

**ЮРЧИШИН О.Я., ПІВЕНЬ Л.В., СКИДАН Н.П., ПЕРМЯКОВ Є.О., МИРОНЕНКО О.Є., ЮР'ЄВА М.В.**

### **ФУНКЦІОНАЛЬНИЙ ЗВ'ЯЗОК УМОВ ОБРОБКИ З ПАРАМЕТРАМИ СТАНУ ПОВЕРХНІ ЗУБІВ РЕЙОК**

Значна кількість механічних методів, верстатів, інструментів і матеріалів для обробки зубчастих рейок визначає широкі можливості в забезпеченні формування параметрів поверхневого шару останніх і визначає їх експлуатаційні властивості. Тому актуальним є питання забезпечення експлуатаційних властивостей зубчастих рейок в залежності від параметрів стану поверхневого шару рейок. Для успішного вирішення цього завдання розглянуто теоретичні аспекти взаємозв'язку параметрів стану поверхневого шару рейок з процесами їх обробки. На відміну від відомих досліджень, які передбачали виявлення загальних аспектів зв'язку окремих параметрів стану поверхневого шару рейок з умовами їх обробки, авторами запропоновано доцільність розгляду залежності системи параметрів стану поверхневого шару, що визначають експлуатаційні властивості зубчастих рейок з умовами їх обробки. Цей взаємозв'язок виражається в математичних залежностях, які є основою при розробці алгоритмів і програм. Як наслідок, автоматизується вирішення однієї з основних задач розрахунку оптимальних процесів обробки з урахуванням забезпечення необхідних параметрів стану поверхневого шару зубчастих рейок, виходячи з їх експлуатаційних властивостей. На підтвердження даного напрямку розроблені фундаментальні наукові положення теорії геометричного тривимірного моделювання взаємопов'язаних процесів зняття припуску і формоутворення при обробці різанням.

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

### **YURCHYSHYN O.Ya., PIVEN L.V., SKIDAN N.P., PERMYAKOV E.A., MIRONENKO O.E., YUR'eva M.V. FUNCTIONAL RELATIONSHIP OF THE PROCESSING CONDITIONS WITH PARAMETERS OF THE CONDITION OF THE SURFACES OF RAIL TEETH**

A significant number of mechanical methods, machines, tools and materials for processing toothed rails determines wide possibilities in ensuring the formation of the parameters of the surface layer of the latter and determines their operational properties. Therefore, the issue of ensuring the operational properties of toothed rails depending on the parameters of the condition of the surface layer of the rails is relevant. In order to successfully solve this problem, the theoretical aspects of the relationship between the parameters of the state of the surface layer of the rails and the processes of their processing are considered.

In contrast to well-known studies, which provided for the identification of general aspects of the connection of individual parameters of the surface layer of rails with the conditions of their processing, the authors proposed the feasibility of considering the dependence of the system of parameters of the surface layer, which determine the operational properties of toothed rails, with the conditions of their processing. This relationship is expressed in mathematical dependencies, which are the basis for the development of algorithms and programs. As a result, the solution of one of the main tasks of calculating the optimal processing processes, taking into account the provision of the necessary parameters of the state of the surface layer of toothed rails, based on their operational properties, is automated. In support of this direction, the fundamental scientific principles of the theory of geometric three-dimensional modeling of the interconnected processes of allowance removal and forming during cutting have been developed.

**Keywords:** processing processes; toothed rails; formation of parameters; surface layer; functional connection; operational properties; allowance withdrawal process

**Вступ.** Технологічне забезпечення та підвищення якості машин і приладів, що випускаються, можуть бути успішно здійснені тільки при комплексному виборі, призначенні, технологічному і метрологічному забезпеченні системи параметрів стану поверхневого шару деталей, що характеризують їх експлуатаційні властивості.

В даний час існує два наукові напрями в технологічному забезпеченні та підвищенні експлуатаційних властивостей деталей машин. Перше передбачає технологічне забезпечення системи параметрів поверхневого шару деталей, що визначає їх експлуатаційні властивості. Друге технологічне забезпечення безпосередньо експлуатаційних властивостей деталей машин.

Цей напрямок також розвивається шляхом створення комплексних параметрів, що характеризують стан поверхневого шару деталей і визначають те чи інше експлуатаційне властивість та встановленням взаємозв'язку цих комплексів з технологією обробки з урахуванням технологічної спадковості та контролю цих комплексних параметрів.

Розробка наукових технологічних напрямів при обробці зубчастих рейок із забезпеченням необхідної якості та заданої продуктивності гарантує високі експлуатаційні характеристики готової продукції. Різноманіття механічних методів обробки [1, 2, 3, 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].

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** При механічній обробці зубчастих рейок, як і при зовнішньому терті [1, 4, 20], в залежності від умов обробки відбуваються явища, що впливають на формування поверхневого шару. Відповідно до теорії контактної взаємодії деталей [2, 9, 11] при формоутворенні поверхонь механічним способом в зоні контакту інструменту з заготовлею в загальному випадку мають місце пружні, пружно-пластичні, і пластичні деформації шарів металу і відносний зсув поверхневого шару, що пластично деформується. Пластичне відтискання при механічній обробці визначається за формулами [4, 16, 9], регламентується радіусом округлення різальної кромки інструменту, який змінюється в процесі формоутворення робочих поверхонь зубчастої рейки і залежить від оброблюваного матеріалу та різального леза інструменту [5, 12, 16] і розглядався без урахування кінематики руху інструменту та умов формування поверхневого шару виходячи з технологічних параметрів обробки

У роботах [12, 14, 15, 17] детально досліджено вплив радіуса округлення ріжучої кромки інструменту на утворення шорсткості поверхні при різних технологічних параметрах токарної обробки. Однак, при формоутворенні поверхні способом фрезерування дисковими фрезами процес обробки супроводжується нерівномірним зняттям припуску [5, 7, 9, 19, 20], значним коливанням жорсткості технологічної системи, вихідним станом ріжучого інструменту є недостатньо вивченим, т.к. розглядався в деякому відриві від теорії тертя та зносу, контактної жорсткості та міцності деталей. Таким чином, подальше вивчення процесу формоутворення зубчастих рейок з метою технологічного забезпечення параметрів точності та показників якості поверхневого шару зубчастих рейок є актуальним та залежить від умов обробки [3, 11, 12, 15, 18]. На підтвердження цього напряму є фундаментальні наукові положення теорії геометричного тривимірного моделювання взаємопов'язаних процесів знімання припуску та формоутворення при обробці різанням [8, 106].

**Мета та задачі.** Ціль дослідження- надійне забезпечення точності і якості поверхневого шару зубчастих рейок технологічними методами при максимальній продуктивності обробки виключення негативного впливу технологічної наслідковості в умовах експлуатації з урахуванням практичного вирішення поставленої задачі.

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

1. Розібрати науково- обґрунтовану структуру забезпечення високоточного процесу формоутворення зубчастих рейок для забезпечення необхідної точності виготовлення і параметрів поверхневого шару.
2. Розробити математичну модель прогнозування показників якості поверхневого шару зубчастих рейок за рахунок стабілізації технологічних параметрів при формоутворенні.
3. Розробити систему технологічного і метрологічного забезпечення точності виготовлення зубчастих рейок.
4. Експериментальна і промислова перевірка обґрунтованих областей формування шорсткості і параметрів якості поверхневого шару, які визначають експлуатаційні показники зубчастих рейок.
5. Здійснити практичну реалізацію комплексного процесу забезпечення необхідних точності і якості поверхневого шару зубчастих рейок, розробленого з метою підвищення продуктивності обробки і зменшення впливу технологічної наслідковості при виготовленні і експлуатації.

**Основна частина. Основна частина: методологія, математична модель, практичне застосування, аналіз результатів, подальше використання** 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. 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. 1).



Рис. 1. Функціональний взаємозв'язок умов обробки з параметрами поверхневого шару зубчастих рейок

Цей взаємозв'язок необхідно виразити в математичних залежностях, які повинні стати основою при розробці алгоритмів і програми. В результаті автоматизується вирішення однієї з основних задач розрахунку оптимальних процесів 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 крайки 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.

Задача побудови математичної моделі поверхні зубчатої рейки виникає при описі процесів формоутворення деталей за даними контролю на вимірвальній машині, при описі поверхневого шару і стану базових поверхонь. Не дивлячись на значні успіхи при розв'язанні цієї задачі, на практиці побудова якісних поверхонь зубчастих рейок, які повинні задовольняти ряду технологічних обмежень, ще далека від оптимальної. Одним з найскладніших факторів при побудові таких математичних моделей є відповідність технологічним обмеженням диференціального типу (неперервність похідних заданих порядків). Тому актуальною є задача побудови і дослідження математичних моделей поверхонь у неявній формі, які точно задовольняють заданим технологічним обмеженням.

Для опису поверхні тіла використовуються:

- явна форма задання поверхні у вигляді

$$z = f(x, y), (x, y) \in D_{xy} \text{ або } y = f(x, z), (x, z) \in D_{xz} \text{ або } x = f(y, z), (y, z) \in D_{yz};$$

де  $z$  - комплексний параметр в умовах тертя і зношування;  $y$  - комплексний параметр в умовах циклічного навантаження;  $x$  - комплексний параметр при підвищеній шорсткості зубів рейок;  $D_{yz}$ ,  $D_{xy}$ ,  $D_{xz}$  - межа міцності при розтягуванні, стисненні, вигині;

- неявна форма задання поверхні у вигляді  $F(x, y, z) = 0, (x, y, z) \in D_{xyz}$ ;

- задання поверхні у вигляді точкового каркасу  $M_k(x_k, t_k, z_k), k = \overline{1, N}$ ;

де  $x_k$  - середнє арифметичне відхилення профілю;  $t_k$  - середній крок нерівностей по вершинах локальних виступів;  $z_k$  - висота нерівностей профілю по десяти точках;  $k$  - коефіцієнт формування поверхневого шару при рейкофрезеруванні;  $I$  - інтенсивність зносу зубчастих рейок;  $N$  - поверхнева мікротвердість.

- параметричне задання поверхні у вигляді

$$x = x(u, v), \quad y = y(u, v), \quad z = z(u, v), \quad (u, v) \in D_{uv}$$

де  $u$  - швидкість різання;  $v$  - хвилинна подача.

Найчастіше для розв'язання цієї задачі використовуються

циліндрична система координат

$$x = x(r, \varphi) = r \cos \varphi, \quad y = y(r, \varphi) = r \sin \varphi, \quad z = z \\ 0 \leq r < \infty, \quad 0 \leq \varphi < 2\pi, \quad -\infty < z < \infty$$

в даних залежностях прийнято, що на поверхні тіла  $r = r(\varphi)$ ;

- сферична система координат

$$x = x(r, \varphi, \theta) = r \cos \theta \cos \varphi, \quad y = y(r, \varphi, \theta) = r \cos \theta \sin \varphi, \quad z = z(r, \varphi, \theta) = r \sin \theta \\ 0 \leq r < \infty, \quad 0 \leq \varphi < 2\pi, \quad -\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}.$$

де  $r$  - радіус скруглення різальної крайки фрези;  $\varphi$  - кут профілю зуба фрези в нормальному перерізі;  $\theta$  - найбільший кут контакту зуба фрези при зубофрезеруванні.

В даних залежностях приймається, що на поверхні тіла  $r = r(\varphi, \theta)$ .

Найбільш розповсюдженими засобами цифрового представлення поверхневого шару є растрове представлення та особлива модель просторових даних (DEM), яка апроксимує поверхневий шар багатогранною поверхнею з відліками висот (хвилястості та шорсткості) у вузлах трикутної сітки [11]. Система DEM є загальноприйнятною при описі поверхневого шару на основі даних замірів. Її недолік: на кожній грані багатогранної поверхні аналітична форма поверхні визначається площиною, що проходить через три точки грані.

Серед аналітичних методів опису поверхонь складних тіл, поверхня яких складається з частин відомих поверхонь найбільш загальним є метод R-функцій В.Л. Рвачова [11]. Цей метод дозволяє за допомогою відомих рівнянь  $w_i(x, y, z) = 0, i = \overline{1, N}$  частин  $\Gamma_k, k = \overline{1, N}$  поверхні  $\Gamma$  та логічної функції  $F(u_1, u_2, \dots, u_N, \wedge, \vee, -)$ , що описує область тіла із даною поверхнею  $\Gamma$  за допомогою логічних операцій

кон'юнкції, диз'юнкції та заперечення  $\wedge, \vee, -$  та R - функцій  $u \wedge_0 v = \left( u + v - \sqrt{u^2 + v^2} \right) / 2,$

$u \wedge_0 v = \left( u + v + \sqrt{u^2 + v^2} \right) / 2, -u$  отримувати рівняння поверхні  $\Gamma$  у вигляді

$F(w_1, w_2, \dots, w_N, \wedge_0, \vee_0, -) = 0$ . Недолік цього методу - отримана таким чином функція  $F(w_1, w_2, \dots, w_N, \wedge_0, \vee_0, -)$  на ребрах поверхні та у її кутових точках є недиференційованою. Це означає, що

використання таких функцій в задачах, де істотною є вимога, щоб наближуюча функція мала неперервні похідні високих порядків (другого, третього тощо), що вимагає додаткових досліджень.

Цю задачу можна успішно розв'язати за допомогою інтерфлетації функцій трьох змінних. При цьому математична модель поверхні зберігає неперервність наближуючої функції і неперервність її частинних похідних до заданого порядку незалежно від вибору достатньої для потрібної точності наближення кількості параметрів у формулі інтерфлетації.

Необхідна побудова математичної моделі поверхні тривимірного тіла у неявній формі із збереженням потрібного класу диференційовності, оснований на використанні сплайн - інтерфлетації функцій трьох змінних з мінімізацією відхилення шуканої функції від заданої (при тому або іншому критерії оптимізації). Вхідними даними для опису є рівняння частин поверхонь, що належать досліджуваній поверхні.

Для цього використовуються базисні В-сплайни степеня  $n, 2 \leq n$  дефекту 1 на нерівномірній (взагалі кажучи) сітці вузлів  $X = (X_0, X_1, \dots, X_n, X_{n+1})$ ,  $y = (y_0, y_1, \dots, y_n, y_{n+1})$ ,  $y_0 = y_{n+1} = 0$  [11, 12, 13].

$S_n(x) = S_n(x, X, Y) \in C^{n-1}(R)$ ,  $\sup p(S_n(x)) = (X_0, X_{n+1})$  є сплайном  $n$ -го степеня з вузлами  $X_k, k = \overline{0, n+1}$  та невідомими  $y_1, \dots, y_n$  при умовах,

де  $S_n$  – величина залишкових напружень на поверхні;  $X_n$  – глибина залягання залишкових напружень поверхні;  $y_n$  – відносна опорна довжина профіля на рівні  $n$ .

$$S_n^{(n-1)}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq X_0 \\ g_{n-1,k}(x, y) = y_{k-1} \frac{x - X_k}{X_{k-1} - X_k} + y_k \frac{x - X_{k-1}}{X_k - X_{k-1}}, & X_{k-1} < x \leq X_k, k = \overline{1, n+1} \\ 0, & x \geq X_{n+1} \end{cases}$$

$$S_n^{(n-p)}(x) = \int_{X_0}^x S_n^{(n-p+1)}(t) dt, p = 2, \dots, n$$

Тоді для знаходження невідомих  $y_1, \dots, y_n$  достатньо розв'язати СЛАР

$$S_n^{(n-p)}(X_{n+1}, y) = 0, p = 2, \dots, n \quad (1)$$

$$\int_{X_0}^{X_{n+1}} S_n(t) dt = 1 \quad (2)$$

Умова (1) є необхідною, а (2) можна замінити іншою умовою нормування. В роботах [11, 12, 13] запропоновано метод точної відповідності граничним умовам (взагалі кажучи, неоднорідним) на границях двовимірних та тривимірних областей складної форми, обмежених частинами відомих поверхонь, відповідно, та формуванням експлуатаційних характеристик зубчатих рейок.

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 крайки 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  $\Psi_{ек}$ , при яких встановлюється стабільність процесу зубофрезерування, необхідні умови по стійкості інструменту і якості оброблюваної поверхні по відношенню до найбільшого кута контакту зуба фрези  $\Psi_{max}$  із зубчастим виробом, що обробляється. Співвідношення між кутом ковзання  $\Psi_{ек}$  і найбільшим кутом контакту зуба фрези  $\Psi_{max}$  із зубчастим виробом, що обробляється дозволяє встановити ефективність процесу формоутворення через коефіцієнт  $K_{фр}$  без застосування МОР та із МОР (рис. 2):

$$K_{фр} = \frac{\sin \Psi_{max} - \sin \Psi_{ек}}{\sin \Psi_{max}} \cdot 100\% \quad (3)$$

Підставляючи в формулу (3) технологічні параметри обробки, отримуємо зручний для теоретичних і експериментальних досліджень вираз коефіцієнта ефективності формоутворення (4):

$$K_{фр} = \left( 1 - \frac{\text{acin} \cdot (K_{мор} \cdot \frac{\rho_i \cdot Z \cdot 10^3 \cdot V}{S_{mi} \cdot \pi \cdot D \cdot \sin \phi})}{a \sin \frac{2 \cdot \sqrt{H \cdot (D-H)}}{D}} \right) \cdot 100\% \quad (4)$$

де  $S_{mi}$  – хвилинна подача фрези;  $D$  – діаметр фрези;  $\phi$  – кут вихідного профілю зуба рейки;  $\rho$  –

радіус скруглення ріжучої кромки фрези;  $Z$  – число зубів фрези;  $V$  – швидкість різання;  $H$  – висота профіля зуба.

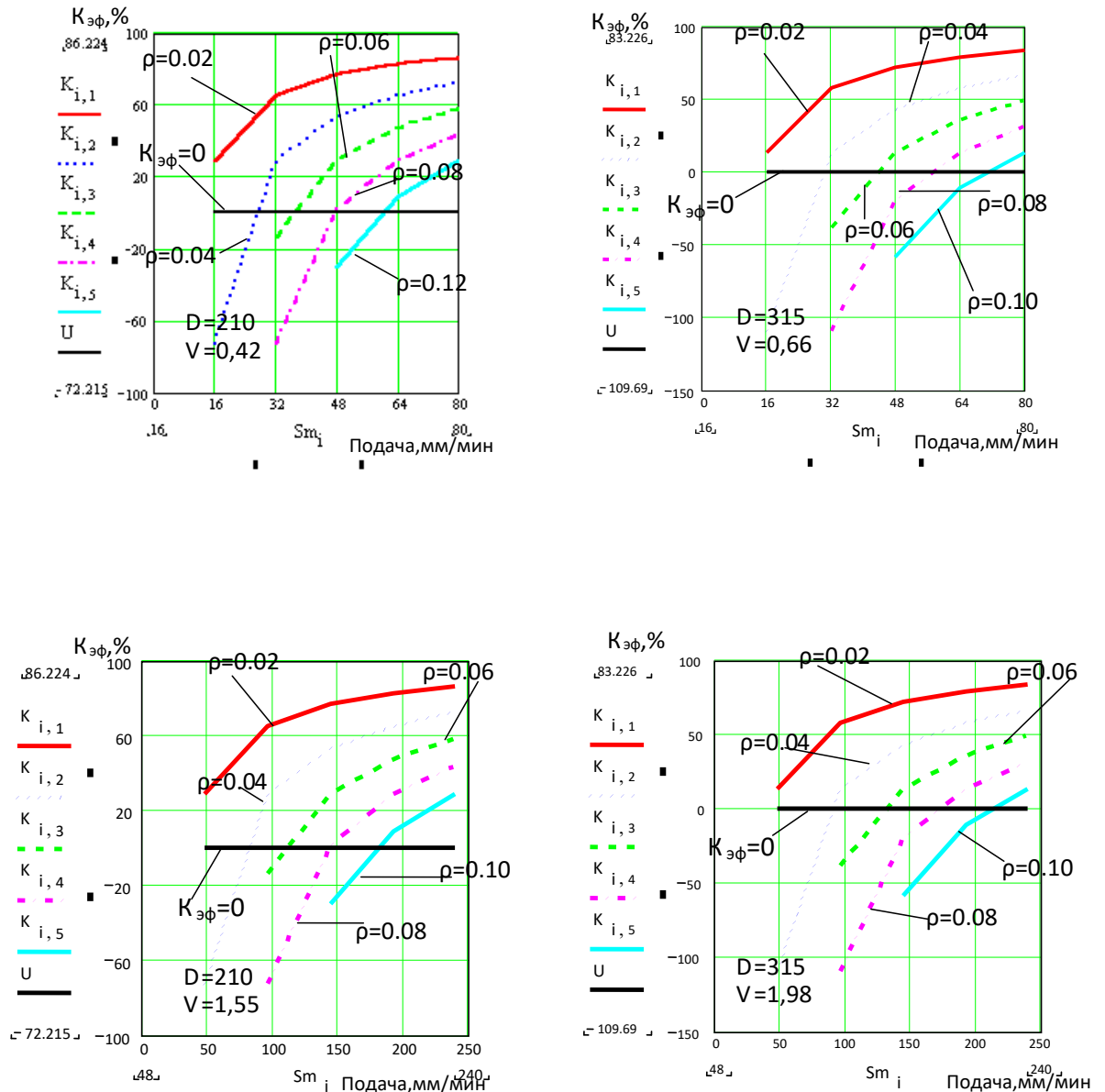


Рис. 2. Графік зміни коефіцієнта ефективності фрезерування  $K_{эф}$  в залежності від режимів різання із застосуванням МОР:

а –  $D=210, Z=10, V=0,42$ ; б –  $D=315, Z=10, V=0,66$ ; в –  $D=210, Z=10, V=1,55$ ; г –  $D=315, Z=10, V=1,98$

У формулі (4)  $K_{мор} = 0,5$  при обробці без МОР,  $K_{мор} = 0,31$  при обробці з МОР.

Аналіз графіків зміни коефіцієнта ефективності формоутворення фрезерування  $K_{эф}$  (рис.2) 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  $\rho$  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:

$$f = 0,148 \cdot R_a^{0,08} \cdot V^{-0,09} \cdot (0,1 \cdot P_z)^{-0,06}, \quad (5)$$

де  $R_a$  - шорсткість поверхні, мкм;  $V$ -швидкість різання, м/с;  $P_z$  - сила різання, Н.

Експериментальні дослідження показали кореляційний зв'язок між собою висотних параметрів шорсткості  $R_a, R_z, R_{max}$ . [3, 7].

Для фрезерування зубів рейок  $R_{max} = 6,0 R_a; R_z = 5,0 R_a$ .

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:

$$R_z = 5 \cdot R_a = P_z \cdot \frac{S_z^{1,69} \cdot a_i^{0,5}}{\sqrt{1,23 \cdot \rho^{0,14} \cdot \lambda^{0,41}}} \cdot K_{фр} \quad (6)$$

$$W_z = P_z \cdot \frac{S_z^{1,01} \cdot a_i^{0,46} \cdot \rho^{0,16} \cdot \lambda^{0,54}}{\sqrt{1,55}} \quad (7)$$

де  $S_z$  – подача на зуб фрези;  $a_i$  – змінна товщина зрізуваного шару;  $\lambda$  – 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  $R_z$ .

$$R_z = 5 \cdot R_a = \frac{P_z \cdot S_z^{1,69} \cdot a_i^{0,5}}{\sqrt{1,23 \cdot \rho^{0,14} \cdot \lambda^{0,41}}} \cdot K_{фр} = \frac{10,16 \cdot \left( \frac{\sigma_T \cdot E}{\pi \cdot (1 - \mu^2)} \right)^{3/4} \cdot \left( \frac{10 \cdot I \cdot n}{\chi \cdot p} \right)^{3/2} \cdot S_m^{3/2} \cdot k^{-3}}{H_p^{1/4} \cdot W_p^{1/4}} \quad (8)$$

де  $\sigma_T$  - напруження текучості;  $E$  - модуль пружності, %;  $\mu$  - коефіцієнт Пуассона;  $n$  - число циклів впливу, яке призводить до руйнування поверхні зубчастих коліс;  $I$  - інтенсивність зносу зубчастих коліс в період нормального зносу;  $\chi$  - коефіцієнт, що враховує параметри опорної кривої;  $p$  - питома навантаження, яке припадає на геометричну площу контакту.

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 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. Розглянуто технологічні умови забезпечення показників якості поверхневого шару від кута ковзання при фрезеруванні зубчастих рейок.

У роботах [2, 3, 4, 7] детально досліджено вплив радіуса округлення різальної крайки 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-заготівка).

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 "успадкоковуються" від попередніх операцій [2, 5].

Структурна модель процесів спадковості при обробці зубчастих рейок представлена на рис. 3.

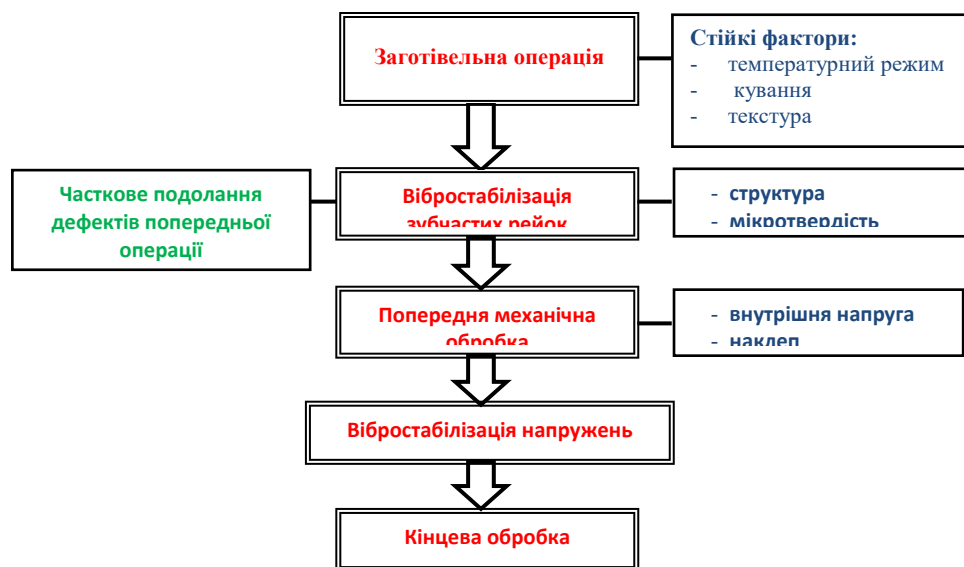


Рис. 3. Структурна модель процесів спадковості при обробці зубчастих рейок

У машинобудуванні відомі два методи формоутворення зубів рейок: метод копіювання, при якому профіль зуба інструмента або його проекція представляє точну копію профілю западини зуба рейки, яка нарізається і метод центроїдного обкатування, при якому центроїда інструменту і рейки, що нарізається, обкатуються без ковзання. Профіль нарізаних зубів виходить як огинаюча різних положень різальних крайок інструменту.

Відповідно до існуючих методів використовуються наступні види зуборізних інструментів: інструменти для нарізування зубів прямокутих і косозубих рейок за методом копіювання, дискові затилувальні фрези або набір фрез, фрези гострозаточені дискові збірні, зуборізні головки; інструменти для обробки прямокутих, а також косозубих рейок за методом центроїдного обкатування [1, 3, 6, 8, 10].

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.

Рейкофрезерні верстати вітчизняного виробництва мод. КУ-30, КУ-304, ЛГ-60ФЗ, ЕЗ-167, 5412, 5413, 5414 мають, в основному, однакову принципову кінематичну схему і компоновку вузлів верстата. Привід обертання дискової фрези і подачі фрезерної головки здійснюється від синхронного електродвигуна змінного струму; розподіл, переміщення столу з рейкою від іншого електродвигуна через механізм розподілу і гітару настройки переміщається на необхідний крок. Переміщення фрезерної головки вертикальне. На верстаті передбачено тільки зустрічне фрезерування.

Зарубіжні фірми випускають рейкофрезерні верстати з автоматичним циклом управління, в яких гармонійно поєднуються сучасні досягнення гідравліки і електроніки.

У верстатах мод. UZFM-V, UZFM-300H фірми Donau (ФРН), L79 фірми Kesel (ФРН) гідравлічний рух подачі салазок фрези регулюється безступінчасто від 0 до 400 мм / хв. Фрезерна головка нахилється вправо на 30° і вліво на 45°. Передбачено і попутне фрезерування. Необхідний крок задається багатопозиційним перемикачем. Коробчаста форма станини забезпечує високу жорсткість верстата. Для рейкофрезерних верстатів нормальної і посиленої конструкції потужність головного двигуна відповідно 2,2 і 3 кВт, найбільший хід фрези 300 мм, число обертів шпинделя 27-178 і 22-136 об/хв, діаметр фрези 105-165, 125-250 мм, максимальна довжина нарізання рейки 1750 мм. Обробка рейок довжиною понад 1750 мм здійснюється на верстатах за допомогою юстованого пристрою і систем ЧПУ.

При фрезеруванні по маятниковому циклу (довжина виробу до 800 мм) дві заготовки фіксуються одна за одною - це дає можливість, не перериваючи робочий процес, вкласти в пристрій нову заготовку.

Для обробки торцевих поверхонь зубів рейок і видалення задириць застосовуються верстати мод. ZA800X8 фірми Modul, що працюють з пальцевою фрезою зі спеціальним пристосуванням. Найбільший модуль 9 мм, діаметр фрези до 26 мм, довжина рейки до 800 мм. [8]. У той же час, рейкофрезерні верстати, оснащені дисковими фрезами, не мають регламентованих рекомендацій по вибору і призначенню параметрів фрез та процесів умов обробки.

Рейкошліфувальні верстати мод. МШ-147, МШ-245, японської фірми Moto kubo мод. ML-R1000, німецьких фірм Каар SZ850, SZ851, SZ1650, SZ1651, SZ2850, і Niles ZSTZ-630C3 працюють за методом одиничного поділу конічним колом з подачею охолоджуючого масла для шліфування під тиском з орієнтацією на профіль, але при цьому на 80-90% знижується продуктивність обробки в порівнянні з рейкофрезеруванням і залежить від процесів припусків під кінцеву операцію. Вузькі дрібномодульні рейки доцільно виготовляти на різбошліфувальних 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.

Верстати мод. КСЗ-Р77 і ЕЗ-9А забезпечують 7-ю ступінь точності по ГОСТ10242-81 з довбляком класу точності АА. Верстати компактні, прості в обслуговуванні, зручні в налаштуванні.

На рейкодовбальному верстаті можлива обробка рейок модулем до 14 мм, якщо попереднє формування западин зубів рейок здійснювалося на рейкофрезерному верстаті.

На рейкодовбальному верстаті мод. VR72.B / 1 фірми Sykes (Англія) нарізаються прямозубі і косозубі рейки в умовах серійного і крупносерійного виробництва. При застосуванні спеціальних довбляків 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 довбляками. Рекомендована глибина врізання довбляка 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, економічну доцільність застосування методу копіювання або обкатування і обов'язково враховувати технологічні параметри при виборі і призначенні інструменту та режимів різання.

## **Висновки.**

1 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 крайки 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  $K_{EF}$  зубчастих рейок в залежності від режимів різання без застосування MOP і з MOP і визначено ділянки, що забезпечують нормальний процес формоутворення робочих поверхонь.

5. Дослідження показують вплив радіуса округлення різальної крайки інструмента на утворення шорсткості поверхні при різних параметрах, в основному, для токарної обробки.

6. 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.

#### Список літератури

1. Vilmos V. Simon Multi-objective optimization of hypoid gears to improve operating characteristics / Mechanism and Machine Theory, Volume 146, 2019, 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 18 (2019),p. 406–412.
3. Пермяков О.А. Синтез технологічних параметрів високопродуктивної обробки зубчастих рейок спареними фрезами / О.А. Пермяков, О.О. Ключко, Ю.О. Синица // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 17 (1239). – С. 71–77. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-004X
4. Имитационное моделирование в задачах машиностроительного производства в 2-х томах, Т. 1: учеб. пособие / А.В. Беловол, А.А. Ключко, Е.В. Набока, А.О. Скоркин, А.Н. Шелковой. под редакцией А.Н. Шелкового // Х.: НТУ «ХПИ», 2016. – 400 с. – На русском языке. ISBN 978-966-593-749-4.
5. Степанов М. С. Многокритериальная регламентация параметров поверхностного слоя деталей / М. С. Степанов, А. А. Ключко, 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. – ISBN 978-966-383-658-4.
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. Volume 8, Issue 3, Pages 788-794, ISSN 2217-8309, DOI: 10.18421/TEM83-13, August 2019. P.788-794
7. Некоторые аспекты имитационного математического моделирования геометрических параметров процесса зубофрезерования / А.Н. Шелковой, А.А. Ключко, 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. Ключко, Е. Набока // – Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. – 528 с.: ил. На русском языке. ISBN-13: 978-3-659-69172-0, ISBN-10: 3659691720, EAN:9783659691720.
9. Kalathur Kumar1, Dr.S.Arul2, Dr.G.Sriram3, Dr.V.N.Mani4, V.Prathap 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), / issn (print): 2393-8374, (online): 2394-0697, volume-3, issue-6, 2016 p.96-103.
10. G. Li, Z. Wang, A. Kubo, Error-sensitivity analysis for hypoid gears using a real tooth surface contact model, Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci. 231 (3) (2017) 507–521..
11. Литвин О.М. Інтерфлетція функцій і структурний метод В.Л. Рвачова. Математичні методи та фізико-математичні поля. том 50, №4. – 2007. 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 інтерфлетції 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. Ключко, 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.
15. Ramadani, R., Belsak, A., Kegl, M., Predan, J., & Pehan, S. (2018). Topology optimization based design of lightweight and low vibration gear bodies. International Journal of Simulation Modelling, 17(1), 92-104.
16. Gołębski, R., & Ivandic, Z. (2018). Analysis of Modification of Spur Gear Profile. Tehnicki Vjesnik, 25(2), 643-648.
- 16 M. Ciavarella, On the significance of asperity models predictions of rough contact with respect to recent alternative theories, ASME J. Tribol. 139 (2017) 021402–1-11.
17. L. Chang, Y.R. Jeng, P.Y. Huang, Modeling and analysis of the meshing losses of involute spur gears in high-speed and high-load conditions, ASME J. Tribol. 135 (1) (2013) 1–11 Art. no. 011504.
18. A. Diez-Ibarbia, A. Fernandez-Del-Rincon, P. Garcia, A. De-Juan, Assessment of load dependent friction coefficients and their influence on spur gear efficiency, Meccanica 53 (1–2) (2018) 425–445.
19. A. Clarke, H.U. Jamali, K.J. Shariff, H.P. Evans, B. Shaw, Effects of profile errors on lubrication performance of helical gears, Tribol. Int. 111 (2017) 184–191
20. J. Moss, A. Kahraman, C. Wink, An experimental study of influence of lubrication methods on efficiency and contact fatigue life of spur gears, ASME J. Tribol. 140 (2018) Art. no. 0511031–11.

#### References (transliterated):

1. Vilmos V. Simon Multi-objective optimization of hypoid gears to improve operating characteristics / Mechanism and Machine Theory, Volume

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 18 (2019),p. 406–412.
3. Permyakov O.A. Sintez tehnologiĭ chnikh parametrov v visokoproduktivnoy obrobki zubchastikh rejoyk sparenimi frezami / O.A. Permyakov, O.O. Klochko, Yu.O. Sinicza // Vi'snik NTU «KhPI». Seriya: Tekhnologiyi v mashinobuduvanni'. – Kh. : NTU «KhPI», 2017. – # 17 (1239). – S. 71–77. – Bi'bli'ogr.: 7 nazv. – ISSN 2079-004Kh
4. Imitacionnoe modelirovanie v zadachakh mashinostroitel'nogo proizvodstva v 2-kh tomakh, T. 1: ucheb. posobie / A.V. Belovol, A.A. Klochko, E.V. Naboka, A.O. Skorkin, A.N. Shelkovoĭ. pod redaktsiej A.N. Shelkovoĭ // Kh.: NTU «KhPI», 2016. – 400 s. – Na russkom yazy'ke. ISBN 978-966-593-749-4.
5. Stepanov M. S. Mnogokriterial'naya reglamentatsiya parametrov poverkhnostnogo sloya detalej / M. S. Stepanov, A. A. Klochko, A.N. Kravczov // Fizicheskie i komp'yuternye tehnologii. Trudy' 21-j Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. 24–25 dekabrya 2015, g. Khar'kov. – D.: Lira, 2015. – S. 68–76. – ISVN 978-966-383-658-4.
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. Volume 8, Issue 3, Pages 788-794, ISSN 2217-8309, DOI: 10.18421/TEM83-13, August 2019. P.788-794
7. Nekotory'e aspekty imitacionnogo matematicheskogo modelirovaniya geometricheskikh parametrov proczessa zubofrezirovaniya / A.N. Shelkovoĭ, A.A. Klochko, E.V. Naboka, E.V. Mironenko, A.N. Kravczov // Nadezhnost' instrumenta i optimizatsiya tehnologicheskikh sistem : sb. nauch. tr. – Kramatorsk : DGMA, 2015. – Vy'p. 36. – S. 136–149.
8. Shelkovoĭ A. Imitacionnoe modelirovanie v zadachakh mekhanosborochnogo proizvodstva /A. Shelkovoĭ, A. Klochko, E. Naboka // – Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. – 528 s.: il. Na russkom yazy'ke. ISBN-13: 978-3-659-69172-0, ISBN-10: 3659691720, EAN:9783659691720.
9. Kalathur Kumar1, Dr.S.Arul2, Dr.G.Sriram3, Dr.V.N.Mani4, V.Prathap 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), / issn (print): 2393-8374, (online): 2394-0697, volume-3, issue-6, 2016 p.96-103.
10. G. Li, Z. Wang, A. Kubo, Error-sensitivity analysis for hypoid gears using a real tooth surface contact model, Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci. 231 (3) (2017) 507–521..
11. Litvin O.M. I'nterli'naczi'ya ta i'nterfletaczi'ya funkczij i' strukturnij metod V.L. Rvachova. Matematichni' metodi ta fi'ziko-matematichni' polya. tom 50, #4. – 2007. s. 25-35.
12. Litvin O. N., Pasechnik V. A. Optimizatsiya matematicheskoy modeli poverkhnosti tryokhmernogo tela // Kibernetika i sistemny'j analiz. – 2006. - #1. – S. 103-112
13. Litvin O. M., Pasi'chnik V. O. Optimi'zaczi'ya gorizontal'nikh pereri'zi'v matematichnoyi modeli' poverkhnij manekena z vikoristannyam i'nterli'naczi'yi funkczij // Dopovi'di' NAN Ukraini. – 2004. - #2. – S.66-71.
14. Vibi'r i' priznachennya sistem parametrov v poverkhnovogo sharu czili'ndrichnikh velikomodul'nikh zubchastikh koli's, shho viznachayut yikh ekspluataczijni' vlastivosti' / E. V. Mironenko, O. M. Shelkovoĭ, O. O. Klochko, O. M. Kravczov //Vi'snik Naczi'onaln'ogo uni'versitetu «L'vi'vs'ka poli'tekhnika». : zb. nauk. pr. : Optimi'zaczi'ya virobnichikh proczesi'v i' tekhnichnij kontrol' u mashinobuduvanni' ta priladobuduvanni'. L'vi'v. – 2013. – #772. – S. 207–213.
15. Ramadani, R., Belsak, A., Kegl, M., Predan, J., & Pehan, S. (2018). Topology optimization based design of lightweight and low vibration gear bodies. International Journal of Simulation Modelling, 17(1), 92-104.
16. Golebski, R., & Ivandic, Z. (2018). Analysis of Modification of Spur Gear Profile. Tehnicki Vjesnik, 25(2), 643-648.
- 16 M. Ciavarella, On the significance of asperity models predictions of rough contact with respect to recent alternative theories, ASME J. Tribol. 139 (2017) 021402–1-11.
17. L. Chang, Y.R. Jeng, P.Y. Huang, Modeling and analysis of the meshing losses of involute spur gears in high-speed and high-load conditions, ASME J. Tribol. 135 (1) (2013) 1–11 Art. no. 011504.
18. A. Diez-Ibarbia, A. Fernandez-Del-Rincon, P. Garcia, A. De-Juan, Assessment of load dependent friction coefficients and their influence on spur gear efficiency, Meccanica 53 (1–2) (2018) 425–445.
19. A. Clarke, H.U. Jamali, K.J. Shariff, H.P. Evans, B. Shaw, Effects of profile errors on lubrication performance of helical gears, Tribol. Int. 111 (2017) 184–191
20. J. Moss, A. Kahraman, C. Wink, An experimental study of influence of lubrication methods on efficiency and contact fatigue life of spur gears, ASME J. Tribol. 140 (2018) Art. no. 0511031–11.

Поступила (received) 14.01.2023

*Відомості про авторів / About the Authors*

**Юрчишин Оксана Ярославовна (Yurchyshyn Oksana)** – кандидат технічних наук, доцент, кафедра конструювання машин Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ; тел.: +38(097) 796 4523; e-mail: [urchyshynoks@ukr.net](mailto:urchyshynoks@ukr.net).

ORCID: 0000-0001-8821-7412

**Півень Лариса Володимирівна (Piven Larisa)** – викладач, Донецький обласний інститут післядипломної педагогічної освіти, м.Краматорськ, Україна; тел. (096) 8295602, e-mail: [pivenolesy1971@gmail.com](mailto:pivenolesy1971@gmail.com):

ORCID: 0009-0006-1488-0709

**Скидан Наталія Павлівна (Skidan Natalia)** – ст. викладач кафедри технології машинобудування та металорішальні верстати Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м.Харків; тел.: (067) 3152102, e-mail: [skydannp@gmail.com](mailto:skydannp@gmail.com).

**Пермяков Єгор Олександрович (Permiakov Yehor)** – аспірант кафедри технології машинобудування та металорішальні верстати Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м.Харків; тел.: (098)2309163, e-mail: [Bedger2014@gmail.com](mailto:Bedger2014@gmail.com)

**Мироненко Олег Євгенович (Mironenko Oleh)** аспірант кафедри комп'ютеризованих мехатронних систем, інструментів та технологій Донбаської державної машинобудівної академії, м. Краматорськ, Україна; ORCID: [0009-0002-6626-5629](https://orcid.org/0009-0002-6626-5629), тел. 0501028428, e-mail: [om7251975@gmail.com](mailto:om7251975@gmail.com)

**Юр'єва Марія Віталіївна (Yurieva Mariia)** – магістр кафедри технології машинобудування та металорішальні верстати Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м.Харків; тел.: (066)0526561, e-mail: [maureva16@gmail.com](mailto:maureva16@gmail.com).