

Министерство образования и науки Украины
Донбасская государственная машиностроительная академия

Евсейчик Дмитрий Витальевич

Разработка новых методов обработки высокоточных высокомодульных зубчатых
реек тяжелых станков.

8.05050301 – металлорежущие станки и системы

Автореферат магистерской работы

Краматорск – 2017

Работа выполнена на кафедре «КМСИТ» Донбасской государственной машиностроительной академии Министерства образования и науки Украины.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор

Клочко Александр Александрович

Защита состоится «_11_» ____ января ____ 2017 г. в ____ часов на заседании Государственной экзаменационной комиссии в Донбасской государственной машиностроительной академии по адресу: г. Краматорск, б-р Машиностроителей, 34, корп. № 3, ауд. 3308.

У магістерській роботі розглядаються питання, зв'язані з рішенням розробка нових методів обробки високоточних великомодульних зубчатих рейок важких верстатів

Актуальність теми. Надійність і довговічність механізмів і машин у т.ч. із зубчатими рейочними передачами (ЗРП): супортних вузлів унікальних токарських верстатів для обробки роторів 250-тонних турбін, валків прокатних станів, поліграфічних машин, шахтних роботів по постановці скрепей, унікальних грузопасажирських рейкових ліфтопід'ємних машин для будівництва димових залізобетонних труб висотою до 250 метрів конструкції ЦПКБ "Ліфтмаш", залізничної техніки значною мірою визначаються точністю виготовлення й експлуатаційних властивостей деталей (ізносостікостю, коефіцієнтом тертя, контактною твердістю). Експлуатаційні властивості характеризуються станом поверхневого шару робочих поверхонь ЗРП і визначаються технологією їхнього виготовлення. Процес розвитку технології машинобудування підтверджує зростаюче значення наукового обґрунтування технологічного забезпечення (ТЗ) точності виготовлення і системи параметрів поверхневого шару (ПП) деталей машин. Відсутність наукового підходу до забезпечення точності і призначенню параметрів стану робочих поверхонь зубчатих рейок (ЗР) приводить до необґрунтованого завищення вимог і подорожчання машин, що випускаються, без належного підвищення їхньої надійності. Несуча здатність і контактна взаємодія робочих поверхонь ЗР залежать не тільки від параметрів шорсткості, але і від стану поверхневого шару в цілому (макровідхилення, волнистості, шорсткості, фізико-хімічних властивостей). З метою вивчення точності виготовлення і стани ПП потрібно комплексний науковий підхід із установленням системи параметрів ПП і можливістю їх технологічного і метрологічного забезпечення. Для встановлення об'єктивних закономірностей необхідно всі технологічні операції розглядати у взаємозв'язку, тому що кінцеві параметри точності і ПП формуються під впливом усього технологічного комплексу виконуваних операцій, з огляду на дію технологічної спадковості. У машинобудуванні ЗР нарізаються в основному методом профільного формоутворення (ПФ) дисковими чи фрезами набором фрез. Існуючий процес ПФ має цілий ряд істотних недоліків: утворення дефектної поверхні, розкид шорсткості, відхилення параметрів профілю зубів рейок, напрямку зубів, коливання утоняючого зсуву зубів. З метою підвищення ресурсу ЗР завищують коефіцієнт запасу міцності шляхом збільшення чи габаритів модуля зачеплення. Таким чином, резервом для досягнення надійності і довговічності механізмів і машин зі ЗРП: є науково обґрунтоване технологічне забезпечення точності виготовлення і параметрів стану ПП.

У зв'язку зі сказаним, в роботі вирішується актуальна і маюча важливе народногосподарське значення задача розробки і впровадження високопродуктивного технологічного забезпечення якості обробки та показників якості поверхневого прошарку зубчатих рейок.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Магістрська виконана по тематичних планах науково-дослідних робіт Краматорського Науково-дослідного і проектно технологічного інституту машинобудування ННІПТМАШ (тема №314-8969-02, № госрегистрации 0189.0019790 УДК 621.914.2), затвердженого Міністерством важкого машинобудування, і Краматорського заводу важкого верстатобудування (тема НІР 7/12. 98-99), затвердженого Державним комітетом промислової політики України.

Мета і задачі дослідження. Ціль – надійне забезпечення вимог точності і якості поверхневого шару зубчатих рейок технологічними методами при максимальній продуктивності обробки і виключення негативного впливу технологічної спадковості в умовах експлуатації.

Для досягнення поставленої мети в роботі сформульовані і вирішені поставлені задачі:

1. Розробити науково обґрунтовану структуру технологічного забезпечення високоточного процесу формоутворення зубчатих рейок для забезпечення необхідної точності виготовлення і параметрів поверхневого шару.
2. Розробити математичну модель прогнозування показників якості поверхневого шару зубчатих рейок за рахунок стабілізації сил різання при формоутворенні.
3. Розробити систему технологічного і метрологічного забезпечення точності виготовлення зубчатих рейок.
4. Виконати експерименти і зробити перевірку обґрунтованих областей формування шорсткості і параметрів якості поверхневого шару, що визначають експлуатаційні показники зубчатих рейок.
5. Здійснити практичну реалізацію комплексного технологічного забезпечення необхідних точності і якості поверхневого шару зубчатих рейок, розробленого з метою підвищення продуктивності обробки і зменшення впливу технологічної спадковості при виготовленні й експлуатації.

Об'єкт дослідження

Предмет дослідження

Методи дослідження

Робота виконана на основі теоретичних досліджень технологічного забезпечення точності і параметрів стану поверхневого шару зубчатих рейок з використанням положень теорії технології машинобудування, опору матеріалів, термічної обробки, математичного аналізу. Розрахунки вироблялися з використанням ЕОМ. Експериментальні дослідження вироблялися в технологічній лабораторії і виробничих умовах на спеціальних установках, установлених на базі рейкофрезерних і повздошно-стругальних верстатах, на яких були реалізовані технологічні умови забезпечення точності і якості виготовлення зубчатих рейок. Досліджувалися основні технологічні умови якості і точності досягнення параметрів стану поверхневого шару зубчатих рейок з використанням

сучасних приладів і електронної апаратури: кінематомера з магнітоіндуктивними котушками, мобільною рентгенівською камерою, електронного алмазного твердомера, мікроскопів.

Наукова новизна отриманих результатів досліджень полягає в тому, що на базі глибокого структурно-параметричного аналізу існуючих процесів виробництва високоточних, важконагружених, великогабаритних рейок відповідальних рейкових передач, широких статистичних узагальнень особливостей їхньої експлуатації розроблені наукові основи високопродуктивної технології виготовлення зубчатих рейок, що дозволяє надійно забезпечити необхідні точність обробки і якість поверхневого шару з виключенням негативного впливу технологічної спадковості при виготовленні й експлуатації.

Ці основи містять у собі:

1. Математичну модель прогнозування показників якості поверхневого шару зубчатих рейок, що дозволяє керувати структурою і параметрами процесу виробництва.

2. Научно-обосновану структуру технологічного і метрологічного забезпечення високоефективного процесу формоутворення зубчатих рейок, що дозволяє надійно домагатися необхідних точності виготовлення і якості поверхневого шару.

3. Теоретичні умови розрахунку і визначення технологічних параметрів обробки зубчатих рейок дисковими профільними фрезами з урахуванням ефективності обробки й обґрунтованих умов підвищення продуктивності.

4. Методику розрахунку термічної обробки зубчатих рейок у «заневоленом» положенні на точність виготовлення і методом контролю, що неруйнує, мобільною рентгенографічною камерою.

5. Експериментальні дослідження, що підтвердили можливість підвищення продуктивності технології обробки і технологічних умов для практичної реалізації технологічного забезпечення якості і точності виготовлення зубчатих рейок.

Практичне значення отриманих результатів. Практична цінність роботи складається в розробці високопродуктивного технологічного способу обробки зубчатих рейок шляхом науково обґрунтованих рекомендацій із забезпечення точності обробки і якості поверхневого шару.

Теоретично й експериментально встановлено, що з використанням умов формоутворення забезпечується підвищення точності обробки і показників якості поверхневого шару зубчатих рейок, технологічних параметрів для досягнення необхідних умов експлуатації зубчатих рейкових передач і високу продуктивність обробки зі зменшенням енерговитрат.

Розроблені і впроваджені комплексні технології повної обробки зубчатих рейок на Краматорському заводі важкого верстатобудування з річним економічним ефектом 55280 грн. Економічний ефект отриманий за рахунок стабільності технологічних процесів обробки зубчатих рейок за рахунок впровадження ефективних схем формоутворення зубів рейок. Продуктивність

праці підвищена в 1,6 рази в порівнянні з технологією, що існувала, для 8 ступеня точності ГОСТ10242-81 і 2,5 рази для рейок 6-7 ступеня точності ГОСТ10242-81.

На підставі проведеної дисертаційної роботи розроблені типові карти контролю і технологічні процеси обробки зубчатих рейок. Технологія обробки зубчатих рейок надає можливість її реалізації на підприємствах машинобудівного комплексу України.

Вірогідність наукових результатів і висновків сформульованих у дисертації, забезпечені проведенням значної кількості експериментальних і теоретичних досліджень, що підтверджують вірогідність розробленої моделі й отриманих математичних результатів, а також практичне використання результатів роботи.

Особистий внесок здобувча. Особистий внесок здобувча складається в тому, що ним: розроблена математична модель способу формоутворення поверхневого прошарку зуб'їв рейок, запропонував на підставі теорії тертя розглядати технологічний процес формоутворення з урахуванням товщини шару, що зрізується, радіуса округлення крайки інструмента, що ріже і наявності змащення охолодної рідини в зоні обробки, систематизовав верстати й технологічні умови для обробки зуб'їв рейок з обліком вітчизняного і закордонного досвіду, показав фізичну картину і умови формоутворення показників якості поверхневого прошарку зубчатих рейок, довів фізичну картину ефективності прогресивних схем формоутворення, запропонував спосіб контролю точності базових поверхонь зубчатих рейок відповідно до ГОСТ 10242-81, запропонував комплексний підхід у розробці засобів контролю зубчатих рейок з урахуванням надлишкових збільшень по лівій і правій лініях зачеплення, запропонував враховувати рентгенівський аналіз при різних прийомах обробки зубчатих рейок, розроблені технологічні карти диференційованого контролю зубчатих рейок, запропонував регламентовану величину імпульсної подачі при формоутворенні зубчатих виробів, запропонував обробляти зубчаті рейки черв'ячною фрезою з забірним конусом, запропонував для контролю рейок, що неруйнує, конструкцію рентгенівської камери з поліпшеними можливостями фокусування різних ліній дифракційного спектра в кобальтовому та залізному випромінюванні, інтенсифікувати процес обробки зубчатих виробів, засіб компенсації деформацій зубообробного верстата, що виникають у процесі обробки зубчатих виробів, розроблено пристрій для рейкошевінгування та спосіб обробки рейок черв'ячною фрезою.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати досліджень були представлені на науково-технічних семінарах і конференціях: Перший з'їзд технологів на секції "Формоутворення конструкцій з металевих, полімерних і композиційних матеріалів", м.Москва, 1989р.; республіканському науково-технічному семінарі "Шляху підвищення надійності інструмента, що ріже", м.Краматорськ-Київ, 1989р.; усесоюзної науково-технічній конеренції "Зубцюваті передфачи-современность і прогрес", м.Одеса, 1990р.; науково-технічної конференції Донбаської державної машинобудівної академії, м.Краматорськ, 1999р.; міжнародному науково-

технічному семінарі “Interpartner-99”-“Високі технології в машинобудуванні: сучасні тенденції розвитку”, Харків-Алушта, 1999р., 2000р.

У повному обсязі дисертація доповідалася й одержала позитивну оцінку на кафедрі "Металорізальні верстати й інструменти" ДГМА, 1999-2000р.

Публікації. Основні результати дисертації опубліковані в 23 статтях, з них 4 у фахових виданнях, 4 авторських посвідчення, 2 патента.

Структура й обсяг роботи. Дисертація складається з вступу, п'яти розділів, списки використаних джерел, 4 додатків. Загальний обсяг дисертації складається на 246 сторінках, включає: 41 рисунок (5 сторінок), 32 таблиці (4 сторінки), 125 бібліографічних назв (10 сторінок), 4 додатків (15 сторінок).

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

В введенні обґрунтована актуальність теми і практичне значення досліджень, сформульовані основні положення, що виносяться на захист, і дана загальна характеристика дисертації.

Перший розділ присвячений аналізу відомих результатів теоретичних і експериментальних досліджень літературних джерел вітчизняних і закордонних авторів по технологічному забезпеченню точності і параметрів стану поверхневого шару деталей машин і на їхній основі розроблені шляхи підвищення продуктивності і якості обробки зубчатих рейок. Розглянуто основні напрямки по технологічному забезпеченню параметрів стану поверхневого шару. Проведений аналіз літератури показав, що незважаючи на значну кількість робіт, спрямованих на

забезпечення точності обробки і показників параметрів стану поверхневого шару деталей машин, проблема точності обробки зубчатих рейок залишається невирішеною і є актуальною, котра вимагає розробок нових і економічних технологічних напрямків обробки зубчатих рейок. Виходячи з цього в роботі сформульоване наукове положення про можливість підвищення продуктивності обробки зубчатих рейок, обґрунтовані мета і завдання досліджень.

Другий розділ присвячений моделюванню методу профільного формоутворення зуб'їв рейок і складається у визначенні кута неузгодженості між зубами спарених дискових зуборізних фрез за умови, що функція, що характеризує середнє квадратичне відхилення сили різання від постійної, що є середньою силою різання, приймає мінімальне

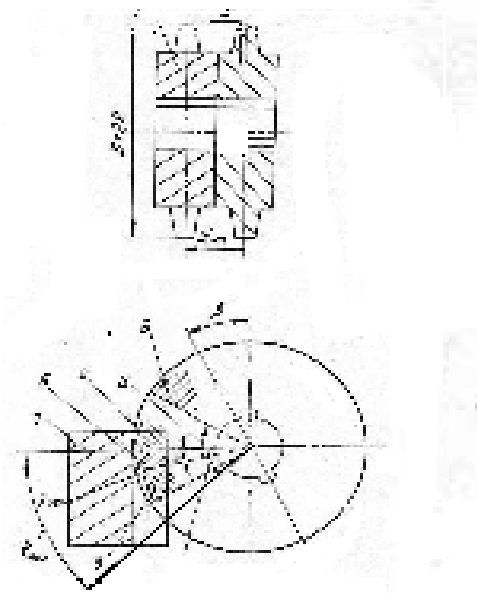


Рис. 1 Схема
расположения
зубьев в зоне
обработки.

значення. Перераховані вище параметри функцій змінюють до одержання тільки одного рішення.

На рис.1 представлена схема розташування зубів у зоні обробки і розташування спарених фрез дискових зуборізних фрез. Формоутворення зубів зубчатих виробів здійснюється з використанням спарених дискових зуборізних фрез 1 і 2, що мають визначений крок, кратний кроку зубчатого виробу, при цьому кратність виражається цілим числом (див. рис.1). У зоні обробки при зніманні металу постійно знаходиться троє і більш зуб'їв 3-5 (див. рис.1), при цьому передня поверхня зуба 5 фрези 2 розташовується між двома передніми поверхнями зуб'їв 3 і 4 фрези 1. При виході з зони різання зуба 3 фрези 1 наступний зуб 4 фрези 1 входить у зону різання, але при цьому в зоні різання знаходиться зуб 5 фрези 2, розташований під визначеним кутом неузгодженості стосовно зуб'їв фрези, що обумовлює стаціонарність формоутворення робочих поверхонь.

Оптимальний кут неузгодженості між зуб'ями спарених дискових зуборізних фрез задають з умови найменшого значення середньоквадратичного відхилення сили різання від її середнього значення.

Сила різання при обробці западини одним зубом у загальному виді[3] може бути представлена вираженням

$$P_1 = C_1 \cdot S_z^{k+1} \cdot \sin^{k+1} \Psi \cdot \left[B + A_3 \cdot \sin^{k+1} \alpha \cdot \frac{1}{\sqrt{1+\lambda^2}} \cdot \left(R - \frac{R - 2,25 \cdot m}{\cos \Psi} \right) \right], \quad (1)$$

$$\text{де } A_1 = C_1 \cdot S_z^{k+1}; \quad A_2 = \left[A_3 \cdot \sin^{k+1} \alpha \cdot \frac{1}{\sqrt{1+\lambda^2}} \right]; \quad A_3 = 1 \text{ при обробці лівого чи правого}$$

профілю; $A_3 = 2$ при обробці лівого і правого профілів одночасно. Вираження (1) запишемо у виді

$$P_1 = P_1(\Psi) = A_1 \cdot \sin^{k+1} \Psi \cdot \left[B + A_2 \cdot A_3 \cdot \left(\frac{R \cdot \cos \Psi - (R - 2,25 \cdot m)}{\cos \Psi} \right) \right], \quad (2)$$

де B - ширина западини зуба оброблюваної деталі 7 (див.рис.1).

Вираження (1) при відповідному значенні ширини западини B и коефіцієнта A_3 описує спосіб профільного формоутворення зубів коліс і рейок. Знаходиться найменша відстань $\rho_{\min}$ між функціями середньоквадратичного відхилення $P_{\text{обц}}$ від постійної C

$$\rho_i = \sqrt{\int [P(\Psi) + P(\Psi + \beta) - C]^2 \cdot d\Psi}, \quad (3) \quad \text{в інтервалі зміни } \beta \text{ від } 0 \leq \beta \leq \Delta, \text{ де інтервал } i = 1.$$

$2 \dots N$ із кроком $h = \frac{\Delta}{N}$. Серед отриманих значень ρ_i вибирається найменше $\rho_{\min}$, котре відповідає оптимуму кута неузгодженості $\beta_{\text{онм}}$.

На підставі викладеного методу розроблений алгоритм вибору оптимальних параметрів кута між зубами спарених дискових зуборізних фрез при попереднім і остаточному формоутворенні зубчатих рейок.

Оптимізація технологічного забезпечення геометричних параметрів стану поверхневого шару при профільному формоутворення зуб'ів коліс і рейок здійснюється по куту неузгодженості β_{onm} , що відповідає найменшому значенню середньоквадратичного відхилення сили різання від її середнього значення.

Основні експлуатаційні властивості поверхні, тобто її мікро і макрогеометрія, мікротвердість формуються протягом усього періоду обробки зубчатих рейок.

При формоутворенні процес врізання теоретично здійснюється з нульової товщини шару, що зрізується, при $a=0$ відбувається тертя ковзання зуба по обробленій поверхні і кожним наступному зубі працює по поверхні. Тому з метою технологічного забезпечення якості обробки і показників якості поверхневого шару зуб'ів рейок визначається мінімальний кут ковзання $\Psi_{ск}$ інструмента.

Якщо розглядати елемент, що впровадився - індентор, що переміщаючи в тангенціальному напрямку, деформує нижележачий матеріал як ріже лезо з радіусом ρ , а глибину нерівності, що впровадилася, h_i , як a_i , то глибина відносного впровадження h_i/ρ запишеться у виді: a_i/ρ . Очевидно, що кут ковзання $\Psi_{ск}$ відповідає пластичному відтискуванню матеріалу, коли матеріал обтікає індентор (інструмент), без відділення від основної маси. При поглибленні сфери в матеріал настає момент, коли відтискування (передформування) матеріалу змінюється його загальмуванням відносно індентора, що приводить до нагрівання матеріалу

Теорія пластичності про ковзання твердого сферичного індентора, що впроваджується в пластично деформуємий простір, на границі між який діє адгезійний зв'язок, що має міцність на зріз, визначає умови переходу пластичного відтискування в різання:

$$\frac{h_i}{R} = \frac{a_i}{\rho} \geq \frac{1}{2} \left(1 - \frac{2 \cdot \tau}{\sigma_s} \right), \quad (4)$$

де $h_i=a_i$ - товщина шару, що зрізується; $R=\rho$ - радіус леза, що ріже; τ - міцність на зріз адгезійного зв'язку; σ_s - границя текучості матеріалу.

Як випливає з (4), при $\sigma_s \leq 2 \cdot \tau$ зовнішнє тертя неможливе при будь-якій відносному впровадженні, воно також неможливо при $h_i/R = a_i/\rho \geq 0,5$ навіть за умови нульової міцності адгезійного зв'язку на зріз.

При змащенні граничним буде відносне впровадження $h_i/R = a_i/\rho \geq 0.31$. При порушенні зовнішнього тертя у випадку $\tau = 0$ і при наявності мастильної плівки на поверхні роздягнула

коефіцієнт тертя в залежності від відношення $h_i/R = a_i/\rho$ визначається з молекулярно-механічної теорії тертя

$$f = \frac{\tau_o}{p_r} + \beta + 0,4 \cdot a_r \cdot \sqrt{\frac{h}{r}}, \quad (5)$$

де $\tau_{про}$ – питома сдвигова міцність молекулярних зв'язків; β - коефіцієнт зміцнення молекулярних зв'язків під дією стискаючих напруг; a_r - коефіцієнт гістерезисних утрат при ковзанні; p_r - тиск на фактичних площадках контакту. Таким чином:

$$f = 0,4 \cdot \sqrt{\frac{a_i}{\rho}}, \quad (6)$$

При формоутворенні з застосуванням поверхово і хімічно активних мастильно-охолодних рідин адгезійна взаємодія між стружкою й інструментом відсутня, адгезійна складова дорівнює нулю і середній коефіцієнт тертя стає постійним, що не залежить від умов різання, тобто при $\tau/\sigma = f_2 \rightarrow 0$

$$f = f_1 + f_2 \rightarrow f_1,$$

де f_1 - коефіцієнт тертя, що залежить від молекулярно-атомної шорсткості поверхонь.

Таким чином, глибина відносного впровадження, що приводить до зняття шаруючи металу без застосування змащення відповідає $a_i/\rho \geq 0,5$, а зі змащенням - $a_i/\rho \geq 0,31$. Т.к. товщина шару, що зрізується, описується формулою $a_i = S_z \sin \Psi_{ск} \cdot \sin \varphi$, де S_z - подача на зуб; φ - кут профілю зуба фрези, мінімальні значення кутів ковзання в суху і із СОЖ визначаються по формулі:

$$\text{без СОЖ} \quad \Psi_{ск} = \arcsin \frac{0,5 \cdot \rho}{S_z \cdot \sin \varphi}, \quad \text{із СОЖ} \quad \Psi_{ск} = \arcsin \frac{0,31 \cdot \rho}{S_z \cdot \sin \varphi}.$$

Визначення мінімальних кутів ковзання при обробці зубцюватих рейок, виходячи з фізико-хімічних процесів механіки тертя дозволяє значно підвищити ефективність процесу формоутворення й експлуатаційних властивостей поверхонь рейок.

Проведені теоретичні й експериментальні дослідження дозволяють визначити оптимальні кути ковзання $\Psi_{ск}$ при якій устанавлюється стабільність формоутворення. Співвідношення між кутом ковзання $\Psi_{ск}$ і найбільшим кутом контакту фрези Ψ_{max} з оброблюваним зубцюватим виробом дозволяє установити ефективність процесу через коефіцієнт $K_{фр}$ без застосування СОЖ і із СОЖ :

$$K_{фр} = \frac{\sin \Psi_{max} - \sin \Psi_{ск}}{\sin \Psi_{max}} \cdot 100\% \quad (7)$$

Аналіз графіків зміни коефіцієнта ефективності фрезерування $K_{эф}$ зубчатих рейок у залежності від режимів різання без застосування СОЖ і із СОЖ показав області, що забезпечують

нормальний процес формоутворення робочих поверхонь. Сприятливою областю технологічного забезпечення параметрів стану поверхневого шару зубчатих рейок є значення коефіцієнта ефективності фрезерування $K_{\text{эф}}$ від 30 до 80% і регламентується радіусом округлення ρ чи величиною зносу по задній поверхні, режимами різання: подачі, швидкості, параметрами шорсткості, сил різання в залежності від прийнятої схеми різання. Експериментальні дослідження показали кореляційний зв'язок між собою висотних параметрів шорсткості R_a , R_z , R_{max} :

$$R_{\text{max}}=6,0 R_a; R_z=5,0 R_a.$$

Визначення конкретних умов обробки зважається у взаємозв'язку з функціональними параметрами стану оброблюваних поверхонь зубчатих рейок. Параметри стану шорсткості поверхні зубчатих рейок при рейкофрезеруванні для сталі мають наступний вид:

$$R_a = P_z \cdot \frac{S_z^{1,69} \cdot a_i^{0,15}}{V^{1,23} \cdot \rho^{0,14} \cdot \lambda^{0,46}}$$

Ці рівняння адекватно описують процес рейкофрезерування. Результати експериментальних досліджень підтверджують теоретичні передумови про широкі можливості механічних методів обробки в технологічному забезпеченні системи параметрів поверхневого шару деталей зубчатих рейок.

Значний вплив на параметри оброблюваних поверхонь зубчатих рейок робить технологічна спадковість, що вказує на широкі можливості керування системою параметрів оброблюваних поверхонь протягом технологічного процесу. Отримані дані використовуються як технічні обмеження по системі параметрів поверхневого шару зубчатих рейок, визначаючих їхні експлуатаційні властивості, при виборі технологічних методів і режимів обробки.

Третій розділ присвячений експериментальним дослідженням перевірки способу розрахунку при профільному формоутворенні зуб'ів рейок. Розроблен метод перевірки за допомогою високоточного електронного приладу кінематографа КН-7У.

Після проведеної серії експериментів по вивченню впливу схем формування поверхонь зуб'ів рейок і статистичної обробки результатів дослідження попереднього й остаточного формоутворення зуб'ів установлений цілий ряд залежностей по технологічному забезпеченню параметрів стану поверхневого шару. Напрямок фрезерування застосовувався зустрічний.

На рис. 2 показані характерні графіки крутящих моментів (T) для дискових острозаточених фрез і спарених фрез з кутом неузгодженості $\beta_{\text{опт}}$. Як видно з графіків, процес

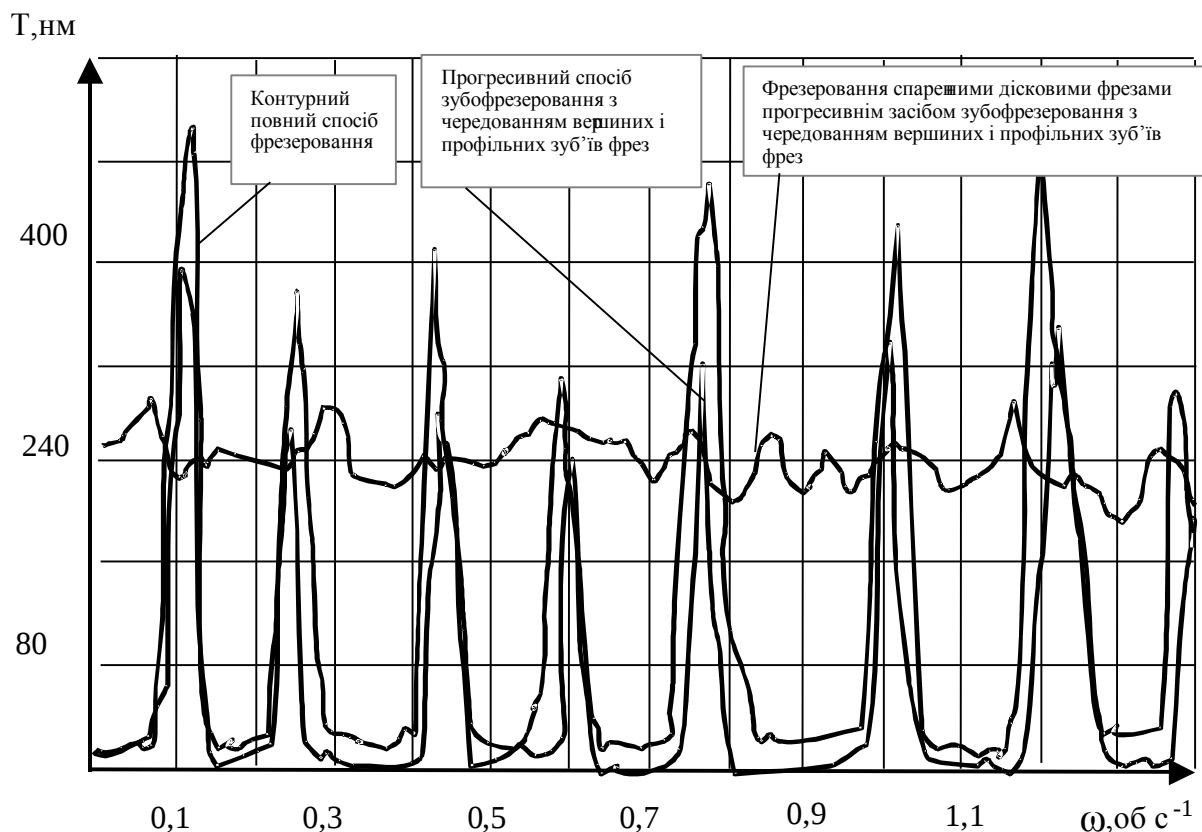


Рис.2 Зміна параметрів формоутворення зубчатих рійок при різних схемах фрезерування

різання дисковими острозаточеними фрезами нерівномірний. Мінливість крутячого моменту, порозумівається безупинною зміною толщин стружок, що зрізуються, зміною кількості одночасно ріжучих зубів фрези, що приводить до безупинної зміни сумарного навантаження на фрези і коливанням системи СПД. Довжина шляху різання кожного зуба фрези нерівномірна, і окремі зуб'я (кожен другий, чи кожен другий і третій) не приймають участі в різанні і має місце пружне і пластичне відтискування матеріалу. Різкі зміни величини моменту, що крутить, при вході зубів фрези в метал заготівлі і при виході породжують вібрації заготівлі і фрези.

З метою одержання узагальненої залежності величини середнього крутячого моменту ($T_{\text{кр}}$), середньої окружної сили різання (P_z), параметра шорсткості R_z від режимів різання (S , V) і товщини шару, що зрізується, (a_i) були проведені дослідження обробки зубчатих рейок модулем $m=8-20$ мм різними схемами фрезерування з застосуванням планування екстремальних експериментів.

Після статистичного аналізу експериментальних даних була отримана математична модель досліджуваного процесу у виді формули

$$T_{кр} = 894 \cdot \frac{a_i^{0,57} \cdot S^{0,48}}{V^{0,091} \cdot 10^{-5} \cdot \rho^{-0,54}} \cdot C_i, \text{нм} \quad (8), \quad R_z = 36 \cdot \frac{a_i^{0,12} \cdot S^{1,69}}{V^{1,23} \cdot \rho^{-0,14}} \cdot (0,1 \cdot P_z)^{0,9}, \text{мкм} \quad (9).$$

Аналіз показав, що формули (8) і (9) практично цілком описують результати експериментів і по ній з достатньою імовірністю можна визначати середній крутящий момент $T_{кр}$ і висоту нерівностей профілю R_z у залежності від обраних технологічних факторів обробки.

З урахуванням модуля зуб'їв рейок і ступеня зносу ріжущих лез фрез, середній крутящий момент, з достатньою для практичних цілей точністю можна визначати по наступній формулі

$$T_{кр} = 894 \cdot \frac{a_i^{0,57} \cdot S^{0,48}}{V^{0,091} \cdot 10^{-5} \cdot \rho^{-0,54}} \cdot C_i \cdot K_m \cdot K_\delta \cdot K_{cx}, \quad (10)$$

де K_m -коефіцієнт, що враховує вплив модуля нарізки зубчатих рейок, K_δ -коефіцієнт, що враховує вплив зносу ріжущих лез фрез, K_{cx} -вибір схеми різання.

Залежності середньої окружної сили P_z від розглянутих технологічних факторів обробки одержимо з формули (9)

$$P_z = 1788 \cdot \frac{a_i^{0,57} \cdot S^{0,48}}{V^{0,091} \cdot D_{фр} \cdot 10^{-5} \cdot \rho^{-0,54}} \cdot C_i \cdot K_m \cdot K_\delta \cdot K_{cx} \quad (11)$$

де $D_{фр}$ -наружний діаметр фрези, мм.

Так як процес різання починається з кута ковзання $\Psi_{ск} = \arcsin(K_{сож} \cdot \rho / S_z \cdot \sin \alpha_s)$, то безпосереднє формування шорсткості оброблюваної поверхні відбувається при повороті зуба фрези на кут ковзання $\Psi_{ск}$.

Технологічне забезпечення експлуатаційних властивостей зубчатих рейок визначається рішенням двох задач: вибір матеріалів рейок і призначення точності розмірів і системи параметрів стану поверхневого шару, що забезпечували необхідні експлуатаційні властивості; вибір методу і встановлення режимів обробки, що забезпечують найбільше економічне одержання заданої точності розмірів і системи параметрів стану поверхневого шару оброблюваних зубчатих рейок. Таким способом зносостійкість рейкових передач характеризується комплексним станом поверхонь контактування.

Рівноважний стан поверхонь тертя зубчатих рейок характеризується параметром]:

$$C_x = \frac{H_p \cdot W_p \cdot (0,75 \cdot R_z)^4}{S_m^6 \cdot k^{-12}} \quad (12)$$

Значення комплексного параметра, що забезпечує необхідну зносостійкість розраховується по формулі:

$$C_x = 3375 \cdot \left[\frac{\sigma_r \cdot E}{\pi \cdot (1 - \mu^2)} \right]^3 \cdot \left(\frac{10 \cdot I \cdot n}{\chi \cdot p} \right)^6 \quad (13)$$

Результати експериментальних досліджень підтверджують правильність приведених вище рівнянь і технологічного забезпечення параметрів стану поверхневого шару зубчатих рейок з допомогою комплексного параметра.

Таблица 1

Розрахункові й експериментальні дані по інтенсивності
зношування зубчатих рейок модулем $m=8$ мм зі сталі АЦ40Х
(поверхнева мікротвердість обробленої поверхні 240Мпа)

Материал контртела	р, МПа	V, м/мин	C _x	Интенсивность изнашивания ($I \cdot 10^{10}$) в установившийся период		Интенсивность изнашивания ($I \cdot 10^{10}$) в период приработки	
				Расчет по формуле	Экспериментальные данные	Расчет по формуле	Экспериментальные данные
Шестерня $m=8$ мм, Z=17 Сталь 40Х Зубья HRC ₃ , 48...52	200	1	12,5	2,92	2,05	0,08	0,12

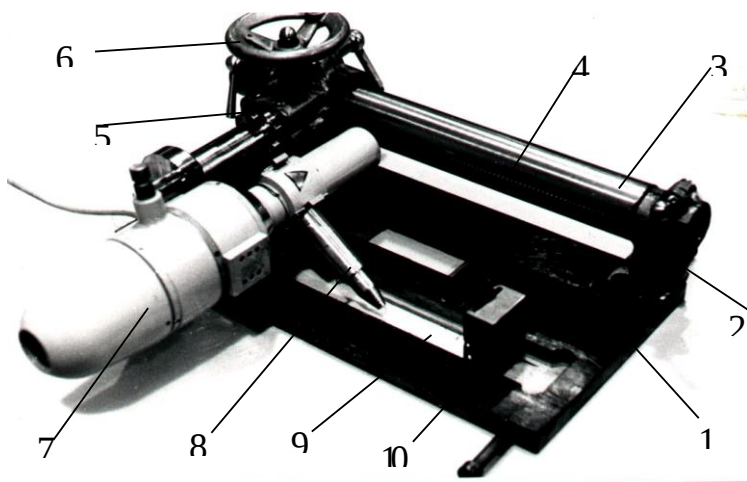


Рис.3 Мобильная рентгенографическая камера, 1-плита, 2-стойки, 3-направляющий вал, 4-зубчатая рейка для перемещения каретки-5, штурвал-6, 7-кожух с рентгенографической трубкой ДРОН-0,5, 8-колиматор, 9-направляющий паз, 10-кассета с пленкой

При технологическом обеспечении равновесного состояния поверхностей трения в процессе изготовления деталей кривая сразу принимает характер установившегося изнашивания.

Оптимальные значения параметров состояния рабочих поверхностей зубчатых реек — шестерня определяются с помощью их

змерения после приработки реек на рабочих осях.

Наиболее важным критерием wyboru способу формоутворення є проведення рентгенографічного дослідження. Рентгенівський аналіз дозволяє найбільше

З метою ефективної експлуатації процесу термостабілізації в “заневоленном” стані в пристосування (мал. 4) установлюють по двох рейки в кожен паз. Така установка рейок дозволяє дотримувати умов техніки безпеки і зручність в обслуговуванні.

При установці в пристосування по двох рейки допускається розраховувати зусилля “защемлення” - P_{Σ} с обліком: $P_{\Sigma} = \kappa \cdot 4,8 \cdot \frac{B \cdot (H - 2,25 \cdot m) \cdot 2,25 \cdot m}{l} \cdot \alpha \cdot \Delta T$, (14)

де κ – кількість зубцюватих рейок, що одночасно проходять термостабілізацію в “заневоленном” стані. У такий спосіб у виробничих умовах доцільно класифікувати зубцюваті рейки на три типорозміри і термостабілізацію робити в трьох пристосуваннях з урахуванням зусилля «защемлення», що забезпечить максимальне використання технологічного устаткування з одержанням необхідної якості геометричних параметрів рейок.

При обробці зубцюватих рейок має місце помітне погіршення оброблюваності. На поверхні зубів рейок утворюються макродефекти: глибокі ризики з рваними краями, Відзначається також занижена твердість поверхні в порівнянні з вимогами технічних умов. Виникає необхідність знайти причину утворення дефектів і намітити шляху її усунення. Причину варто шукати в специфічності структури, що формується в результаті й удосконалюванні технології термічної обробки рейок.

Механічні іспити зразків проводили на машині УММ-20, ударну в'язкість визначали на маятниковому копрі МК-30, твердість – електронним приладом «Ewotip» по шкалі НВ (Бринелля). Мікроструктуру досліджували за допомогою мікроскопа МІМ-8.

Нижче приведена таблиця, що характеризує механічні властивості зразків після трьох варіантів термічної обробки.

Механічні властивості зразків після трьох варіантів
термічної обробки

Таблица 2

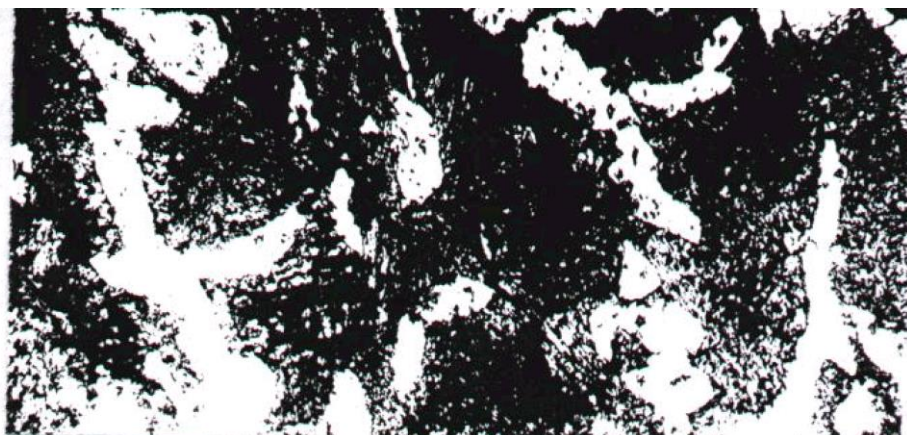
Номер образца	Режим термической обработки	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Твердость, МПа	Относительное удлинение, %	Относительное сжатие, %	Ударная вязкость, МДж/м ²
1	Нормализация с ковочного нагрева	350	730	1870	20	22	0,67

2	Нормализация с 850 ⁰ С	280	610	2010	29	35	0,70
3	Улучшение	470	780	1560	24	48	0,99

Після двох режимів нормалізації забезпечується висока оброблюваність рейок. Твердість поверхні знаходиться в інтервалі значень, припустимих по технічних умовах.



1



2

Рис.5 Микроструктура образцов зубьев реек после термической обработки нормализации с ковочного нагрева (х 400), 1 -схематическое изображение дефектов, 2-снимок поверхности зуба рейки после улучшения

После режима улучшения заметно ухудшается обрабатываемость опытных реек. На

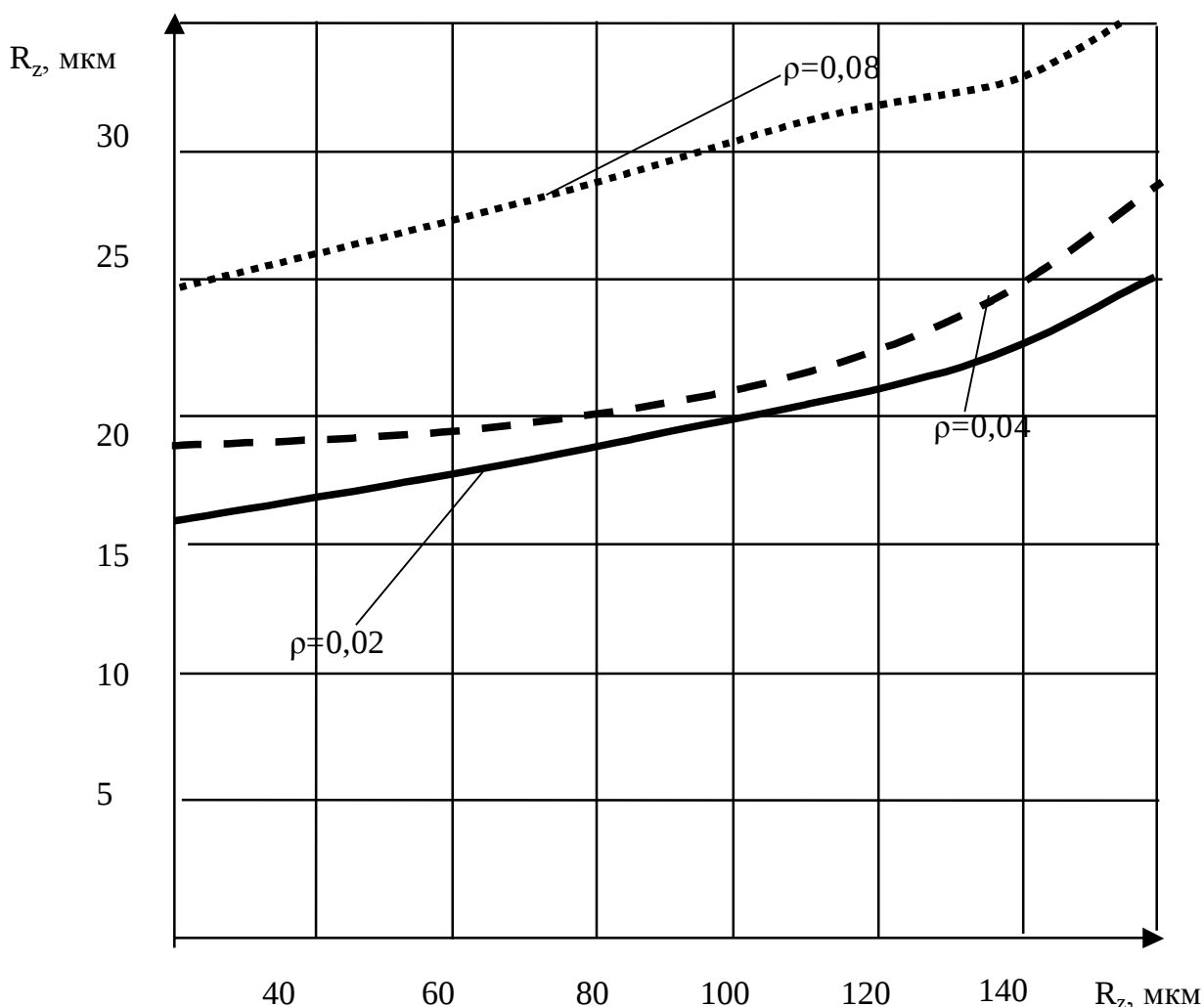


Рис.5. Зависимость параметра шероховатости поверхности R_z от его исходного значения при различных радиусах округления режущего лезвия ρ , мм

поверхні з'являються дефекти, твердість 1560 МПа оказується нижче припустимих значень.

Можливість недогрева зубцюватих рейок при здійсненні термічної обробки цілком ймовірна через неоднорідність температурного поля в робочому просторі печі і недосконалість його контролю. Рейки нижнього ярусу укладання мають температуру більш низьку, чим рейки верхнього ярусу. Рейки з підвищеною кількістю феррита в структурі мають занижену твердість. Відбувається налипання м'якого пластичного феррита на крайці інструмента, що ріже, погіршується якість обробки поверхні зубцюватих рейок. Після нормалізації з кувального нагрівання (мал.5) метал має грубозернисту грубу структуру, в окремих місцях перехідну у видманштеттову. На фотографії помітні голкоподібні ферритні побудови. Показники відносного подовження і відносного стиску порівняно невисокі (таблиця 2).

Більш кращим є другий варіант нормалізації, що припускає нагрівання на 850°C. Після здійснення цього режиму утвориться дрібнозерниста феррито-перлитна структура. Показники,

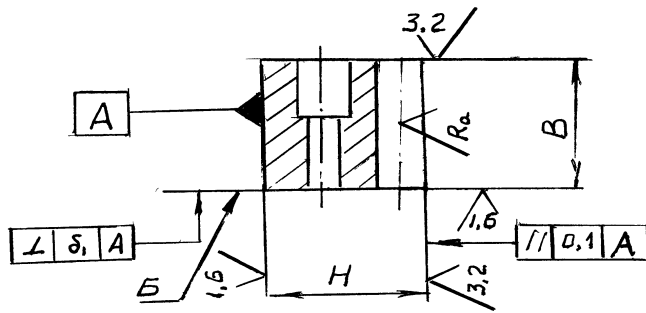


Рис. 7. Конструкторско-технологические требования к зубчатым рейкам

технологічні умови для практичної реалізації технологічного забезпечення якості і точності виготовлення зубцюватих рейок.

У сукупності з технологічним забезпеченням вимірювальних баз (мал.7), що мають неточність форми і розташування, розроблені і впроваджені технологічні типові карти контролю зубчатих рейок (табл.1).

Технологічні типові карти контролю заповнюються при розробці технологічних процесів на кожну конкретну деталь з урахуванням виконання попередніх і остаточних формообразующих операцій і є невід'ємною частиною технологічної документації.

Розглядаючи технологічні можливості чистового формоутворення зубцюватих рейок на основі фізичної картини ефективності прогресивних схем зубофрезерования, на рейкодолбежных і рейкошлифовальных верстатах, найбільш кращими є методи, у яких при чистовій обробці виходить досягти сталість припуску, що знімається, при впровадженні інструмента, що ріже, в оброблюваний матеріал.

До таких технологічних способів чистової обробки зубчатих рейок відносяться рейкошевинговання й обробка черв'ячною фрезою з забірним конусом. Рейкошевингование здійснюється на станках з подовжнім переміщенням столу (Рис. 8).

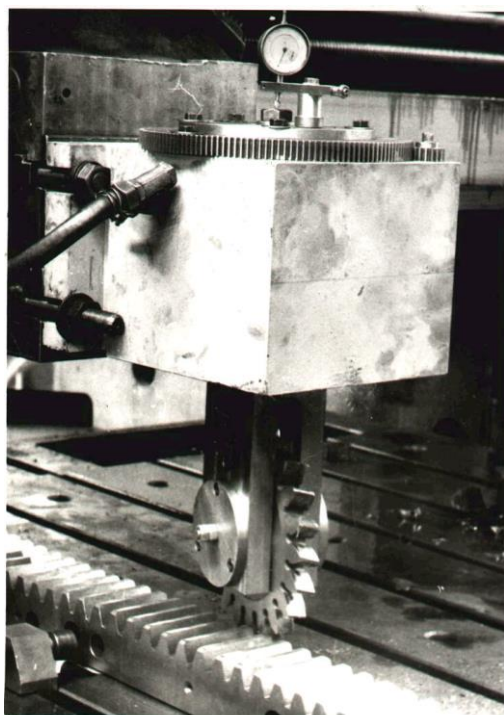


Рис. 8. Чистовая обработка реек рейкошевинговальной головкой дисковым шеве́ром.

При шевінгуванні робочих профілів зубчатих рейок досягається шорсткість поверхні зубів $R_a = 0,25—0,5$ мкм.

що характеризують пластичність, помітно підвищуються: приблизно в 1,5 рази (таблиця 2). Навіть в умовах недогрева відбувається перекристалізація перліту. Не погіршується оброблюваність. Твердість і інші властивості відповідають вимогам технічних умов на виготовлення зубцюватих рейок.

П'ятий розділ присвячений питанням експериментальним дослідженням, що підтвердили можливість підвищення продуктивності технології обробки і

З метою підвищення якості обробки зубчатих рейок за рахунок виключення необхідності зміни міжцентрової відстані при відводі інструмента розроблений спосіб профільного зубострогання при переміщенні черв'ячної фрези, виконаної з забірним конусом, униз при фіксованому положенні крайок, що ріжуть. При виході з зони різання і після зупинки по закінченні робочого ходу в нижнє положенні черв'ячну фрезу повертають на половину окружного кроку канавок, що ріжуть, після чого піднімають у верхнє положення, що забезпечує

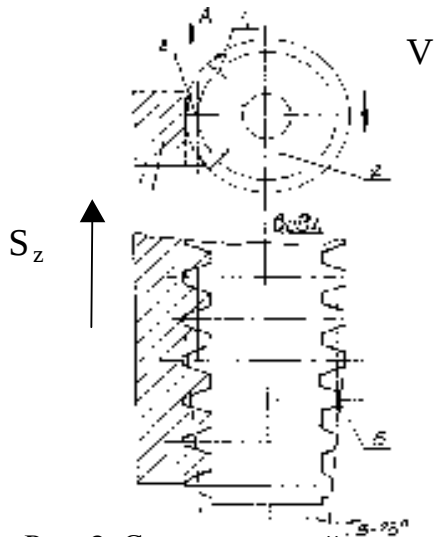


Рис. 9 Схема чистової обробки зубів рейки черв'ячною фрезой

мий поверхнею і зубами фрези. Спосіб чистової обробки (мал. 9) зубів рейок 1 черв'ячною фрезой 2 з крайками, що ріжуть, 3 і 4 і забірним конусом 5, призначеним для перерозподілу припуску по висоті зубів нарізає рейки, здійснюється при положенні крайки, що ріже, 3 у горизонтальному положенні.

Спосіб чистової обробки зубів рейок контурним зубодолбленням чи копіюванням з переривчастим обкатуванням черв'ячною фрезой, зі збереженням міжосьової відстані між віссю черв'ячної фрези і ділильною лінією оброблюваної рейки при висновку інструмента з зони різання-забезпечує підвищення якості обробки, а почергове використання крайок фрези, що ріжуть, сприяє збільшенню стійкості інструмента і рівномірному зносу елементів, що ріжуть.

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

У дисертаційній роботі вирішена актуальна для машинобудування задача розширення технологічних можливостей обробки зубчатих рейок на основі застосування нових технологічних умов які вираховують забезпечення точності та показників якості поверхневого прошарку з метою підвищення продуктивності обробки зубчатих рейок.

1. Розроблено математичну модель формоутворення робочих поверхонь зубів зубчатих рейок з урахуванням технологічного забезпечення параметрів стану поверхневого шару й обґрунтовані умови підвищення продуктивності обробки.

2. Розроблено наукову методику розрахунку і визначення технологічних умов обробки зубчатих рейок дисковими профільними фрезами з урахуванням ефективності обробки, що

дозволяє при профільному формоутворенні зуб'ів рейок визначити кут неузгодженості між зуб'ями спарених дискових зуборізних фрез за умови, що функція, що характеризує середнє квадратичне відхилення параметрів обробки від постійної, що є середньої, приймає мінімальне значення. Перераховані вище параметри функцій змінюють до одержання тільки одного рішення

3. Розроблено принцип розрахунку основних схем технологічного забезпечення параметрів стану поверхневого шару зубчатих рейок.

4. Проведено експериментальні дослідження і вплив термічної обробки зубчатих рейок на точність виготовлення методом контролю, що неруйнує, мобільною рентгенографічною камерою і термічною обробкою зубчатих рейок у «заневоленном» положенні.

5. Розроблені і впроваджені високопродуктивні технології обробки і технологічні умови для практичної реалізації технологічного забезпечення якості і точності виготовлення зубчатих рейок черв'ячною фрезою, що відрізняється тим, що, з метою підвищення якості поверхневого шару товщина шару, що зрізується, залишається постійної при зніманні припуску на кожен зуб фрези рейкошевінгованням і способом обробки рейок черв'ячною фрезою.

6. Розроблено карти технологічного контролю зубчатих рейок, що базуються на новій сукупності реальних виробничих умов із забезпеченням необхідних параметрів точності по нормах кінематичної точності, нормам плавності і нормам бічного зазору.

7. На підставі результатів дослідження розроблені і впроваджені у виробництво високопродуктивні технологічні процеси з урахуванням технологічного забезпечення точності і якості обробки зубчатих рейок з річним економічним ефектом 55280 грн. Економічний ефект отриманий за рахунок стабільності технологічних процесів обробки зубчатих рейок за рахунок впровадження ефективних схем формоутворення зуб'ів рейок. Продуктивність праці підвищена в 1,6 рази в порівнянні з технологією, що існувала, для 8 ступеня точності ГОСТ 10242-81 і 2,5 рази для рейок 6-7 ступеня точності ГОСТ 10242-81.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАНИХ ПРАЦЬ

1. Новые технологические способы обработки высокоточных зубчатых реек в тяжолом станкостроение / А. А. Клочко, Д. В. Евсейчик, И. А. Билан // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2016. – Вып. 39. – С. 143–148.

АНОТАЦІЇ

Евсейчик Дмитрій Витальевич. “Розробка нових методів обробки високоточних великомодульних зубчатих рейок важких верстатів”.-Рукопис. Магістрська на здобуття наукового ступеня магістра.

Магістрська присвячена рішенням актуальної задачі технологічного забезпечення точності обробки та показників якості поверхневого прошарку зубчатих рейок. Для досягнення поставленої мети в роботі сформульовані і вирішені наступні задачі: розроблена математична модель формоутворення робочих поверхонь зуб'їв зубчатих рейок з урахуванням технологічного забезпечення параметрів стану поверхневого шару й обґрунтовані умови підвищення продуктивності обробки, розроблена наукова методика розрахунку і визначення технологічних умов обробки зубцюватих рейок дисковими профільними фрезами з урахуванням ефективності обробки, розроблений принцип розрахунку основних схем технологічного забезпечення параметрів стану поверхневого шару зубцюватих рейок, проведені експериментальні дослідження і вплив термічної обробки зубцюватих рейок на точність виготовлення методом контролю, що неруйнує, мобільною рентгенографічною камерою і термічною обробкою зубцюватих рейок у «заневоленном» положенні, розроботані і упроваджені високопродуктивні технології обробки і технологічні умови для практичної реалізації технологічного забезпечення якості і точності виготовлення зубцюватих рейок. Обґрунтовані умови істотного підвищення продуктивності обробки рейок.

Ключові слова: зуб'я, зубчаті рейки, технологічне забезпечення, математична модель, продуктивність обробки, поверхневий прошарк, показники якості, коефіцієнт ефективності формоутворення.