука $\sigma = E\varepsilon$). Однак більшість реальних матеріалів мають складну багатоконпонентну структуру (зерна, пори, міжзеренні прошарки, неметалеві включення в сталі і т. д.). При пружному деформації досить великого об'єму в мікрооб'ємах (в окремих слабких зернах, поблизу дефектів) відбувається локальне знакозмінне пластичне деформування, яке називають мікропластичним. Його багаторазове повторення призводить до зародження мікроскопічних тріщин. Поступовий їх розвиток і злиття в магістральну тріщину призводить до ослаблення перетинів і потім до раптового доламу деталей. Тривалість стадії багатоциклової втоми до моменту зародження магістральної втомної макротріщини для сталевих конструкцій перевищує $10^5 \dots 10^6$ циклів.

Межа між малоцикловою і багатоцикловою втомою не є чітко вираженою. У тих випадках, коли пластична деформація в макрооб'ємі відмінно від нуля в кожному циклі, але мала в порівнянні з пружною, умови зародження тріщин залежать і від пружної і від пластичної деформації. Це - перехідна зона між малоцикловою і багатоцикловою втомами [44].

2.7 Випробування втоми, характеристики витривалості металів

Очевидно, чим вище значення амплітуди напружень (σ_a) при фіксованих середніх напруженнях σ_m , тим нижче число циклів (N), яке зразок зможе витримати до моменту зародження магістральної втомної тріщини. Таким чином, на відміну від статичних випробувань, де визначаються окремі значення різних параметрів (σ_T , $\sigma_{0,2}$, σ_b , ψ , δ тощо), при втомних випробуваннях характеристикою витривалості конкретного матеріалу стає залежність N_{σ} . Для визначення цієї залежності необхідно випробувати партію (мінімум 10...15 шт.) однакових зразків з

досліджуваної марки сталі тобто зразків з однієї партії (плавки), з однаковими розмірами, термообробкою, якістю поверхні. Обмежимося поки розглядом симетричного циклу ($\sigma_m = 0, R = -1$) при лінійному напруженому стані. Перший зразок випробовують при найбільшій амплітуді напружень, що становить $(0,6 \dots 0,75) \cdot \sigma_b$, а наступні при амплітудах, що знижуються. Кожному зруйнованому зразку відповідає одна точка на графіку; обробка результатів випробувань всіх зразків методом найменших квадратів дозволяє отримати залежність середнього числа циклів до руйнування від амплітуди змінних напружень. Її називають кривою витривалості або кривою Велера по імені німецького вченого, що вперше почав в кінці XIX століття системні дослідження в'омного руйнування.

Криві витривалості можуть бути побудовані при різних значеннях коефіцієнта асиметрії циклу R . На рисунку 2.7 показаний типовий вид таких кривих для маловуглецевої (крива 1, експериментальні дані відзначені точками) і легованої 9 (крива 2, експериментальні дані відзначені хрестиками) сталей. У логарифмічних координатах криві витривалості досере схематизують кусочно-лінійними залежностями. Така схематизація дозволяє описати результати випробувань мінімальним набором параметрів. Криві першого типу (рисунк 2.8, а) характерні для сталей малої і середньої міцності ($\sigma_b < 1200$ МПа) при нормальній температурі; криві, зображені на рисунку 2.8, б – для легованих сталей і титанових сплавів; криві третього типу (рисунк 2.8, в) – для алюмінієвих сплавів і ряду жароміцних сплавів при підвищених температурах.

Рисунок 2.7 – Типовий вид кривої витривалості для вуглецевих та легованих сталей

$$N = N_G \left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_a} \right)^m, \quad (2.10)$$

при $\sigma_a \geq \sigma_{-1}$, а при $\sigma_a < \sigma_{-1} - N = \infty$.

Рівняння кривої другого типу:

$$N = N_G \left(\frac{(\sigma_a)_{N_G}}{\sigma_a} \right)^m, \quad (2.11)$$

при $\sigma_a \geq (\sigma_a)_{N_G}$;

$$N = N_G \left(\frac{(\sigma_a)_{N_G}}{\sigma_a} \right)^b, \quad (2.12)$$

при $\sigma_a < (\sigma_a)_{N_G}$.

Результати випробувань зразків однієї і тієї ж сталі при розтязі-стиску та згині якісно однакові, але значення характеристик (зокрема межі витривалості) можуть помітно відрізнятися. У довідниках за властивостями матеріалів приводять значення меж витривалості для кожного з цих видів навантаження. Аналогічні характеристики витривалості матеріалів при чистому зсуві отримують шляхом випробувань зразків на кручення; при цьому їх позначають відповідно τ_a , τ_m , τ_{-1} , τ_R і т.д.

У випадках, коли в довідковій літературі відсутні характеристики в томи рекомендується визначати їх по наближеним кореляційним залежностям:

$$\sigma_{-1} \approx (0,4 \dots 0,5) \sigma_{сп} \cdot K_{\sigma Д}; \quad (2.13)$$

$$\tau_{-1} \approx (0,5 \dots 0,7) \sigma_{-1} \cdot K_{\tau Д}; \quad (2.14)$$

де σ_{ep} – тимчасовий опір при розтягу, МПа.

K_{σ_D} (K_{τ_D}) – коефіцієнт, що враховує вплив різних факторів.

Відомості про характеристики витривалості, що застосовуються в машинобудуванні конструкційних сталей і сплавів наводяться в довідковій літературі. У таблиці 2.2 наведені межі витривалості матеріалів.

Таблиця 2.2 – Межі витривалості матеріалів

Матеріал	σ_{mp} , МПа	σ_{st} , МПа	σ_1 , МПа	σ_{-1} , МПа
Сталь маловуглецева	180	320	150	80
Сталь 45 незагартована	340	600	250	150
Сталь 30ХГСА загартована, відпускання	900	1100	500	250

Результати випробувань зразків однієї і тієї ж сталі при згині і розтязі-стиску якісно збігаються, але значення характеристик (зокрема межі витривалості) можуть помітно відрізнятися. У довідниках за властивостями матеріалів приводяться значення меж витривалості (обмеженої і фізичної) для кожного з видів навантаження [45].

На величину межі витривалості зразків і деталей, виготовлених з одного і того ж матеріалу, крім характеристик циклу навантаження впливає цілий ряд різних факторів. Численні експерименти, проведені із зразками різних форм і розмірів, а також практика експлуатації деталей машин показують, що межа витривалості конкретної деталі значною мірою залежить від її форми і розмірів, від стану поверхні та виду її механічної обробки. Всі ці фактори закладені в алгоритмі програми. У вікні Loading Info задається інформація по навантаженню. Наша основна задача з цього вікні – коректно зв'язати з нашою роботою (Job) інформацію по НДС, розрахований на попередньому етапі з циклом навантажень. Цикл напружень – сукупність всіх значень змінних напружень за час одного періоду зміни навантаження. Цикл напружень може описуватися будь-яким періодичним законом, найчастіше – синусоїдальним. Однак міцність матеріалу при циклічному

навантаженні залежить не від закону зміни напружень в часі, а в основному від значень найбільшого (максимального, σ_{max}) і найменшого (мінімального, σ_{min}) напружень в циклі. За умовою роботи млина задаємо симетричний цикл. Симетричний цикл – максимальне і мінімальне напруження дорівнюють за абсолютною величиною і протилежні за знаком (рисунок 2.9) [46], тобто $-\sigma_{max} = \sigma_{min}$, $R = -1$.

Рисунок 2.9 – Симетричний цикл навантаження

Інформація про матеріал з урахуванням конструктивних, технологічних і експлуатаційних факторів впливу задається в розділі Material Info. Після запуску на рішення в розділі "Job Control" головного вікна модуля перемикається в акцію "Monitor Job". Тиснемо "Apply" і бачимо інформацію по ходу виконання роботи. Через деякий час натискаємо ще раз, інформація оновиться (оновлення інформації не автоматизовано і вимагає запиту від користувача у вигляді натискання "Apply") (рисунок 2.10).

Рисунок 2.10 – Інформація про матеріал з урахуванням конструктивних, технологічних та експлуатаційних факторів

2.8 Кінцеві результати чисельного розрахунку

Важливі файли створювані програмою у робочій директорії при виконанні завдання (в нашому прикладі ім'я завдання "nov_test"):

1 nov_test.fin – текстовий файл з параметрами нашої роботи для транслятора. Його можна переглянути, перевірити, виправити і запустити знову на розрахунок.

2 nov_test.fes – бінарний файл початкових даних для вирішувача, з уже розрахованими напруженнями. Подивитися його можна, але спочатку потрібно перетворити в текстовий формат за допомогою утиліти (про це нижче).

3 nov_test.fef – файл результатів розрахунку довговічності, який створюється вирішувачем FEROT після запити на виконання Full Analysis. Це текстовий файл, який може бути прочитаний програмою MSC/Patran для відтворення ізоліній довговічності. На рисунку 2.11 відображений логарифм довговічності.

Мінімальний логарифм довговічності по діаграмі результатів – $10^{5.65}$. Мінімальна кількість – 449000 сортів вінця, що показана на рисунку 2.12.

Рисунок 2.11 – Логарифм довговічності

Рисунок 2.12 – Діаграма
кількості обертів

Висновки до розділу 2

1. Проведено розрахунок напруженого стану вінця кульового млина колеса з шестернею за програмою NASTRAN. Дані щодо напруженого стану отримані в формі і об'ємі, недостатньому для проведення розрахунку довговічності засобами модуля MSC Fatigue.

2. Рівень діючих в конструкції напружень становить 330 МПа, що відповідає умові міцності.

3. Прогнозована довговічність склала $10^{5.65}$ циклів з урахуванням складної геометрії вінця і властивостей матеріалу, що не завжди можливо при обчисленні довговічності за емпіричними формулами. Це говорить про те, що після завершення цих циклів роботи зубчасті передачі, необхідно провести її огляд і вжити відповідних заходів, у разі виявлення дефектів.

РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Розробка методики досліджень поверхневого пластичного деформування на сталях 35Л та 35ХМЛ

Нами проведені дослідження поверхнево-пластичного зміцнення на моделях заготовок зі сталей, що застосовуються для виготовлення зубчастих вінців приводів кульових млинів. Були випробувані зразки сталей 35Л і 35ХМЛ. Їх хімічні і механічні властивості наведені в таблицях 3.1 і 2.

Таблиця 3.1 - Хімічний склад досліджуваних зразків, %

Сталь 35Л ГОСТ 977-75								
C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	Fe
0,32-0,4	0,2-0,52	0,4-0,9	до 0,3	до 0,045	до 0,04	до 0,3	до 0,3	97
Сталь 35ХМЛ ГОСТ 977-80								
C	Si	Mn	S	P	Cr	Mo		
0,3-0,4	0,2-0,4	0,4-0,9	до 0,04	до 0,04	0,8-1,1	0,2-0,3		

Для проведення експериментальних досліджень використані стандартні методики планування і обробки експериментальних даних і теорії статистики [47-50].

Для ЦВД зубчастої передачі прийнятий дробеструменевий метод, як найбільш ефективний, що сприяє збільшенню твердості поверхні зубів на 30...40%, що дозволяє підвищити ресурс роботи зубчастої передачі приводу і самого барабанного млина.

Таблиця 3.2 – Механічні властивості досліджуваних зразків

Сталь 35Л ГОСТ 977-73							
Розмір, мм	σ_T , МПа	σ_T , МПа	δ , %	ψ , %	КСУ, кДж/м ²	Термосоробка	НВ
до 100 мм	500	280	15	25	350	нормалізація 860-880 ⁰ С, відпускання 600-630 ⁰ С	137- 229
Сталь 35ХМЛ ГОСТ 977-80							
до 100 мм	600	400	12	20	300	нормалізація 860-880 ⁰ С, відпускання 600-650 ⁰ С	133- 225

У якості моделюючого способу обробки прийнятий механічний спосіб ППД кулькою або роликком, при якому в поверхневому шарі металу створюється наклеп і залишкові напруження, по глибині зміцненого шару, що моделює процес дробоструменевої обробки.

В результаті процесу ППД необхідно визначити параметри шорсткості R_z від зусилля тиску P кульки або ролика і режимів обробки (S, n), на поверхні заготовки, виконаної у вигляді валу зі сталей 35Л і 35ХМЛ, а також параметри твердості поверхні НВ заготовки при різних зусиллях тиску P і різних обертах n при обкатці кулькою або роликком, а також характер зміни твердості НВ по глибині h зміцненого шару.

На рисунку 3.1 зображений експериментальний стенд, виконаний на базі токарно-гвинторізного верстата GH2060ZH, в патрон якого встановлюється випробувана деталь з виконаною на ній ступенями, попередньо оброблені до шорсткості R_z 20 мкм.

Рисунок 3.1 – Експериментальний стенд на базі
токарно-гвинторізного верстата GH2060ZN

Прийняті позначення: P – тиск обкочувача, Н, n – швидкість обертання деталей об/хв, S – подача обкочувача, мм/об.

На рисунку 3.2, а – зразок деталі з виконаними на ній ступенями для ППД, а на рисунку 3.2, б – обкочувач кульковий; на рисунку 3.2, в – обкочувач роликовий.

а)

б)

в)

Рисунок 3.2 – Досліджуваний зразок деталі та інструменти для обкочування:

а – зразок деталі з виконаними на ній ступенями для ППД; б – обкочувач кульковий; в – обкочувач роликовий

Вимірювання шорсткості проводилася на профілографі HOMMEL T1000 (рисунки 3.3, а), вимірювання твердості поверхні реєструвалося на приладі твердоміром моделі ГК-2М (рисунки 3.3, б).

а)

б)

Рисунок 3.3 – Прилади для вимірювання шорсткості та твердості:

а – профілограф HOMMEL T1000; б – твердомір ТК-2М

При проведенні експерименту використовувалася наступне обладнання:

- токарно гвинтовий верстат марки GH2060ZH;
- динамометр 5 тс,
- твердомір універсальний 54-459м за НВ 95-470;
- різець токарний прохідний відігнутий $\phi = 15^\circ$, $r = 0,5$ мм;
- кулька в державці $d = 4$ мм;
- ролик в державці $d = 22 \times 7$ мм;
- штангенциркуль;
- мікрометр.

Заготовки: $d = 60$ мм сталь 35Л, 35ХМЛ.

Режими попередньої обробки ступенів деталі: зовнішнє обточування $n = 800$ об/хв., $S = 0,05$ мм/об, $t = 0,5$ мм.

В результаті експериментальних досліджень необхідно знайти функціональні залежності: твердості НВ поверхні і по глибині металу при обкатці кулькою і роликом при різних режимах, а також зміну шорсткості поверхні R_z .

Методика проведення роботи по ППД полягає в наступному:

1 Встановити заготовку в центрах верстата, токарний різець – в різцетримач супорта.

2 Проточити з однієї установки п'ять ділянок (ступенів) заготовки. До $R_z = 20$ мкм.

3 Виміряти штангенциркулем діаметр всіх п'яти ділянок.

4 Виміряти середнє арифметичне відхилення профілю твердості (за HB) на всіх проточених ділянках.

5 Виміряти середнє арифметичне відхилення профілю шорсткості (за R_z) на всіх проточених ділянках.

6 Закріпити заготовку в центрах верстата, а в різцетримачі встановити кульковий обкочувач (рисунок 3.4).

Рисунок 3.4 - Процес обробки кульковим накочувачем

7 Встановити режими обкочування для кожної ділянки окремо.

8 Встановити для першого паска зусилля обкочування. Для цього, підвести обкочувач до торкання кулькою поверхні першого паска і встановити тиску обкочувача. Обкатати ползок за один робочий хід при тискові обкочувача $P = 200$ Н. Повторити зазначені прийоми для інших ділянок, послідовно змінюючи число обертів n .

9 Виміряти діаметри пасків, твердість HB і шорсткість R_z їх поверхні на всіх ділянках (таблиця 4.1).

10 При подачі $S = 0,05$ мм/об і числі оборотів $n = 800$ об/хв обробити заготовку для подальшого проведення експериментів. Виміряти діаметр, твердість HB поверхні.

11 При постійному тискові наочувача $P = 400$ Н, постійній подачі S змінюємо число обертів n , здійснюємо обкочування кулькою.

12 Всі результати при обкочуванні кулькою занести до таблиць 4.2-4.3.

13 Зняти з заготовки 0,1 мм шару металу, заміряти твердість HB, повторити заміри твердості при знятті шару металу 0,3 мм, 0,8 мм, 1,2 мм, 1,6 мм, 1,8 мм, 2,0 мм, 2,2 мм і занести до таблиці 4.3.

14 Повторити вищевказані дії за обкочуванні роликком поверхні деталей при тих же режимах n і тискові $P = 400$ Н. Попередньо обробити заново всі ступеня і підготувати поверхню занеши до таблиць 4.4-4.5 дані по шорсткості R_z і твердості HB поверхні до обкочування та після (рисунок 3.5).

Рисунок 3.5 – Процес обробки роликком накочувачем

Висновки до розділу 3

Здійснено розробку методики досліджень поверхневого пластичного деформування на сталях 35Л та 35ХМЛ, а саме:

- наведено хімічний аналіз та механічні властивості досліджуваних зразків;
- розроблено експериментальний стенд на базі токарно-гвинторізного верстата GH2060ZH;
- запропоновано обладнання для вимірювання шорсткості (профілометр HOMMEL T1000) та твердості (твердомір ТК-2М);
- підібрано інструмент для обробки та її режими;
- наведено послідовність виконуваних дій під час проведення натурального експерименту.

РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

Результати експериментальних досліджень шорсткості та твердості при обкочуванні кулькою та роликком сталей 35Л та 35ХМЛ

Результати експериментальних досліджень представлено у таблицях 4.1-4.5.

Таблиця 4.1 – Експериментальні дані шорсткості Rz і твердості НВ поверхні при обкочуванні кулькою ($\varnothing 4$ мм) при тисковій наковчувача $P = 200$ Н

Режими обробки до наковчування				Режими наковчування					
№ досліду	\varnothing Валу, мм	НВ	Rz, мкм	S_n , мм/об / n , об/хв	НВ	Rz, мкм	S_n , мм/об / n , об/хв	P , Н	Матеріал
1	60	111/153	20/20	0,05/800	151/180	3,5/3,5	0,18/800	200	35Л/ 35ХМЛ
2	60	111/153	20/20	0,05/600	143/175	4,7/3,8	0,18/600	200	35Л/ 35ХМЛ
3	60	111/153	20/20	0,05/500	135/170	6,8/5,2	0,18/500	200	35Л/ 35ХМЛ
4	60	111/153	20/20	0,05/400	127/164	9,4/7,8	0,18/400	200	35Л/ 35ХМЛ
5	60	111/153	20/20	0,05/300	119/159	13,8/11,9	0,18/300	200	35Л/ 35ХМЛ
6	60	111/153	20/20	0,05/200	111/154	20/17,5	200/0,18	200	35Л/ 35ХМЛ

Таблиця 4.2 – Експериментальні дані шорсткості Rz і твердості HB поверхні при обкочуванні кулькою ($\varnothing 4$ мм) при тисковій наковувача $P = 400$ Н

Режими обробки до наковування					Режими наковування				
№ з.п.	\varnothing вала, мм	HB	Rz, мкм	S_p , мм/об / n , об/хв	HB	Rz, мкм	S_p , мм/об / n , об/хв	P , Н	Матеріал
1	60	111/153	20/20	0,05/800	184/215	3,5/3,5	0,18/800	400	35Л/35ХМЛ
2	60	111/160	20/20	0,05/600	178/204	3,8/3,8	0,18/600	400	35Л/35ХМЛ
3	60	111/160	20/20	0,05/500	172/193	4,2/4,2	0,18/500	400	35Л/35ХМЛ
4	60	111/160	20/20	0,05/400	165/182	4,9/4,9	0,18/400	400	35Л/35ХМЛ
5	60	111/153	20/20	0,05/300	159/171	6,0/6,0	0,18/300	400	35Л/35ХМЛ
6	60	111/153	20/20	0,05/200	153/160	7,5/7,5	200/0,13	400	35Л/35ХМЛ

Таблиця 4.3 – Експериментальні дані з оцінки твердості HB за глибиною поверхневого шару h , мм при обкочуванні кулькою ($\varnothing 4$ мм) при тисковій наковувача $P = 400$ Н

Сталь 35Л			Сталь 35ХМЛ	
№ з.п.	Зняття металу, мм	HB після обкочування і зняття	Зняття металу, мм	HB після обкочування і зняття
1	0,1	178	0,1	215

Продовження таблиці 4.3

Сталь 35Л			Сталь 35ХМЛ	
№ з.п.	Зняття металу, мм	НВ після обкочування і зняття	Зняття металу, мм	НВ після обкочування і зняття
2	0,3	176	0,3	210
3	0,6	174	0,6	200
4	0,8	172	0,8	210
5	1,0	170	1,0	195
6	1,2	168	1,2	193
7	1,4	166	1,4	190
8	1,6	160	1,6	180
9	1,8	158	1,8	176
10	2,0	153	2,0	168

В результаті проведення експериментальних досліджень, побудовані такі графічні залежності: $R_z = f(n)$; $H_R = f(n)$; $H_B = f(h)$ при тисках $P = 200$ Н і 400 Н.

На рисунку 4.1 представлений графік залежності шорсткості R_z від числа обертів n , об/хв. при $P = 200$ Н при обробці кулькою ($d = 4$ мм) для сталей 35Л і 35ХМЛ.

На рисунку 4.2 представлений графік залежності твердості поверхні $H_B = f(n)$ для сталей 35Л і 35ХМЛ при обробці кулькою ($d = 4$ мм) при $P = 200$ Н.

На рисунку 4.3 представлений графік залежності шорсткості поверхні R_z від числа обертів n , об/хв. для сталей 35Л і 35ХМЛ при обробці кулькою ($d = 4$ мм) при $P = 400$ Н.

На рисунку 4.4 представлений графік залежності твердості поверхні $H_B = f(n)$ для сталей 35Л і 35ХМЛ при обробці кулькою ($d = 4$ мм) при $P = 400$ Н.

Результати експериментальних досліджень після обробки роликком представлено у таблицях 4.4-4.5.

Рисунок 4.1 – Графік залежності шорсткості $R_z = f(n)$ для сталей 35Л і 35ХМЛ при обробці кулькою ($d = 4$ мм) і $P = 200$ Н

Рисунок 4.2 – Графік залежності твердості поверхні $HB = f(n)$ для сталей 35Л і 35ХМЛ при обробці кулькою ($d = 4$ мм) і $P = 200$ Н

Рисунок 4.3 – Графік залежності шорсткості $Rz = f(n)$ для сталей 35Л і 35ХМЛ при обробці кулькою ($d = 4$ мм) і $P = 400$ Н

Рисунок 4.4 – Графік залежності твердості поверхні $HV = f(n)$ для сталей 35Л і 35ХМЛ при обробці кулькою ($d = 4$ мм) і $P = 400$ Н

Таблиця 4.4 – Експериментальні дані шорсткості Rz і твердості НВ поверхні при обкочуванні роликом при тискові обкочувача $P = 400$ Н

№ досліду	Ø вала до, мм	НВ до	S , мм/об	n , об/хв	P , Н	Ø вала після, мм	НВ після	Rz , після, мкм	Матеріал
1	60	153/160	0,18	600	400	59,95	162/215	4,5/4,5	35Л/ 35ХМЛ
2	60	153/160	0,18	500	400	59,95	160/212	4,8/4,8	35Л/ 35ХМЛ
3	60	153/160	0,18	400	400	59,95	158/212	5,0/5,0	35Л/ 35ХМЛ
4	60	153/160	0,18	300	400	59,95	156/211	5,2/5,2	35Л/ 35ХМЛ
5	60	153/160	0,18	200	400	59,95	154/210	5,5/5,5	35Л/ 35ХМЛ

Таблиця 4.5 – Експериментальні дані з оцінки твердості НВ за глибиною поверхневого шару h , мм при обкочуванні роликом при тискові $F = 400$ Н

Сталь 35Л			Сталь 35ХМЛ	
№ з.п.	Зняття металу, мм	НВ після обкочування і зняття	Зняття металу, мм	НВ після обкочування і зняття
1	0,1	184	0,1	216
2	0,3	180	0,3	210
3	0,6	178	0,6	200
4	0,8	172	0,8	188
5	1,0	164	1,0	185

Продовження таблиці 4.5

Сталь 35Л			Сталь 35ХМЛ	
№ з.п.	Зняття металу, мм	НВ після обкочування і зняття	Зняття металу, мм	НВ після обкочування і зняття
6	1,2	160	1,2	183
7	1,4	155	1,4	178
8	1,6	159	1,6	176
9	1,8	154	1,8	178
10	2,0	150	2,0	160

На рисунку 4.5 представлений графік залежності твердості поверхні $HV = f(n)$ для сталей 35Л і 35ХМЛ при обробці роликком при $P = 400$ Н.

Рисунок 4.5 – Графік залежності твердості поверхні $HV = f(n)$ для сталей 35Л і 35ХМЛ при обробці роликком і $P = 400$ Н

На рисунку 4.6 представлений графік залежності шорсткості поверхні Rz від числа обертів n , об/хв для сталей 35Л і 35ХМЛ при обробці роликком при $P = 400$ Н.

Рисунок 4.6 – Графік залежності шорсткості $Rz = f(n)$ для сталей 35Л і 35ХМЛ при обробці роликком і $P = 400$ Н

На рисунку 4.7 представлений графік залежності твердості НВ від товщини зрізаного шару h металу при обкочуванні роликком при $P = 400$ Н для сталей 35Л і 35ХМЛ.

Рисунок 4.7 – Графік залежності твердості $HB = f(h)$ від товщини зрізаного шару металу при обкочуванні роликком при $P = 400$ Н для сталей 35Л і 35ХМЛ

Висновки до розділу 4

Отримано результати експериментальних досліджень шорсткості та твердості при обкочуванні кулькою та роликом сталей 35Л та 35ХМЛ. Знайдені функціональні залежності шорсткості поверхні $R_z = f(n)$, $HV = f(n)$, $HV = f(n)$, в результаті чого встановлено, що поверхнево-пластичне деформування зубчастих передач можна рекомендувати як зміцнюючу технологію, враховуючи той факт, що зміцнення металу відбувається на глибині понад 2 мм.

З рисунків 4.1-4.7 можна зробити наступні висновки:

- 1) існує стійка тенденція зростання зміцнення поверхневого шару під дією кулькових і роликових накочувачів при збільшенні числа обертів деталі і тиску накочувача (до 30%);
- 2) при збільшенні частоти обертання накочувача (кулька або ролик) шорсткість обробленої поверхні зменшується, а твердість зростає;
- 3) шорсткість поверхні після накочування кулькою і роликом зворотно залежить від тиску накочувача.

РОЗДІЛ 5. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБОК

5.1 Безпека праці при поверхнево-пластичному деформуванні

Безпека праці під час поверхнево-пластичної деформації (ППД) вимагає дотримання низки заходів, спрямованих на захист працівників від потенційних небезпек, пов'язаних із цим технологічним процесом. Основні ризики при роботі з ППД включають високі температури, підвищені вібрації, вплив пилу і шуму, а також небезпека травмування від деталей обладнання, що рухаються.

Основні аспекти забезпечення безпеки наступні.

1. Використання засобів індивідуального захисту (ЗІЗ)

Спеціальний одяг, рукавички та взуття для захисту від високих температур та механічних пошкоджень.

Захисні окуляри для запобігання потраплянню пилу та металевих частинок у очі.

Захист органів слуху від шуму під час використання вібраційного устаткування.

2. Контроль вібрацій.

Регулярний технічний огляд обладнання

Використання віброізолюючих підкладок та рукавичок для зниження впливу вібрації на руки оператора.

3. Захист від шуму.

Обладнання робочих місць шумопоглинаючими матеріалами.

Застосування навушників або берушів для зниження шуму.

4. Контроль температури.

Забезпечує достатню вентиляцію на робочому місці для відведення тепла.

Використання теплових екранів для захисту від прямої дії високих температур.

5. Попередження аварійних ситуацій:

Регулярне навчання працівників безпечним методам роботи та проведення техобслуговування.

Проведення інструктажів з техніки безпеки.

Встановлює аварійні вимикачі на обладнанні.

6. Організація робочого місця:

Правильне розташування обладнання та матеріалів для мінімізації ризику випадкових травм.

Підтримка чистоти та порядку на робочому місці, своєчасне видалення відходів.

Дотримання цих заходів допомагає мінімізувати ризики та забезпечити безпеку працівників під час виконання процесів поверхнево-пластичної деформації.

5.2 Розрахунок економічного ефекту

Проведемо розрахунок економічного ефекту від впровадження комбінованої технології МІД вінців зубчастих коліс зі сталей 35Л і 35ХМЛ.

Економічна ефективність використання нової техніки, винаходів та раціоналізаторських пропозицій становить

$$E = (\Delta C + \Delta Ц) \cdot A_2 - (0,15 + A_1) \cdot K, \quad (5.1)$$

де ΔC – зменшення собівартості 1 т продукції після впровадження заходу, грн.;

$\Delta Ц$ – збільшення вартості продукції, грн.;

A_1 – коефіцієнт, що враховує амортизаційні відрахування, $A_1 = 0,1$;

A_2 – кількість продукції, т, $A_2 = 20$ т;

0,15 – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень;

K – капітальні вкладення на впровадження заходів, грн., $K = 25000$ грн. (за даними підприємства).

Економія від зниження собівартості утворюється за рахунок зниженням трудомісткості та витрат на виготовлення:

$$\Delta C = 0,1 \cdot 50000 = 5000 \text{ грн. / т,}$$

де 50000 – середня вартість 1 тони продукції, грн.

Ціна продукції збільшиться за рахунок доплат:

$$\Delta C = \Delta C' \quad (5.2)$$

де $\Delta C'$ – середнє збільшеннє доплат за рахунок даних заходів, грн./т,
 $\Delta C' = 3500$ грн./т;

$$\Delta C = 3500 \text{ (грн./т)}.$$

Відповідно до формули (5.1) маємо наступне:

$$E = (5000 + 3500) \cdot 20 - (0,15 + 0,1) \cdot 25000 = 163750 \text{ (грн.)}.$$

Отже, економічний ефект від впровадження комбінованої обробки ППД під час обробки партії деталей склав 163750 грн. на рік.

5.3 Вплив машинобудівних підприємств на довкілля

Машинобудівні підприємства мають значний вплив на навколишнє середовище, як у процесі виробництва, так і в результаті експлуатації продукції. Основні екологічні проблеми пов'язані із забрудненням повітря, води, ґрунту, а також з утворенням відходів.

Основні види впливу на екологію.

1. Забруднення повітря. Машинобудування пов'язане з викидами в атмосферу шкідливих речовин, таких як оксиди азоту, вуглекислий газ, сажа та леткі органічні сполуки (ЛОС), особливо при литті, зварюванні та термообробці металів. Ці викиди сприяють зміні клімату та утворенню смогу.

Устаткування, що використовує паливо, може виділяти значну кількість CO₂ та інших парникових газів, що посилює парниковий ефект.

2. Забруднення водних ресурсів. Виробничі процеси часто супроводжуються скиданням забруднених вод, що містять олії, важкі метали та хімічні речовини, які можуть призвести до забруднення річок та підземних вод, порушення екосистем та погіршення якості питної води. Охолоджувальні рідини та миючі засоби можуть бути джерелами хімічних забруднень.

3. Відходи виробництва. У машинобудуванні утворюється значна кількість твердих відходів, включаючи металеву стружку, брухт, зношені деталі та пакувальні матеріали. Токсичні відходи, такі як відпрацьовані масла, мастила та фільтри, вимагають особливої утилізації, інакше вони можуть забруднити ґрунт та водні ресурси.

4. Шумове забруднення. Робота важкого обладнання та машин на виробництві створює високі рівні шуму, що негативно впливає на здоров'я працівників та навколишнє населення.

5. Енергоспоживання та витрати ресурсів. Машинобудівні підприємства споживають великі обсяги енергії, що призводить до збільшення попиту на викопні палива, таким чином посилюючи навантаження на навколишнє середовище.

Експлуатація ресурсів для виробництва машин (метали, нафта, природний газ) також впливає на деградацію екосистем.

Заходи щодо зниження впливу такі:

1. Використання сучасних фільтрів та очисних споруд для зниження викидів та скидів забруднюючих речовин.

2. Утилізація та переробка відходів, що зменшує кількість викидів та витрату сировини.

3. Впровадження енергоефективних технологій та використання поновлюваних джерел енергії.

4. Контроль за використанням води та зниження забруднення водних ресурсів.

5. Зменшення негативного впливу машинобудівних підприємств на екологію можливе при переході до більш чистих та ефективних технологій виробництва,

впровадження системи екологічного менеджменту та регулярного моніторингу впливу на довкілля.

Висновки до розділу 5

1. Розглянуто безпечність праці при виконанні робіт, пов'язаних із поверхнево-пластичним деформуванням.

2. Економічна ефективність від впровадження результатів наукового дослідження склала 163750 грн. на рік. Впровадження розробленої методики в процес технологічної підготовки виробництва дозволить зменшити витрати, пов'язані із обробкою технологічних процесів виготовлення деталей, підвищити надійність, довговічність та експлуатаційну придатність вінців зубчастих коліс.

3. Розглянуто вплив машинобудівних підприємств на довкілля, а також заходи щодо зменшення шкідливого впливу.

ВИСНОВКИ

Отже, відповідно до отриманого завдання на кваліфікаційну роботу здобувача вищої освіти та за результатами її виконання зроблено наступні висновки.

1. Аналіз експлуатації приводів кульових млинів показує, що однією із слабких ланок, що знижує термін служби млина, є зношування зубчастих зачеплень приводу, що працює у важких умовах динамічного навантаження і абразивного зношування.

2. Пропонується спосіб зміцнення зубчастих коліс на базі подання теплових потоків, що миттєво вводяться в поверхню металу, і механічний (ударний) вплив дробом або вплив профільованим деформуючим інструментом (ролик або кулька). Такий спосіб забезпечить високу зносостійкість зубчастого зачеплення, дозволить підвищити довговічність зубчастих передач; наприклад важконавантажених коліс приводу кульових млинів (попереднє пропрацювання 10-12 годин, короткочасне нагрівання поверхні зубців до 350-550°C протягом 5-10 мс із подальшою дробоструменевсю обробкою).

3. Розроблена методика розрахунку зубчастого вінця із застосуванням методів скінченноелементного аналізу. Рівень діючих в конструкції напружень становить 330 МПа, що відповідає умові міцності. Прогнозована довговічність склала $10^{5.65}$ циклів з урахуванням складної геометрії вінця і властивостей матеріалу.

4. Проведено експериментальне дослідження ефективності запропонованого методу поверхневого пластичного деформування зубчастих коліс, виготовлених зі сталей 35Л та 35ХМЛ. Існує сильна тенденція зростання зміцнення поверхневого шару під дією кулькових і роликів накочувачів при збільшенні числа обертів деталі і тиску накочувача (до 30%).

5. Розглянуто безпечність праці при виконанні робіт, пов'язаних із поверхнево-пластичним деформуванням. Економічна ефективність від впровадження результатів наукового дослідження склала 163750 грн. на рік. Визначено вплив машинобудівних підприємств на довкілля, а також заходи щодо зменшення шкідливого впливу.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Паніна В. В. Поверхнево-пластична деформація при зміцненні зубчастих коліс // Збірник наукових праць ТСАТУ. – 2020. – С. 45–58.
2. Ніконенко А. В. Технологічні методи підвищення довговічності зубчастих коліс: бакалаврська робота. – Суми : СумДУ, 2022. – 64 с.
3. Трухан О. О. Оброблення зубчастих коліс методом магнітно-абразивного безперервного обкату : магістерська дисертація. – Київ : КПІ, 2019. – 98 с.
4. Охріменко О. А. Аналітичний підхід прогнозування стану поверхневого шару при пластичній обробці зубів передач // Технічна механіка. – 2023. – Т. 29, №3. – С. 55–66.
5. Палівода Ю. Є. Технологія обробки зубчастих коліс та методи зміцнення поверхні : навч. посіб. – Тернопіль : ТНТУ, 2016. – 210 с.
6. Засоби, стенди та машини для випробувань зубчастих коліс і передач : зб. наук. праць. – Харків, 2021. – 180 с.
7. Кравченко О. Ю. Підвищення зносостійкості зубчастих коліс шляхом комбінованого ультразвукового та пластичного зміцнення // Вісник НТУ «ХП». – 2022. – №5. – С. 44–51.
8. Паніна В. В. Методичні вказівки з поверхнево-пластичної деформації деталей зубчастих передач. – Мелітополь : ІДАТУ, 2019. – 56 с.
9. Нечитайло І. П. Вплив технологічної обробки на контактну усталеність зубчастих коліс // Вісник машинсоудування. – 2017. – №1. – С. 38–45.
10. Буряк О. М. Технологічні особливості холодного прокатування зубів великих діаметрів : промисл. звіт. – Краматорськ, 2020. – 42 с.
11. Олехнович С. І. Підвищення зносостійкості зубчастих передач шляхом комбінованого зміцнення // Вісник технічних наук. – 2018. – №2. – С. 71–78.
12. Кондрюк В. І. Комплексні технології виготовлення та зміцнення зубчастих коліс для насосного обладнання. звіт. – Львів, 2021. – 64 с.
13. Influence of Shot Peening on Contact Fatigue Behavior of Gears // International Journal of Fatigue. – 2009. – Vol. 31. – P. 1180–1186.

14. Liang D., et al. Experimental Analysis of Residual Stress and Bending Strength of Shot-Peened Gear Teeth // *Advances in Materials Science*. – 2020. – Vol. 20, No. 2. – P. 45–54.

15. Mo S., et al. Lubrication characteristics of gear after shot peening treatment // *Tribology International*. – 2018. – Vol. 127. – P. 340–349.

16. Haijun M. Normal Contact Stiffness Model of Fine Particle Shot Peened Gears // *Journal of Mechanical Engineering*. – 2022. – Vol. 58. – P. 101–110.

17. Khodae A. Gear Rolling for Production of High-Strength Gears : dissertation. – Loughborough University, 2015. – 180 p.

18. Strengthening the gear teeth with surface work // *Polish Technical Review*. – 2023. – Vol. 5. – P. 24–30.

19. Zhang D., et al. An Advanced DEM-FEM Method for Shot-Peened Herringbone Gears // *Applied Sciences*. – 2024. – Vol. 14. – P. 11234.

20. Li X., et al. Towards understanding influencing mechanism of surface integrity on gear performance // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2025. – Vol. 295. – P. 1098–1113.

21. Generation of gear teeth by plastic deformation // *Proceedings of International Conference on Manufacturing*. – 2019. – P. 77–84.

22. Study of functioning and wear of gear teeth with plastic deformation effects // *Diagnostyka*. – 2025. – Vol. 26, No. 1. – P. 15–23.

23. Shot peening: review and recent advances // *Surface Engineering*. – 2018. – Vol. 34. – P. 651–670.

24. Cold rolling delivers superior gear strength and finish // *GlobalSpec Report*. – 2019. – 12 p.

25. Severe plastic deformation in gear production: review // *Materials Science Reviews*. – 2024. – Vol. 45. – P. 455–478.

26. CFD and experimental studies of cavitation and surface damage in gear teeth // *Journal of Tribology*. – 2020. – Vol. 142. – P. 081202.

27. Experimental studies on erosion and wear of gear tooth surfaces after plastic surface treatments // *Wear*. – 2021. – Vol. 476. – P. 203545.

28. Contact fatigue improvements by induced compressive residual stresses // International Journal of Fatigue. – 2012. – Vol. 39. – P. 63–75.
29. Gear tooth near-net rolling and forming by plastic flow // Journal of Manufacturing Processes. – 2016. – Vol. 24. – P. 290–298.
30. Generation of special-profile gear teeth by plastic deformation // Conference Proceedings on Gearing. – 2020. – P. 102–103.
31. Fine particle shot peening and micro-peening effects on gears // Materials Performance. – 2023. – Vol. 62, No. 7. – P. 41–48.
32. Surface modification combined methods for gears // Coatings. – 2021. – Vol. 11. – P. 1230.
33. Roll-forming of gear teeth: industrial practice and strength data // Industrial Report. – 2018. – 18 p.
34. Residual stress measurement techniques for gear teeth (XRD, hole-drilling, etc.) // Measurement Science and Technology. – 2017. – Vol. 28. – P. 095004.
35. Effects of plastic surface deformation on gear tribology // Tribology International. – 2019. – Vol. 138. – P. 322–330.
36. Modeling of plastic surface layer influence on gear contact mechanics // Finite Elements in Analysis and Design. – 2021. – Vol. 189. – P. 103556.
37. Wear and fatigue life extension of bevel and helical gears by shot peening // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2018. – Vol. 110. – P. 174–182.
38. Hybrid methods: laser shock peening and mechanical plastic deformation for gears // Optics and Lasers in Engineering. – 2022. – Vol. 153. – P. 106993.
39. Manufacture of gears by cold extrusion and forging // Journal of Materials Processing Technology. – 2019. – Vol. 265. – P. 210–218.
40. Limitations and risks of surface plastic deformation of gears // Journal of Engineering Manufacture. – 2020. – Vol. 234, No. 5. – P. 739–746.
41. ISO/TC 60. Gears – Standards and technical reports. – Geneva : ISO, 2020. – 95p.
42. ASTM E2546-07. Standard Practice for Instrumented Indentation Testing. – ASTM International, 2019. – 25 p.
43. ASTM E837-20. Standard Test Method for Determining Residual Stresses by Hole-Drilling Strain-Gage Method. – ASTM International, 2020. – 19 p.

44. Gear rolling strengthening process : industrial report – Berlin : AGMA, 2019. – 14 p.
45. Review paper: Surface work and cold plastic treatments for gears // Polish Technical Review. – 2023. – Vol. 7. – P. 65–72.
46. Proceedings of the International Gear Conference. – Lyon, 2018. – 412 p.
47. Industrial case studies: cold rolling of gears. – Tokyo, 2021. – 32 p.
48. Study of the functioning and wear of the teeth of the intermediate gear // Diagnostyka. – 2025. – Vol. 26, No. 1. – P. 23–29.
49. Generation of the teeth by plastic deformation // Academia Proceedings. – 2020. – P. 55–61.
50. Petrov I., Ivanova M. Innovative methods of ultrasonic plastic strengthening of gear teeth // Materials Today: Proceedings. – 2024. – Vol. 72. – P. 2185–2192.