

Функціональний зв'язок умов обробки з параметрами стану поверхні зубів рейок

О. О. Ключко¹ • О. Я. Юрчишин² • О.А. Охріменко² • Н. В. Семінська²

1 – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків;

2 – КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

Received: 02 November 2019 / Accepted: 24 November 2019

Анотація. Показники якості та надійності зубчастих рейок визначаються параметрами поверхневого шару. Існує велика кількість різноманітних засобів, методів, верстатів, інструментів для обробки поверхонь зубчастих рейок, що забезпечує широкі можливості формування необхідних для якісної та надійної роботи параметрів поверхневого шару. Це робить актуальною задачу встановлення взаємозв'язків експлуатаційних властивостей зубчастих рейок з параметрами стану їх поверхневого шару. Для успішного вирішення цього завдання в роботі розглянуто теоретичні та практичні аспекти взаємозв'язку параметрів стану поверхневого шару рейок з процесами їх обробки. Авторами запропоновано доцільність розгляду залежності системи параметрів стану поверхневого шару, що визначають експлуатаційні властивості зубчастих рейок, з умовами їх обробки. В роботі представлена розроблена математична модель прогнозування якісних показників поверхневого шару, що враховує технологічні, геометричні параметри, а також фізико-механічні властивості матеріалу оброблюваної поверхні рейок у взаємозв'язку з показником стану поверхневого шару, що виражений через параметр шорсткості. Визначено, цей вплив на параметри оброблюваних поверхонь зубчастих рейок, та те що необхідно враховувати протягом технологічного процесу при управлінні системою параметрів оброблюваних поверхонь.

Ключові слова: процеси обробки; зубчасті рейки; формування параметрів; поверхневий шар; функціональний зв'язок; експлуатаційні властивості; процес зняття припуску

Вступ

При обробці зубчастих рейок, внаслідок відхилень форми, значної шорсткості і хвилястості контакт поверхонь відбувається на малих ділянках з нерівномірною концентрацією питомого тиску і викликає підвищений знос робочих поверхонь зубчастих рейкових передач. Всі ці фактори визначаються технологією обробки і впливають на працездатність і довговічність машин [1, 2]. Проте при аналізі технологічних процесів виготовлення рейок, ще не в повній мірі вирішено питання, щодо вибору послідовності операцій їх виготовлення з врахуванням впливу технологічної спадковості на формування параметрів точності розмірів, впливу режимів різання на процеси формоутворення поверхневого шару. Також при розгляді операцій термічної обробки рейок не розглядали процеси отримання геометричної форми заготовок із забезпеченням мінімальних відхилень від площинності, паралельності та прямолінійності [1, 3]. Тому надійна експлуатація машин в значній мірі залежить від розробки і впровадження у виробництво високопродуктивних технологічних процесів обробки і технологічного забезпечення параметрів точності і показників якості поверхневого шару деталей машин. Попередня та остаточна обробка рейок не враховувала «спадковість» і її вплив на подальші процеси обробки. Різноманіття механічних методів обробки [4, 5], верстатів [3, 5, 6, 7, 9], інструментів [3, 5, 8, 10] і матеріалів для обробки зубчастих рейок [4, 11] надає широкі можливості в забезпеченні необхідних параметрів поверхневого шару рейок, які визначають їх експлуатаційні властивості [4, 5, 10].

У роботі пропонується виконати теоретичні та практичні дослідження функціональних зв'язків та умов обробки для забезпечення параметрів стану поверхні зубів рейок, а також нові напрямки їх формоутворення при високій продуктивності обробки.

Метою дослідження є надійне забезпечення вимог точності і якості поверхневого шару зубчастих рейок технологічними методами при максимальній продуктивності обробки і виключення негативного впливу технологічної спадковості в умовах експлуатації з урахуванням практичного вирішення поставленої задачі.

Для досягнення поставленої мети в роботі сформульовані і вирішені наступні завдання:

- встановити функціональний взаємозв'язок умов обробки з параметрами поверхневого шару зубчастих рейок;
- розробити математичну модель прогнозування показників якості поверхневого шару зубчастих рейок за рахунок стабілізації технологічних параметрів при формоутворенні;
- здійснити експериментальну перевірку обґрунтованих областей формування шорсткості і параметрів якості поверхневого шару, що визначають експлуатаційні показники зубчастих рейок;
- розробити методику практичної реалізації комплексного процесу забезпечення необхідних точності і якості поверхневого шару зубчастих рейок з метою підвищення продуктивності обробки та зменшення впливу технологічної спадковості при їх виготовленні і експлуатації.

Результати досліджень

Забезпечення експлуатаційних властивостей зубчастих рейок нерозривно пов'язане із забезпеченням параметрів стану поверхневого шару рейок, який їх визначає. Для успішного вирішення цього завдання необхідно розглянути теоретичні аспекти взаємозв'язку параметрів стану поверхневого шару рейок з процесами і умовами їх формоутворення (рис.1).

При виготовленні зубчастих рейок отримали застосування наступні види зуборізних інструментів: інструменти для нарізування зубів прямозубих і косозубих рейок за методом копіювання, дискові затилувальні фрези або набір фрез, фрези гострозаточені дискові збірні, зуборізні головки; інструменти для обробки прямозубих, а також косозубих рейок за методом центроїдного обкатування [1, 3, 6, 8, 10].

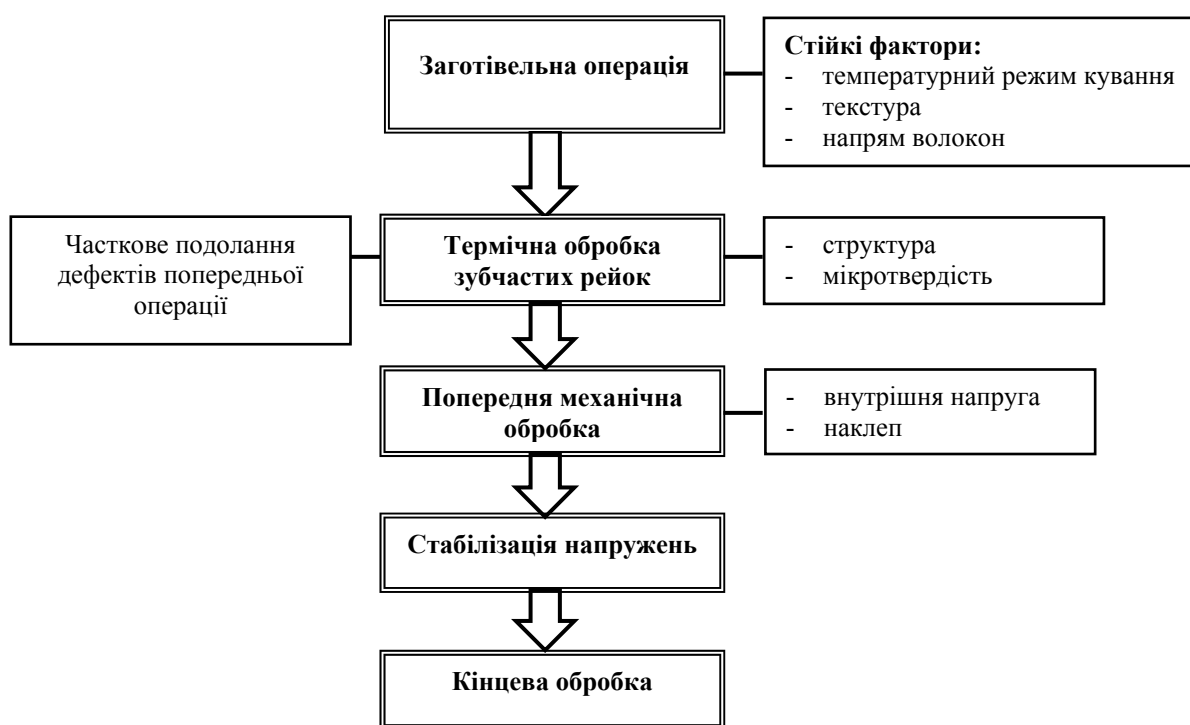


Рис. 1. Структурна модель процесів спадковості при обробці зубчатих рейок

При обробці зубів рейок методом копіювання на рейко-фрезерних верстатах-напівавтоматах схема формоутворення зубів рейок включає обертання дискової фрези, за допомогою якої створюється необхідна швидкість різання щодо закріпленої на столі верстата заготовки. Фреза здійснює рух подачі уздовж оброблюваної западини зубів рейок. Після обробки однієї западини фреза повертається у вихідне положення, і рейка, що обробляється зі столом переміщається на один крок.

Конструкцією рейкофрезерних верстатів передбачено застосування дискових фрез діаметром 180–380 мм з певним числом ріжучих ножів, що визначає несприятливі умови різання через низький коефіцієнт перекриття, рівний 1 – 2 (в зоні або зонах різання знаходиться тільки один або два зуби фрези). З метою підвищення продуктивності процесу обробки в ланцюг головного приводу подачі інструменту встановлюють адаптивні системи управління, які дозволяють контролювати швидкість переміщення виконавчої ланки за попередньо заданою програмою.

Вузькі дрібномодульні рейки доцільно виготовляти на різьбошліфувальних верстатах з закріпленням рейок в спеціальному барабані по 6 – 10 шт як частину гвинтової поверхні.

Обробка рейок методом обкатування забезпечує підвищення точності обробки, але при цьому час на виконання операцій збільшується на 40–60 % в порівнянні з рейкофрезеруванням на кінцевих операціях. Попередня нарізка рейок фрезою з протуберанцем на рейкофрезерних верстатах і кінцева на рейкодовбальних верстатах забезпечують найвищу продуктивність обробки.

При застосуванні спеціальних довбачів на верстаті можна обробляти профілі, які неможливо отримати іншими способами. Верстат призначений для довбання як модульних, так і рейок діаметрального пітчу. Для нарізання косозубих рейок потрібні спеціальні напрямні і гільзи з відповідними косозубими довбачами. Рекомендована глибина врізання довбача за два проходи: 1-й прохід – 90 %, 2-й прохід – 10 %; за три проходи: 1-й прохід – 70 %, 2-й прохід – 27 %, 3-й прохід – 3 %.

На рейкодовбальних верстатах без спеціальних напрямних і гільз косозубі рейки нарізають, змінюючи схему базування. При цьому, рейку встановлюють спеціальною настановною базою під кутом нахилу зубів рейки до осі штоселя.

Зубчасті рейки 11–12-го ступенів точності можна обробляти на поздовжньо-стругальних і фрезерних верстатах за допомогою рейки-еталона, виготовленої за 8-м ступенем точності.

Таким чином, при виборі обладнання для обробки зубчастих рейок необхідно враховувати розміри рейок, ступінь точності, оснащеність інструментом, економічність доцільність застосування методу копіювання або обкатування і обов'язково враховувати технологічні параметри при виборі і призначенні інструменту та режимів різання.

У роботах [2, 3, 4, 7] детально досліджено вплив радіуса округлення різальної кромки інструмента на утворення шорсткості поверхні при різних параметрах процесу токарної обробки. Однак, при формоутворенні поверхні способом фрезерування дисковими фрезами процес обробки супроводжується нерівномірним зняттям припуску [3, 5], значним коливанням жорсткості верстатної системи, вихідним станом ріжучого інструменту і є недостатньо вивченим, тому що розглядався частково окремо від теорії тертя і зносу, контактної жорсткості і міцності деталей.

Таким чином, подальше вивчення процесу формоутворення зубчастих рейок з метою технологічного забезпечення параметрів точності і показників якості поверхневого шару зубчастих рейок є актуальним і залежить від умов їх обробки [2, 9, 10, 14]. Підтвердженням актуальності даного напрямку є фундаментальні наукові положення теорії геометричного тривимірного моделювання взаємопов'язаних процесів зняття припуску і формоутворення при обробці різанням [4, 5, 6] з урахуванням впливу процесів спадковості, що проявляється при дослідженні шляхів покращення точності та якості поверхні зубчастих рейок з метою підвищення експлуатаційних властивостей.

В даний час в результаті проведених досліджень [3, 8, 10] встановлено існування процесів спадковості при утворенні якості робочих поверхонь деталей машин. Процеси спадковості виявляються не тільки після чистових операцій, але і можуть впливати на зміну властивостей або на втрату точності форми готової деталі при її експлуатації в результаті впливу тих чи інших елементів якості поверхні, створених в поверхневому шарі деталі при попередній обробці.

Найпростішим і наочним прикладом, що підтверджує прояв процесів спадковості, може служити явище геометричного копіювання вихідних похибок форми зубчастої рейки в поздовжньому і в поперечному напрямках. Якщо, наприклад, на попередній операції деталь мала відхилення від площинності, перпендикулярності суміжних базових поверхонь і кутової деформації в поздовжньому напрямку, то і на наступній операції вийде відхилення від площинності, перпендикулярності суміжних базових поверхонь і кутова деформація в поздовжньому напрямку, тільки менші за розміром [4, 7].

При виконанні ряду операцій форма і розміри деталі все більше і більше уточнюються, але вихідні похибки в якійсь мірі копіюються на всіх операціях. Це копіювання геометричних похибок, як відомо, пояснюється, в основному, наявністю пружних відтискань в системі ВОІЗ (верстат-оснащення-інструмент-заготовка).

Однак копіювання похибок відбувається не тільки через недостатню твердість системи ВОІЗ, але і внаслідок теплових явищ. Якщо, наприклад, шліфуються базові технологічні поверхні зубчастих рейок з підвищеним вихідним відхиленням від площинності, то навіть абсолютно плоскі після шліфування поверхні рейок через деякий час знову приймають відхилення від площинності. Це пояснюється перерозподілом внутрішніх напружень, створених нерівномірним теплоутворенням при знятті різного по величині припуску з поверхні деталі фрезеруванням.

В роботах [2, 5, 6, 8] під процесами спадковості мається на увазі явище перенесення властивостей оброблюваного об'єкта (заготовки) від попередніх операцій до наступних, яке далі має вплив на експлуатаційні якості деталей машин. При цьому, зміна експлуатаційних властивостей визначається методами і режимами, які застосовуються на окремих операціях термічної і механічної обробки, видом і станом ріжучого інструменту, умовами охолодження, розмірами операційних припусків, послідовністю і змістом операцій технологічного процесу в цілому.

Для забезпечення оптимальної довговічності і надійності роботи деталей необхідно надавати їх обробленим поверхням найвигідніші геометричні характеристики і фізико-механічні властивості. Існує думка,

що на експлуатаційні властивості деталей основний вплив мають точність виготовлення, шорсткість робочих поверхонь, марка матеріалу, його структура і твердість.

Відносно мікрогеометрії поверхні відомо, що важливо забезпечити заданий кресленням клас шорсткості незалежно від способу або методу її отримання [4, 9]. Такий підхід до оцінки якості та експлуатаційних властивостей оброблених поверхонь є помилковим. Проведені дослідження показують, що однакові по шорсткості поверхні деталей машин можуть мати різні експлуатаційні властивості. Це пояснюється тим, що шорсткість сама по собі не може характеризувати фізичного стану поверхневого шару металу. У поверхонь з однаковою кінцевою шорсткістю можуть бути різні ступені наклепу, неоднакові характер і величина залишкових напруг, різні ступені спотворення кристалічної будови і ступінь порушення цілісності поверхні за рахунок мікротріщин, задирів. Різними можуть бути хімічний склад і структура поверхневого шару металу. Якщо поверхня отримана в результаті виконання комплексу механічних операцій з виділенням в зоні різання значної кількості тепла, то окремі хімічні складові можуть вигоряти, в результаті чого знижуються експлуатаційні властивості металу.

Основні експлуатаційні властивості поверхні, тобто її мікро та макрогеометрія, мікротвердість, напружений стан, наклеп, цілісність поверхні, хімічний склад, структура найтонших зовнішніх шарів металу формуються протягом усього періоду обробки деталей. При цьому, окремі властивості і характеристики переходять від операції до операції, тобто як би “успадковуються” від попередніх операцій [2, 5].

При розгляді технологічних параметрів формоутворення рейок доцільно розглядати не загальні аспекти зв'язку окремих параметрів стану поверхневого шару рейок з умовами їх обробки [4, 7], а безпосередній взаємозв'язок системи параметрів стану поверхневого шару, що визначають експлуатаційні властивості зубчастих рейок з умовами їх обробки (рис.2).

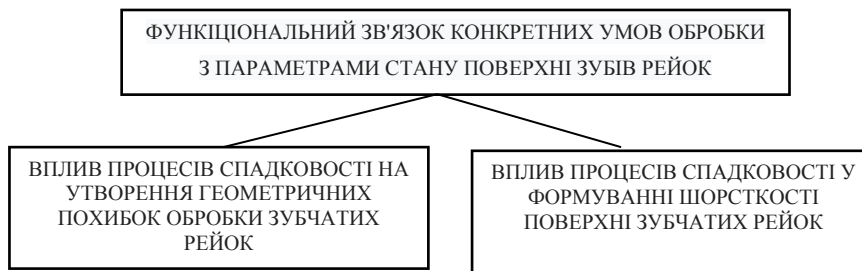


Рис. 2. Функціональний взаємозв'язок умов обробки з параметрами поверхневого шару зубчастих рейок

Цей взаємозв'язок виражається в математичних залежностях, які повинні стати основою при розробці алгоритмів і програми. В результаті чого автоматизується вирішення однієї з основних задач розрахунку оптимальних значень процесу та умов обробки з урахуванням забезпечення необхідних параметрів стану поверхневого шару зубчастих рейок, виходячи з їх експлуатаційних властивостей [5, 8, 9].

Аналіз результатів досліджень по формуванню висоти профілю шорсткості при різних методах обробки [2, 5, 8] дозволяє зробити висновок, що на утворення шорсткості при всіх методах механічної обробки впливають такі чинники як: геометрія робочої частини зубообробного інструменту (радіуса округлення різальної кромки інструмента [6], напрямки нерівностей при заточенні інструмента [7], стану поверхні інструменту [8, 9], ступеня зміцнення робочої частини інструменту [7, 8]); кінематика робочого руху інструмента [1, 3]; пружні і пластичні деформації оброблюваного матеріалу в зоні контакту з робочим інструментом [8, 9, 10]; виривання частинок оброблюваного матеріалу зубчастих рейок [5, 8, 9].

Ступінь впливу кожного з цих факторів на утворення шорсткості поверхні і забезпеченні експлуатаційних властивостей зубчастих рейок буде різною в залежності від обраних параметрів обробки. Такі фактори як геометрія робочої частини зубообробного інструменту, кінематика робочого руху інструмента, пружні і пластичні деформації оброблюваного матеріалу в зоні контакту з робочим інструментом викликають утворення систематичних складових профілю шорсткості, який може бути описано математично. Фактор виривання частинок оброблюваного матеріалу зубчастих рейок викликає утворення випадкової складової профілю і визначає дисперсію параметрів шорсткості.

При механічній обробці зубчастих рейок, як і при зовнішньому терті [2, 6, 9], в залежності від умов обробки можуть відбуватися різні явища, що впливають на формування поверхневого шару. Відповідно до теорії контактної взаємодії деталей [2, 9] при формоутворенні поверхонь механічним способом, в зоні контакту інструмента із заготовкою в загальному випадку мають місце пружні, пружно-пластичні, і пластичні деформації шарів металу і відносний зсув пластично деформованого поверхневого шару щодо оброблюваної поверхні заготовки. Пластичне відтиснення при механічній обробці, яке визначається за залежностями [2, 9], що регламентується радіусом округлення різальної кромки інструмента, який змінюється в процесі формоутворення робочих поверхонь зубчастої рейки і залежить від оброблюваного матеріалу і ріжучого леза інструменту [2, 7, 11], розглядалося без урахування кінематики руху інструменту і умов формування

поверхневого шару виходячи з процесів параметрів обробки і стабілізації процесу обробки. Проведені теоретичні та експериментальні дослідження дозволяють визначити оптимальні кути ковзання $\Psi_{ск}$, при яких встановлюється стабільність процесу зубофрезерування, необхідні умови по стійкості інструменту і якості оброблюваної поверхні по відношенню до найбільшого кута контакту зуба фрези Ψ_{max} із зубчастим виробом, що обробляється. Співвідношення між кутом ковзання $\Psi_{ск}$ і найбільшим кутом контакту зуба фрези Ψ_{max} із зубчастим виробом, що обробляється дозволяє встановити ефективність процесу формоутворення через коефіцієнт $K_{фр}$ без застосування мастильно-охолоджуючих рідин (МОР) та із МОР :

$$K_{фр} = \frac{\sin \Psi_{max} - \sin \Psi_{ск}}{\sin \Psi_{max}} \cdot 100\% . \quad (1)$$

Підставляючи в залежність (1) технологічні параметри обробки, отримуємо зручний для теоретичних і експериментальних досліджень вираз коефіцієнта ефективності формоутворення (2):

$$K_{фр} = \left(1 - \frac{\arcsin \left(K_{мор} \cdot \frac{\rho_i \cdot Z \cdot 10^3 \cdot V}{S_{mi} \cdot \pi \cdot D \cdot \sin \varphi} \right)}{\arcsin \frac{2 \cdot \sqrt{H \cdot (D - H)}}{D}} \right) \cdot 100\% , \quad (2)$$

де S_{mi} – хвилинна подача фрези, мм/хв, D – діаметр фрези, мм, φ – кут вихідного профілю зуба рейки, ρ_i – радіус округлення ріжучої кромки фрези, мм, Z – число зубів фрез, V – швидкість різання, м/хв, H – висота профілю зуба, мм.

В залежності (2) $K_{мор} = 0,5$ при обробці без МОР, $K_{мор} = 0,31$ при обробці з МОР.

Аналіз графіків зміни коефіцієнта ефективності формоутворення фрезерування $K_{эф}$ (рис. 3) зубчастих рейок в залежності від режимів різання без застосування МОР і з МОР показав області, що забезпечують нормальний процес формоутворення робочих поверхонь.

Сприятливою областю технологічного забезпечення параметрів стану поверхневого шару зубчастих рейок є значення коефіцієнта ефективності фрезерування $K_{эф}$ від 30 до 80 % і регламентується радіусом скруглення ріжучого леза інструменту ρ або величиною зносу по задній поверхні, режимами різання: подачею, швидкістю, параметрами шорсткості, силами різання в залежності від прийнятої схеми різання.

Дослідження [3, 14] показали, що в зоні різання коефіцієнт тертя ріжучого леза залежить від шорсткості поверхні, по якій переміщається інструмент, і відповідно, до математичної обробки експериментальних досліджень, коефіцієнт тертя дорівнює:

$$f = 0,148 \cdot R_a^{0,08} \cdot V^{-0,09} \cdot (0,1 \cdot P_z)^{-0,06} , \quad (3)$$

де R_a – середнє арифметичне відхилення профілю, мкм, V – швидкість різання, м/хв, P_z – сила різання, H .

Експериментальні дослідження показали кореляційний зв'язок між собою висотних параметрів шорсткості R_a , R_z , R_{max} . [3, 7]. Визначення конкретних умов обробки вирішується у взаємозв'язку з функціональними параметрами стану оброблюваних поверхонь зубчастих рейок. Параметри стану шорсткості поверхні зубчастих рейок при рейкофрезеруванні для сталі мають такий вигляд:

$$R_z = 5 \cdot R_a = P_z \cdot \frac{S_z^{1,69} \cdot a_i^{0,5}}{V^{1,23} \cdot \rho^{0,14} \cdot \lambda^{0,41}} \cdot K_{фр} , \quad W_z = P_z \cdot \frac{S_z^{1,01} \cdot a_i^{0,46} \cdot \rho^{0,16} \cdot \lambda^{0,54}}{V^{1,55}} \quad (4)$$

де, R_z – висота нерівностей профілю по десяти точкам, мкм, де W_z – висота хвилястості поверхні, мкм, S_z – подача на зуб фрези, мм/зуб, a_i – товщина зрізаного шару, мм, λ – коефіцієнт, що враховує поверхневі залишкові напруження залежно від кількості циклів навантаження інструмента.

Для прогнозування показників якості поверхневого шару розроблена математична модель з урахуванням технологічних, геометричних параметрів і фізико-механічних властивостей за умови переходу пластичного відтискування матеріалу оброблюваної поверхні рейок у взаємозв'язку з відомим комплексним параметром стану поверхневого шару, вираженому через параметр шорсткості R_z .

$$R_z = 5 \cdot R_a = \frac{P_z \cdot S_z^{1,69} \cdot a_i^{0,5}}{V^{1,23} \cdot \rho^{0,14} \cdot \lambda^{0,41}} \cdot K_{фр} = \frac{10,16 \cdot \left(\frac{\sigma_T \cdot E}{\pi \cdot (1 - \mu^2)} \right)^{3/4} \cdot \left(\frac{10 \cdot I \cdot n}{\chi \cdot p} \right)^{3/2} \cdot S_m^{3/2} \cdot k^{-3}}{H^{1/4} \cdot W_z^{1/4}} , \quad (5)$$

де σ_{τ} – границя текучості, МПа, E – модуль пружності, МПа, μ – коефіцієнт Пуассона, n – число циклів, що призводить до руйнування поверхні зубчастих коліс, I – інтенсивність зносу зубчастих коліс в період нормального зносу, χ – коефіцієнт, що враховує параметри опорної кривої, p – питоме навантаження, яке припадає на геометричну площу контакту, МПа, S_m – середній крок нерівностей профілю по середній лінії, мкм, k – постійний коефіцієнт, що залежить від виду обробки, $k = 3$.

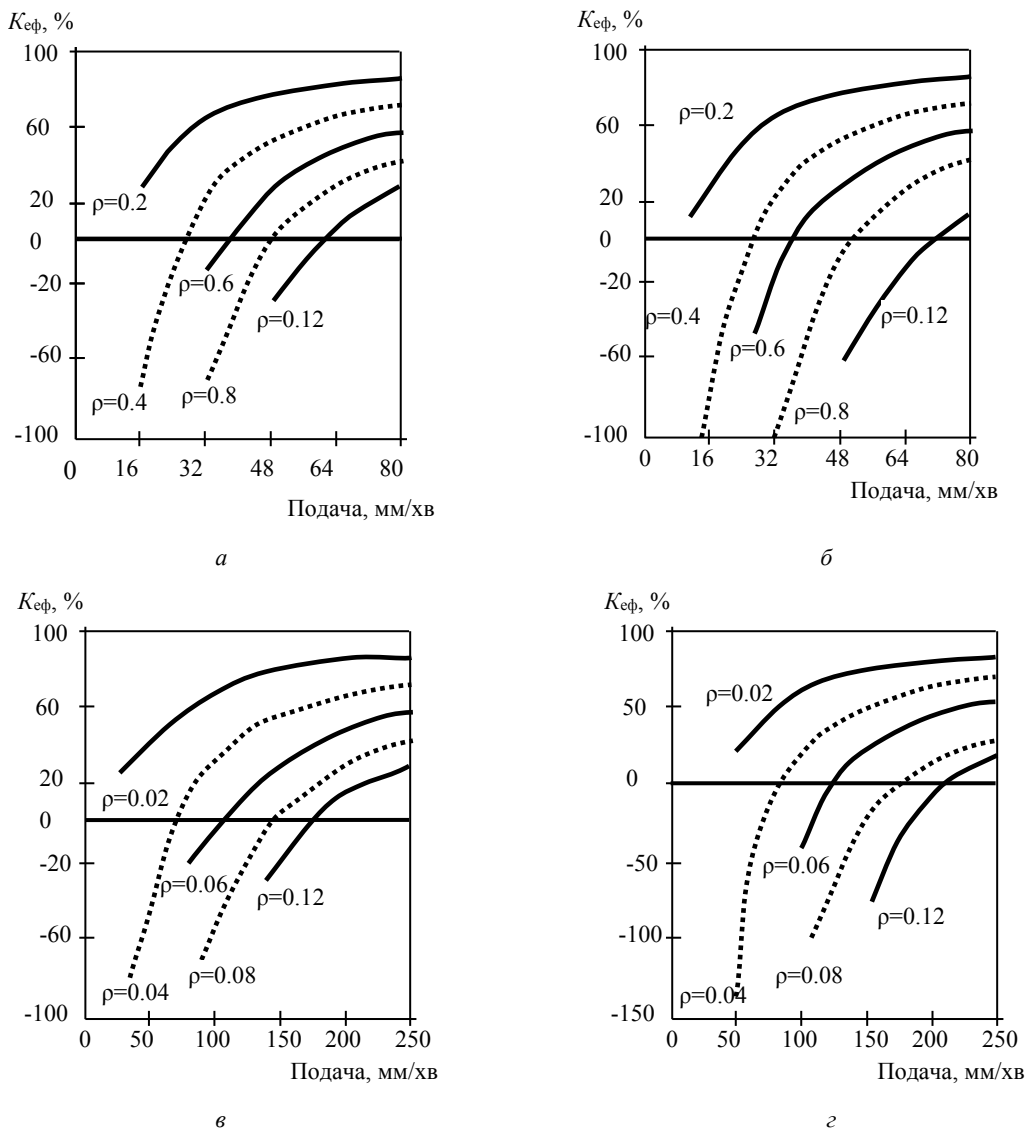


Рис. 3. Графік зміни коефіцієнта ефективності фрезерування $K_{\text{эф}}$ в залежності від режимів різання із застосуванням МОР:
 а – $D = 210$, $Z = 10$, $V = 0,42$; б – $D = 315$, $Z = 10$, $V = 0,66$; в – $D = 210$, $Z = 10$,
 $V = 1,55$; з – $D = 315$, $Z = 10$, $V = 1,98$

Ці рівняння описують процес фрезерування рейки, результати експериментальних досліджень підтверджують теоретичні передумови про широкі можливості механічних методів обробки в технологічному забезпеченні системи параметрів поверхневого шару деталей зубчастих рейок. Значний вплив на параметри оброблюваних поверхонь зубчастих рейок надає технологічна спадковість, що вказує на широкі можливості управління системою параметрів поверхонь, які обробляються, протягом технологічного процесу.

Отримані дані використовуються в якості технічних обмежень по системі параметрів поверхневого шару зубчастих рейок, що визначають їх експлуатаційні властивості, при виборі технологічних методів і режимів обробки.

Висновки

Вивчення стану питання процесів забезпечення параметрів точності і показників якості поверхневого шару зубчастих рейок дозволяє зробити наступні висновки:

1. Забезпечення експлуатаційних властивостей зубчастих рейок нерозривно пов'язане із забезпеченням параметрів стану поверхневого шару рейок, що визначають їх експлуатаційні властивості.

2. На утворення шорсткості при всіх методах механічної обробки впливають геометрія робочої частини зубообробного інструменту; кінематика робочого руху інструменту; пружні і пластичні деформації оброблюваного матеріалу в зоні контакту з робочим інструментом, виривання частинок оброблюваного матеріалу зубчастих рейок.

3. Пластичне відтискання при механічній обробці регламентується радіусом округлення різальної кромки інструмента, який змінюється в процесі формоутворення робочих поверхонь зубчастої рейки, залежить від оброблюваного матеріалу і ріжучого леза інструменту і розглядається без урахування кінематики руху інструменту і умов формування поверхневого шару, виходячи з параметрів обробки та стабілізації процесу обробки.

4. За результатами теоретичних та експериментальних досліджень отримано залежності зміни коефіцієнта ефективності формоутворення фрезерування $K_{ФР}$ зубчастих рейок в залежності від режимів різання без застосування МОР і з МОР і визначено ділянки, що забезпечують нормальний процес формоутворення робочих поверхонь.

5. Проведені дослідження показують, що однакові по шорсткості поверхні деталі машин можуть мати різні експлуатаційні властивості. Це пояснюється тим, що шорсткість сама по собі не може характеризувати фізичного стану поверхневого шару металу.

References

1. Vilmos V. Simon Multi-objective optimization of hypoid gears to improve operating characteristics / Mechanism and Machine Theor. – 2019. – Vol. 146. P. 1–15.
2. Goran Vukelica, D. Pastorcicb, G. Vizentin Failure analysis of a crane gear shaft / ScienceDirect /25th International Conference on Fracture and Structural Integrity / Procedia Structural Integrity. – 2019. – Vol. 18, P. 406–412, <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.08.182>
3. Пермяков О.А. Синтез технологічних параметрів високопродуктивної обробки зубчастих рейок спареними фрезами / О.А. Пермяков, О.О. Клочко, Ю.О. Снина // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2017. – № 17 (1239). – С. 71–77.
4. Имитационное моделирование в задачах машиностроительного производства в 2-х томах, Т. 1: учеб. пособие / А.В. Беловол, А.А. Клочко, Е.В. Набока, А.О. Скоркин, А.Н. Шелковой. под редакцией А.Н. Шелкового // Х.: НТУ «ХПИ», 2016. – 400 с.
5. Степанов М. С. Многокритериальная регламентация параметров поверхностного слоя деталей / М. С. Степанов, А. А. Клочко, А.Н. Кравцов // Физические и компьютерные технологии. Труды 21-й Международной научно-практической конференции. 24–25 декабря 2015, г. Харьков. – Д.: Лира. – 2015. – С. 68–76.
6. Adis J. Muminovic, Adil Muminovic, Elmedin Mesic, Isad Saric, Nedim Pervan Spur Gear Tooth Topology Optimization: Finding Optimal Shell Thickness for Spur Gear Tooth produced using Additive Manufacturing / TEM Journal. Vol. 8, No. 3, August. – 2019. – P. 788–794. http://www.temjournal.com/content/83/TEMJournalAugust2019_788_794.html
7. Некоторые аспекты имитационного математического моделирования геометрических параметров процесса зубофрезерования / А.Н. Шелковой, А.А. Клочко, Е.В. Набока, Е.В. Мироненко, А.Н. Кравцов // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2015. – Вып. 36. – С. 136–149.
8. Шелковой А. Имитационное моделирование в задачах механосборочного производства /А. Шелковой, А. Клочко, Е. Набока // Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. – 528 с.
9. Kalathur Kumar, Arul S., Sriram G., Mani V.N., Prathap V. Kumar Investigating of pitting formation on gear tooth and evaluating life time of gears using sem / International journal of current engineering and scientific research (ijcesr). – 2016. – Vol. 3, No.6. P. 96–103.
10. Li G., Wang Z., Kubo A. Error-sensitivity analysis for hypoid gears using a real tooth surface contact model, Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci. – 2017. – Vol. 231, No.3. – P. 507–521.
11. Литвин О.М. Інтерлінація та інтерфлотація функцій і структурний метод В.Л. Рвачова. Математичні методи та фізико-математичні поля. – 2007. – Т. 50, №4. – С. 25–35.
12. Литвин О. Н., Пасечник В. А. Оптимизация математической модели поверхности трёхмерного тела // Кибернетика и системный анализ. – 2006. – №1. – С. 103–112.
13. Литвин О. М., Пасечник В. О. Оптимізація горизонтальних перерізів математичної моделі поверхні манекена з використанням інтерлінації функцій // Доповіді НАН України. – 2004. – №2. – С. 66–71.
14. Вибір і призначення систем параметрів поверхневого шару циліндричних великомодульних зубчастих коліс, що визначають їх експлуатаційні властивості / Е. В. Мироненко, О. М. Шелковий, О. О. Клочко, О. М. Кравцов // Вісник Національного університету «Львівська політехніка», зб. наук. пр.: Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. Львів. – 2013. – №772. – С. 207–213.

Функциональная связь условий обработки с параметрами состояния поверхности зубов рельсов

А. А. Ключко, О. Я. Юрчишин, А. А. Охрименко, Н. В. Семинская

Аннотация. Показатели качества и надежности зубчатых реек определяются параметрами поверхностного слоя. Существует большое количество различных средств, методов, станков, инструментов для обработки поверхностей зубчатых реек, которые обеспечивают широкие возможности формирования необходимых параметров поверхностного слоя для качественной и надежной работы их. Это делает актуальной задачу определения взаимосвязей эксплуатационных свойств зубчатых реек с параметрами состояния их поверхностного слоя. Для успешного решения этой задачи в работе рассмотрены теоретические и практические аспекты взаимосвязи параметров состояния поверхностного слоя рейки с процессами их обработки. Авторами предложено рассмотрение зависимости системы параметров состояния поверхностного слоя, определяющие эксплуатационные свойства зубчатых реек, с условиями их обработки. В работе представлена разработанная математическая модель прогнозирования качественных показателей поверхностного слоя, учитывающая технологические, геометрические параметры, а также физико-механические свойства материала обрабатываемой поверхности рейки во взаимосвязи с показателем состояния поверхностного слоя, которая выражена через параметр шероховатости. Определено, что это оказывает существенное влияние на параметры обрабатываемых поверхностей зубчатых реек, и то, что этот фактор необходимо учитывать в течение технологического процесса при управлении системой параметров обрабатываемых поверхностей.

Ключевые слова: процессы обработки; зубчатые рейки; формирование параметров; поверхностный слой; функциональная связь; эксплуатационные свойства; процесс снятия припуска

Functional communication of processing conditions with state parameter of the surface of gear rails

O. Klochko, O. Yurchyshyn, O. Ohrimenko, N. Seminska

Abstract

The quality and reliability indicators of gear rails are determined by the parameters of the surface layer. There is an abundance of various means, methods, machines, tools for processing surfaces of gear rails, which provides ample opportunity to form the parameters of the surface layer necessary for high-quality and reliable operation. This makes it an urgent task to establish relationships between the operational properties of gear rails with the state parameters of their surface ball. To successfully solve this problem, the theoretical and practical aspects of the relationship between the state parameters of the surface layer of rails and the processes of their processing are considered. The authors proposed the feasibility of considering the dependence of the system of parameters of the state of the surface layer, which determine the operational properties of gear racks, with the conditions for their processing. The paper presents a mathematical model developed by the authors for predicting the qualitative indicators of the surface layer. The model takes into account technological, geometric parameters, as well as physical and mechanical properties under the condition of transition of plastic deformation of the material of the processed surface of the rails in conjunction with the well-known complex indicator of the state of the surface layer, expressed in terms of the roughness parameter. It is determined that technological heredity has a significant effect on the parameters of the machined surfaces of gear racks. This factor must be taken into account during the process when controlling the system of parameters of the processed surfaces.

Keywords: processing processes; gear rails; parameter formation; surface layer; functional connection; operational properties; allowance removal process.

References

- Vilmos, V. Simon. (2019), "Multi-objective optimization of hypoid gears to improve operating characteristics", *Mechanism and Machine Theory*, vol. 146, pp. 1–15.
- Goran, Vukelica, Pastorcicb, D. and Vizentin. G. (2019), Failure analysis of a crane gear shaft, *ScienceDirect, 25th International Conference on Fracture and Structural Integrity, Procedia Structural Integrity*, vol. 18, pp. 406–412. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.08.182>
- Permyakov, O.A., Klochko, O.O. and Synytsya, YU.O. (2017), Syntez tekhnolohichnykh parametriv visokoproductivnoyi obrobky zubchasti reyok sparenymy frezamy [Synthesis of technological parameters in high-performance processing of gear parts by twin milling cutters], *Visnyk NTU «KHPI», Seriya: Tekhnolohiyi v mashynobuduvanni*, 17, pp. 71–77.
- Belovol, A.V., Klochko, A.A., Naboka, Ye.V., Skorkin, A.O. and Shelkovoy, A.N. (2016), *Imitatsionnoye modelirovaniye v zadachakh mashinostroitel'nogo proizvodstva*, vol. 2, no. 1. [Simulation in the problems of engineering production. vol. 2, no. 1.], in Shelkovoy, A.N. (ed.), NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine.
- Stepanov, M.S., Klochko, A.A., Kravtsov, A.N. (2015), "Multicriteria regulation of the parameters of the surface layer of parts", *Physical and computer technology, Proceedings of the 21st International Scientific and Practical Conference*. Kharkov, December 24–25, pp. 68–76.
- Adis J. Muminovic, Adil Muminovic, Elmedin Mesic, Isad Saric, Nedim Pervan Spur Gear Tooth (2019), "Tooth Topology Optimization: Finding Optimal Shell Thickness for Spur Gear Tooth produced using Additive Manufacturing", *TEM Journal*, 8 (TEM83-13), pp.788–794. http://www.temjournal.com/content/83/TEMJournalAugust2019_788_794.html
- Shelkova, A.N., Klochko, A.A., Naboka, E.V., Mironenko, E.V. and Kravtsov, A.N. (2015), "Nekotoryye aspekty

- imitatsionnogo matematicheskogo modelirovaniya geometricheskikh parametrov protsessa zubofrezerovaniya”, *Tool reliability and optimization of technological systems*, 36, pp. 136–149.
8. Shelkovoy, A., Klochko, A., Naboka, Ye. (2015), *Imitatsionnoye modelirovaniye v zadachakh mekhanosborochnogo proizvodstva* [Simulation in the problems of mechanical assembly production], LAP LAMBERT Academic, Saarbrücken, Germany.
 9. Kumar, Kalathur, Arul, S., Sriram, G., Mani, V.N. and Kumar, V. Prathap (2016), “Investigating of pitting formation on gear tooth and evaluating life time of gears using sem”, *International journal of current engineering and scientific research* .vol. 3, no. 6, pp. 96–103.
 10. Li, G., Wang, Z. and Kubo, A. (2017), “Error-sensitivity analysis for hypoid gears using a real tooth surface contact model”, *Proc. Inst. Mech. Eng.* Vol. 231, no. 3, pp. 507–521.
 11. Lytvyn, O.M. (2007), Interlinatsiya ta interfletatsiya funktsiy i strukturnyy metod V.L. Rvachova. *Mathematical methods and physical-mathematical fields*, vol. 50 (4), p.p. 25–35.
 12. Litvin, O.N. and Pasechnik, V.A. (2006), “Optimizatsiya matematicheskoy modeli poverkhnosti trokhmernogo tela”, *Cybernetics and system analysis*, no. 1, pp. 103–112.
 13. Lytvyn, O.M. and Pasichnyk, V.O. (2004), “Optimizatsiya horyzontal’nykh pereriziv matematychnoyi modeli poverkhni manekena z vykorystannyam interlinatsiyi funktsiy”, *Reports of NAS of Ukraine*, no. 2, pp. 66–71.
 14. Myronenko, E.V., Shelkovyy, O.M., Klochko, O.O. and Kravtsov, O.M. (2013), “Vybir i pryznachennya system parametriv poverkhnevoho sharu tsylindrychnykh velykomodul’nykh zubchastykh kolis, shcho vyznachayut’ yikh ekspluatatsiyini vlastyvoli”, *Bulletin of the National University of Lviv polytechnics. Coll. of sciences. Optimization of production processes and technical control in engineering and instrument making*, no. 772, pp. 207–213.