

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

MINISTRY OF EDUCATION
AND SCIENCE OF UKRAINE
National Technical University
«Kharkiv Polytechnic Institute»

**Вісник Національного
технічного університету
«ХПІ». Серія: Технології в
машинобудуванні**

№ 6 (1282) 2018

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

**Bulletin of the National
Technical University
«KhPI». Series: Techniques in
a machine industry**

No. 6 (1282) 2018

Collection of Scientific papers

The edition was founded in 1961

Харків
НТУ «ХПІ», 2018

Kharkiv
NTU "KhPI", 2018

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: **Технології в машинобудуванні** = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: **Techniques in a machine industry**: зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». — Харків : НТУ «ХПІ», 2018. — № 6 (1282) 2018. — 140 с. — ISSN 2079-004X.

Видання присвячене освітленню досягнень в галузі машинобудування. Мета видання полягає у публікації оригінальних досліджень в галузі машинобудування із приділенням особливої уваги матеріалознавству, енергетиці, машинобудівним питанням в умовах виробництва, технологіям в машинобудуванні, оптиці, полімерним технологіям, гідродинамічним системам, мехатроніці, будівельній техніці та кіберфізичним системам.

Для науковців, викладачів вищої школи, аспірантів, студентів і фахівців в галузі системного аналізу, управління і комп'ютерних технологій.

The publication is devoted to the coverage of mechanical engineering. The scope of the journal is to publish original research articles in the area of mechanical engineering with special focus on materials science, energetics, machine and production design, manufacturing science and technology, mechatronics, optics, polymer technology, hydrodynamic systems, building service engineering, and cyber physical systems.

For scientists, teachers of higher education, post-graduate students, students and specialists in the field of systems analysis, management and computer technology.

Державне видання.

Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України
КВ № 5256 від 2 липня 2001 року

Мова статей – українська, російська, англійська.

***Вісник Національного технічного університету «ХПІ».** Серія: **Технології в машинобудуванні** внесено до «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук», затвердженого наказом МОН України від 21.12.2015 № 1328 «Про затвердження рішень Атестаційної колегії Міністерства щодо діяльності спеціалізованих вчених рад від 15 грудня 2015 року»*

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні включений до зовнішніх інформаційних систем, у тому числі в наукометричну базу даних Index Copernicus (Польща) і Google Scholar; зареєстрований у світовому каталозі періодичних видань бази даних Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA).

Офіційний сайт видання: <http://web.kpi.kharkov.ua/tmms/ru/vestnik-ntu-hpi/>

Засновник
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Founder
National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"

Головний редактор

Сокол Є. І., д-р техн. наук, чл.-кор. НАН України, НТУ «ХПІ», Україна

Заст. головного редактора

Марченко А. П., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна

Секретар

Горбунов К. О., доц., НТУ «ХПІ», Україна

Редакційна колегія серії

Відповідальний редактор:

Пермяков О.А., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна

Заступник відповідального редактора:

Клочко О.О., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна

Відповідальний секретар:

Басова Є.В., к-т техн. наук, НТУ «ХПІ», Україна

Члени редколегії:

Антонюк В.С., проф., НТУУ «КПІ», Україна

Добротворський С.С., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Кальченко В.В., проф., ЧНТУ, Україна

Кане М.М., проф., Білоруський НТУ, Білорусь

Ковальов В.Д., проф., ДДМА, Україна

Мироненко Є.В., проф., ДДМА, Україна

Пасічник В.А., проф., НТУУ «КПІ», Україна

Сизий Ю.А., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Сталінський Д.В., проф., ДП УкрНТЦ «ЕНЕРГОСТАЛЬ», Україна

Степанов М.С., проф., Україна

Фадєєв В.А., проф., ПАТ «ФЕД», Україна

Хавін Г.Л., проф., Україна

Шелковий О.М., проф., Україна

Editor-in-chief

Sokol Ye. I., dr. tech. sc., member-cor. of National Academy of Sciences of Ukraine, NTU "KhPI", Ukraine

Deputy editor-in-chief

Marchenko A. P., dr. tech. sc., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Secretary

Gorbunov K. O., docent, NTU "KhPI", Ukraine

Editorial staff

Associate editor:

Permiakov A.A., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Deputy editor:

Klochko A. A., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Executive secretary:

Basova Ye. V. PhD, NTU "KhPI", Ukraine

Editorial staff members:

Antonyuk V.S., prof., NTUU "KPI", Ukraine

Dobrotvorskiy S.S., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Kalchenko V.V., prof., ChNTU, Ukraine

Kane M.M. , prof., Belarusia NTU, Belarus

Kovalev V.D., prof., DSEA, Ukraine

Mironenko Ye.V., prof., DSEA, Ukraine

Pasichnyk V.A., prof., NTUU "KPI", Ukraine

Syzyi Yu.A., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Stalinskyi D.V., prof., Ukraine

Stepanov M.S., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Fadiev V.A., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Khavin G.L., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Shelkovyi O.M., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».

Протокол № 5 від 25 травня 2018 р.

О.А. ПЕРМЯКОВ, О.О. КЛОЧКО, Н.Р. ВЕСЕЛОВСЬКА, Ю.О. СИНИЦЯ

ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПІДВИЩЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТОЧНОСТІ ТА ЯКОСТІ ЗУБЧАСТИХ РЕЙОК ВАЖКИХ ВЕРСТАТІВ З ЧПК

Розроблено математичну модель прогнозування показників якості поверхневого шару зубчастих рейок, що дозволяє управляти структурою і технологічними параметрами для забезпечення експлуатаційних властивостей зубчастих рейок, яка характеризується комплексним станом оброблених поверхонь з урахуванням геометричних параметрів, фізико-механічних властивостей і технологічних регламентів обробки. Розроблено методику визначення мінімальних значень кутів ковзання $\psi_{\text{ск}}$ при фрезеруванні зубів рейок дисковими фрезами для досягнення необхідної якості поверхневого шару зубчастих рейок, вираженого через коефіцієнт ефективності формоутворення $K_{\text{фр}}$.

Ключові слова: зуби, зубчасті рейки, технологічне забезпечення, математична модель, продуктивність обробки, поверхневий шар, показники якості, коефіцієнт ефективності формоутворення.

А.А. ПЕРМЯКОВ, А.А. КЛОЧКО, Н.Р. ВЕСЕЛОВСКАЯ, Ю.А. СИНИЦА

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОВЫШЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТОЧНОСТИ И КАЧЕСТВА ЗУБЧАСТЫХ РЕЕК ТЯЖЕЛЫХ СТАНКОВ С ЧПУ

Разработана математическая модель прогнозирования показателей качества поверхностного слоя зубчатых реек, позволяет управлять структурой и технологическими параметрами для обеспечения эксплуатационных свойств зубчатых реек, которая характеризуется комплексным состоянием обрабатываемых поверхностей с учетом геометрических параметров, физико-механических свойств и технологических регламентов обработки. Разработана методика определения минимальных значений углов скольжения $\psi_{\text{ск}}$ при фрезеровании зубьев реек дисковыми фрезами для достижения требуемого качества поверхностного слоя зубчатых реек, выраженного через коэффициент эффективности формообразования $K_{\text{фр}}$.

Ключевые слова: зубья, зубчатые рейки, технологическое обеспечение, математическая модель, производительность обработки, поверхностный слой, показатели качества, коэффициент эффективности формообразования.

O. PERMYAKOV, O. KLOCHKO, N. VESELOVSKAYA, Yu. SYNYTSA

TECHNOLOGICAL MAINTENANCE OF INCREASE OF PARAMETERS OF ACCURACY AND QUALITY OF TOOTHED RAILS OF HEAVY DUTY CNC MACHINES

The mathematical model of prediction of quality indicators of the surface layer of gear rails is developed, which allows to control the structure and technological parameters for maintenance of operational properties of toothed rails, which is characterized by a complex state of treated surfaces taking into account geometrical parameters, physical-mechanical properties and technological regulations of processing. The method of determining the minimum values of slip angle $\psi_{\text{ск}}$ during milling of rails with disk drives is developed to achieve the required quality of the surface layer of gear rails, expressed in terms of the coefficient of efficiency of forming $K_{\text{фр}}$.

Keywords: gear, gear racks, technological maintenance, mathematical model, efficiency of processing, surface, parameters of quality, effectiveness ratio.

Постановка проблеми. Надійність і довговічність механізмів і машин у т.ч. із зубчастими рейковими передачами визначаються точністю виготовлення та експлуатаційними властивостями деталей [1]. Останні характеризуються станом поверхневого шару робочих поверхонь зубчастих рейкових передач і визначаються технологією їхнього виготовлення. Відсутність наукового підходу до забезпечення точності і призначенню параметрів стану робочих поверхонь зубчастих рейок приводить до необґрунтованого завищення вимог і подорожчання машин, що випускаються, без належного підвищення їхньої надійності. Несуча здатність і контактна взаємодія робочих поверхонь зубчастих рейок залежать не тільки від параметрів шорсткості, але і від стану поверхневого шару в цілому. З метою вивчення точності виготовлення і стану параметрів поверхневого шару необхідний комплексний науковий підхід із устанавленням системи параметрів поверхневого шару і можливістю їх технологічного і метрологічного забезпечення.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Важливим параметром забезпечення стабілізації процесу формоутворення є кількість зубів фрез, які одночасно знаходяться у зоні обробки. З урахуванням

вільного розміщення стружки в западині стружкової канавки при фрезеруванні сталі з глибиною різання t і подачею на зуб S_z найбільше число зубів фрези Z діаметром D визначається за формулою [1] $Z=0,2D/t^{0,5} \cdot S_z^{0,5}$ і для загальномашинобудівних нормативів регламентується в межах 6-14, що зумовлює одночасне перебування в зоні обробки 0-2 зуба фрези, що і є однією з причин дестабілізації процесу обробки, що в свою чергу негативно відбивається на якості поверхневого шару зубів, його експлуатаційних властивостях, що підтверджується теоретичними і практичними дослідженнями [1,2,3].

Мета роботи – забезпечення вимог точності і якості поверхневого шару зубчастих рейок технологічними методами при максимальній продуктивності обробки і виключення негативного впливу технологічної спадковості в умовах експлуатації.

Виклад основного матеріалу

Моделюванню методу профільного формоутворення зубів рейок полягає у визначенні кута неузгодженості між зубами спарених дискових зуборізних фрез за умови, що функція приймає мінімальне значення [4].

Фрезерування зубів зубчастих рейок здійснюється

з використанням спарених дискових зуборізних фрез 1 і 2, які мають певний крок, кратний кроку, який нарізається на зубчастому виробі, при цьому кратність виражається цілим числом (рис. 1). У зоні обробки при зніманні металу постійно знаходиться три і більше зубів 3-5, при цьому передня поверхня зуба 5 фрези 2 розташовується між двома передніми поверхнями зубів 3 і 4 фрези 1. При виході із зони різання зуба 3 фрези 1 наступний зуб 4 фрези 1 входить в зону різання, але при цьому в зоні різання знаходиться зуб 5 фрези 2, розташований під певним кутом неузгодженості по відношенню до зуба фрези, який обумовлює стаціонарністю технологічних параметрів профільного формоутворення. Під час обробки зуби 3 і 4 фрези 1 і зуби 5 і 6 фрези 2 контактують з виробом 7. Кутівий крок між зубами фрез Δ , а найбільший кут контакту зуб фрези з оброблюваним виробом ψ_{max} . Крок між зубами спарених фрез модулем m виразимо $t = \pi \cdot m$, причому зуб фрез 1 і 2 мають у своєму розпорядженні при вигляді з торця під кутом неузгодженості $\beta_{опт}$ [2].

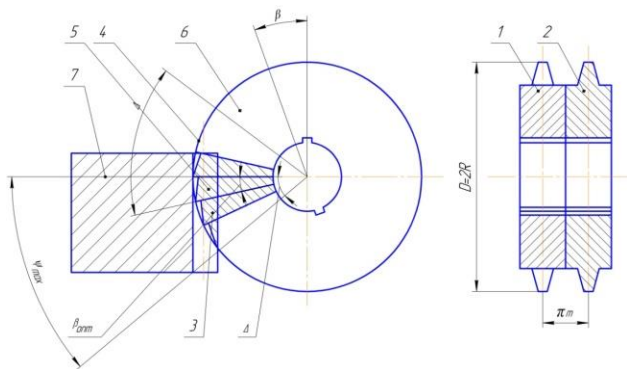


Рис. 1 - Синтез параметрів операції зубонарізування рейок спареними дисковими фрезами

На рис.1 представлена схема розташування зубів у зоні обробки і розташування спарених фрез дискових зуборізних фрез.

Сила різання при обробці впадини одним зубом у загальному виді може бути представлена вираженням

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

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

$A_3 = 1$ при обробці лівого або правого профілю; $A_3 = 2$ при обробці лівого і правого профілів одночасно.

Вираз (1) запишемо у вигляді

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

де B - ширина впадини зуба оброблюваної рейки 7.

Вираження (1) при відповідному значенні ширини западини B і коефіцієнта A_3 описує спосіб профільного формоутворення зубів коліс і рейок.

Сумарна сила різання при знаходженні в зоні різання двох або одного зубів однієї фрези при зміні кута контакту з нижче наведеною формулою

$$P(\psi) = \begin{cases} P_1(\psi) + P_1(\psi + \Delta), & \text{если } 0 \leq \psi \leq (\psi_{max} - \Delta) \\ P_1(\psi), & \text{если } (\psi_{max} - \Delta) \leq \psi \leq \Delta \end{cases}, \quad (3)$$

де $\Delta = \frac{360^\circ}{z}$ - кут між зубами 3 і 4 фрези 1 і відповідно між зубами 5 і 6 фрези 2;

$\psi_{max} = \arccos \left(1 - \frac{2,25 \cdot m}{R} \right)$ - найбільший кут контакту.

Результуюча сила різання $P_{заг}$ при використанні спарених фрез 1 і 2 з кутом неузгодженості β зубів фрези 2 щодо фрези 1 визначається функцією:

$$P_{заг} = P(\psi) + P(\psi + \beta), \quad (4)$$

де $P(\psi)$ - сила різання при обробці однією фрезою; $P(\psi + \beta)$ - сила різання при обробці 2-й фрезою, зуби якої розташовані по відношенню до зубів 1-ї фрези під кутом β при вигляді з торця, $P_{заг}$ - результуюча сила різання при використанні спарених фрез з кутом неузгодженості β зубів 2-ї фрези щодо зубів 1-ї фрези при вигляді з торця.

Зміна параметра $\beta_{опт}$ зубонарізування рейок при забезпеченні стабілізації процесу формоутворення спареними фрезами показано на рис.2.

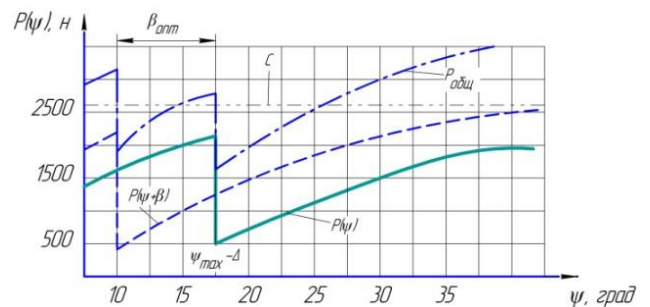


Рис. 2 - Зміна параметра $\beta_{опт}$ зубонарізування рейок при забезпеченні стабілізації процесу формоутворення спареними фрезами

Середнє значення сили різання при обробці спареними фрезами з формули (3.3) і (3.4) визначається інтегральною функцією:

$$C = 2 \cdot \frac{1}{\Delta} \cdot \int_0^{\Delta} P(\varphi) d\varphi, \quad (5)$$

Знаходиться найменша відстань ρ_{min} між інтегральними функціями середньоквадратичного відхилення $P_{заг}$ від постійної C (5)

$$\rho_i = \sqrt{\int [P(\psi) + P(\psi + \beta) - C]^2 \cdot d\psi}, \quad (6)$$

в інтервалі зміни β от $0 \leq \beta \leq \Delta$, де інтервал $i=1, 2, \dots, N$ з кроком $h = \frac{\Delta}{N}$.

Серед отриманих значень ρ_i вибирається найменше ρ_{min} , яке відповідає оптимальному куту неузгодженості $\beta_{опт}$.

Інструмент може бути оснащений ріжучою частиною зі швидкорізальної сталі P6M5K5 (СНД), S6-5-2-5 (Німеччина), SKH55 (Японія) або марками твердого сплаву підгрупи застосування по ISO K10-K20 - MK8 (MC318), M10 - MF1 (MC3215), P15-P20 - MF2 (MC1466).

Оптимізація технологічного забезпечення геометричних параметрів стану поверхневого шару при профільному формоутворення зубів коліс і рейок здійснюється по куту неузгодженості $\beta_{опт}$, що відповідає найменшому значенню середньоквадратичного відхилення сили різання від її середнього значення [3].

При використанні трьох- і чотирирядних дискових зуборізних фрез кут між зубами сусідніх фрез також розраховується за розробленою методикою.

Відповідно до проведених дослідженнями з вивчення параметрів зубонарізування рейок і їх впливу на стабілізацію процесу формоутворення розглянуті залежності зміни оптимального кута неузгодженості $\beta_{опт}$ від оброблюваного модуля зубчастой рейки при різних технологічних режимах обробки.

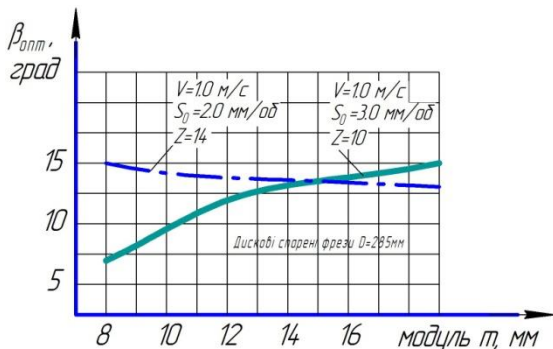


Рис. 3 - Залежність зміни оптимального кута неузгодженості $\beta_{опт}$ від оброблюваного модуля зубчастой рейки при різних технологічних режимах обробки

У процесі формоутворення при розгляді фрезерування як дискретного переміщення зуба фрези, кожна точка активної частини різального леза має свою траєкторію і цим самим визначає здатність поверхневих шарів інструменту чинити опір руйнуванню при сходженні стружки по передній поверхні і тертю ковзання по задніх поверхнях, а також при мікропереміщеннях, обумовлених впливом вібрацій в процесі обробки [4].

Геометрія зуборізних інструментів має форму, яка розраховується тільки в залежності від схеми зубонарізування без урахування зношування інструменту при експлуатації. Тому технологічна підготовка інструменту при забезпеченні стабілізації процесу формоутворення грає істотну роль для досягнення параметрів зубонарізування рейок.

Наявність зносу ріжучого інструменту призводить до зниження точності обробки зубчастих рейок, збільшення динамічних навантажень системи ВПД і зростання сил різання, що веде до зниження стійкості зубообробного інструменту, появи передчасних відмов.

В умовах сучасного рівня технології машинобудування необхідно управляти з великою ймовірністю процесами формоутворення, а значить, і забезпечити заданий знос інструменту, виходячи з умов точності обробки рейок.

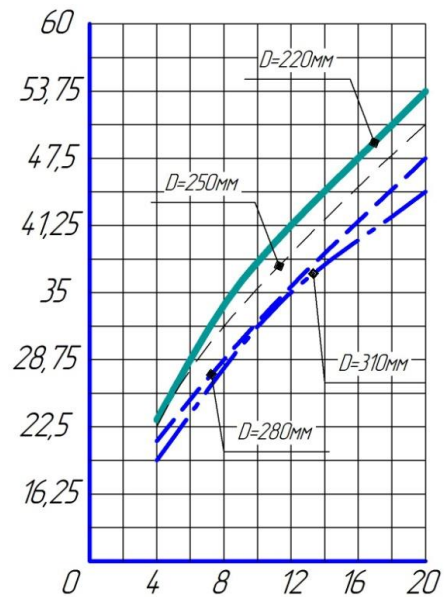


Рис. 4 - Зміна кута контакту зуба фрези з оброблюваною рейкою

При механічній обробці зубів рейок різанням зуборізними фрезами поверхневий шар піддається пластичній деформації і місцевим короточасним нагріванням. У цьому шарі виникають залишкові напруги, які мають значну величину.

Технологічне забезпечення експлуатаційних властивостей зубчастих рейок визначається рішенням двох завдань: вибір матеріалів рейок і призначення точності розмірів і системи параметрів стану поверхневого шару, які забезпечували необхідні експлуатаційні властивості; вибір методу і встановлення режимів обробки, що забезпечують найбільш економічне отримання заданої точності розмірів і системи параметрів стану поверхневого шару оброблених зубчастих рейок. Таким чином зносостійкість рейкових передач характеризується комплексним станом поверхонь тертя.

У відповідності зі сформованим поданням про процес приробки поверхонь зубчастих рейкових передач, одним з його результатів є утворення рівноважної шорсткості. Несуча здатність поверхні зубчастих рейок, їх коефіцієнт тертя і інтенсивність зносу при терті ковзання поряд з шорсткістю, визначаються макровідхиленням, хвилястістю і фізико-механічними властивостями. Тому що утворюється шорсткість поверхонь тертя в процесі підробітки буде залежати від інших параметрів стану поверхневого шару контактуючих деталей.

Рівноважний стан поверхонь тертя зубчастих рейок характеризується параметром [3]:

$$C_x = \frac{H_p \cdot W_p \cdot (0,75 \cdot R_z)}{S_m^6 \cdot k^{-12}}, \quad (7)$$

Значення комплексного параметра, що забезпечує необхідну зносостійкість розраховується за формулою:

$$C_x = 3375 \cdot \left[\frac{\sigma_T \cdot E}{\pi \cdot (l - \mu^2)} \right]^{-3} \cdot \left(\frac{10 \cdot I \cdot n}{\chi \cdot p} \right)^6 \quad (8)$$

Відомо, що при терті різального інструменту з оброблюваною поверхнею зубів рейок змінюються багато властивостей як оброблюваного матеріалу, так і ріжучого інструменту.

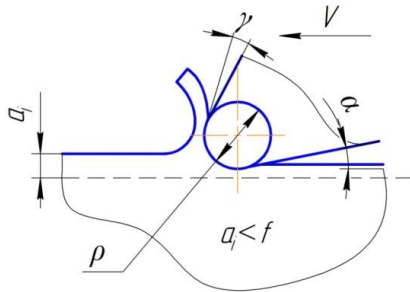


Рисунок 5 - Співвідношення між товщиною шару, що зрізається a_i і радіусом округлення різальної кромки ρ

При формоутворенні процес візання 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 зубів рейок визначається мінімальний кут ковзання $\psi_{ск}$ інструмента.

Ковзання буде відбуватися на певному куті ковзання $\psi_{ск}$ до тих пір, поки пластичні деформації не перейдуть до мікрорізання і безпосередньо різання, тобто коли товщина зрізу (a_i) не досягне певного значення глибини відносного впровадження ріжучим інструментом, що має радіус округлення ріжучого леза ρ [4].

Якщо розглядати впроваджений елемент - індентор, який переміщаючись в тангенціальному напрямку, деформує нижчележачий матеріал як ріжуче лезо з радіусом ρ , а глибину впровадженної нерівності h_i , як a_i , то глибина відносного впровадження h_i / ρ запишеться у вигляді: a_i / ρ .

Умови переходу пластичного відтискування в різання:

$$\frac{h_i}{R} = \frac{a_i}{\rho} \geq \frac{1}{2} \left(1 - \frac{2 \cdot \pi}{\sigma_s} \right), \quad (9)$$

де $h_i=a_i$ - товщина шару, що зрізається; $R=\rho$ - радіус ріжучого леза; τ - міцність на зріз адгезійного зв'язку; σ_s - межа плинності матеріалу.

Значить, що при

$$\sigma_s \leq 2 \cdot \tau$$

зовнішнє тертя неможливо при будь-якому відносному впровадженні, воно також неможливо при

$$\frac{h_i}{R} = \frac{a_i}{\rho} \geq 0,5$$

навіть за умови нульової міцності адгезійного зв'язку на зріз.

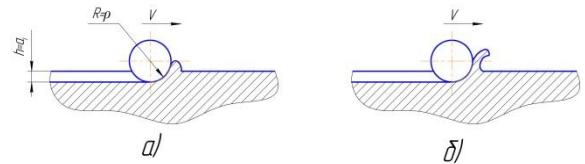


Рисунок 6 - Переміщення індентора (ріжучого леза) в разі передеформування (а) і різання (б)

При мастилі граничним буде відносне впровадження

$$\frac{h_i}{R} = \frac{a_i}{\rho} \geq 0,31.$$

При порушенні зовнішнього тертя в разі $\tau = 0$ і при наявності гарної мастильної плівки на поверхні розділу коефіцієнт тертя в залежності від ставлення $\frac{h_i}{R} = \frac{a_i}{\rho}$ визначається з молекулярно-механічної теорії тертя

$$f = \frac{\tau_0}{p_r} + \beta + 0,4 \cdot a_r \cdot \sqrt{\frac{h}{r}}, \quad (10)$$

де τ_0 - питома зсувна міцність молекулярних зв'язків;

β - коефіцієнт зміцнення молекулярних зв'язків під дією стискаючих напруг;

a_r - коефіцієнт гістерезисних втрат при ковзанні;

p_r - тиск на фактичних майданчиках контакту.

Підставляючи в формулу (10) значення $\frac{a_i}{\rho}=0,31$, при якому неможливо зовнішнє тертя, отримаємо $f=0,22$. Ця величина є граничним значенням деформаційної складової коефіцієнта тертя. При переході критичного значення, тобто при $f \geq 0,22$ спостерігаються скачки дотичної поверхні і індентора

Таким чином, глибина відносного впровадження, яка веде до різання без застосування мастила відповідає $\frac{a_i}{\rho} \geq 0,5$, а з мастилом - $\frac{a_i}{\rho} \geq 0,31$. Товщина шару, що зрізається описується формулою

$$a_i = S \cdot \sin \varphi_{ск} \cdot \sin \varphi, \quad (11)$$

де S_z - подача на зуб; φ - кут профілю зуба фрези.

Задаючись певним значенням радіусу ріжучого леза ρ зуба фрези і подачі на зуб S_z , визначаємо мінімальні значення кутів ковзання в суху і з МОР за формулою:

$$\text{без МОР} \quad \psi_{ск} = \arcsin \frac{0,5 \cdot \rho}{S_z \cdot \sin \varphi}, \quad (12)$$

$$\text{з МОР} \quad \psi_{ск} = \arcsin \frac{0,31 \cdot \rho}{S_z \cdot \sin \varphi}, \quad (13)$$

Співвідношення між кутом ковзання $\psi_{ск}$ і найбільшим кутом контакту зуба фрези ψ_{max} з оброблюваним зубчастим виробом дозволяє встановити ефективність процесу формоутворення через коефіцієнт $K_{фр}$ без застосування МОР і з МОР:

$$K_{фр} = \frac{\sin \psi_{max} - \sin \psi_{ск}}{\sin \psi_{max}} \cdot 100\%, \quad (14)$$

Аналіз графіків зміни коефіцієнта ефективності

формування фрезерування $K_{\text{эф}}$ (рис.7) зубчастих рейок в залежності від режимів різання без застосування MOP і з MOP показав області, що забезпечують нормальний процес формування робочих поверхонь. Сприятливим областю технологічного забезпечення параметрів стану поверхневого шару зубчастих рейок є значення коефіцієнта ефективності фрезерування $K_{\text{эф}}$ від 30 до 80% і регламентується радіусом округлення ріжучого леза інструменту ρ або величиною зносу по задній поверхні, режимами різання: подачі, швидкості, параметрами шорсткості, сил різання в залежності від прийнятої схеми різання.

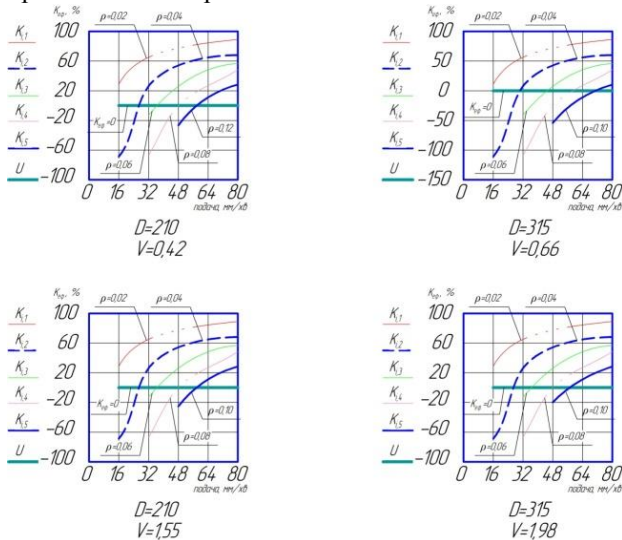


Рис. 7 - Графік зміни коефіцієнта ефективності фрезерування $K_{\text{эф}}$ в залежності від режимів різання із застосуванням MOP:

- 1 - $D = 210$, $Z = 10$, $V = 0,42$;
- 2 - $D = 315$; $Z = 10$; $V = 0,66$;
- 3 - $D = 210$, $Z = 10$, $V = 1,55$;
- 4 - $D = 315$; $Z = 10$; $V = 1,98$.

Дослідження 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 [5]:

$$f = 0,148 \cdot R_a^{0,08} \cdot V^{-0,09} \cdot (0,1 \cdot P_z)^{-0,06}, \quad (15)$$

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} .

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

Параметри стану шорсткості поверхні зубчастих рейок при рейкофрезеруванні для сталі мають такий вигляд:

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

$$W_z = P_z \cdot \frac{S_z^{1,01} \cdot a_i^{0,46} \cdot \rho^{0,16} \cdot \lambda^{0,54}}{V^{1,55}}, \quad (17)$$

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 .

$$R_z = 5 \cdot R_a = P_z \cdot \frac{S_z^{1,69} \cdot a_i^{0,5}}{V^{1,23} \cdot \rho^{0,14} \cdot \lambda^{0,41}} \cdot K_{\text{фр}} =$$

$$= \frac{10,16 \cdot \left(\frac{\sigma_T \cdot E}{\pi \cdot (1 - \mu^2)} \right)^{\frac{3}{4}} \cdot \left(\frac{10 \cdot I \cdot n}{\chi \cdot p} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot S_m^{\frac{3}{2}} \cdot k^{-3}}{H_p^{\frac{1}{4}} \cdot W_p^{\frac{1}{4}}}, \quad (18)$$

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 обробланих поверхонь зубчастих рейок надає технологічна спадковість, що вказує на широкі можливості управління системою параметрів обробланих поверхонь 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 [5].

Інтенсивність зносу зубчастих рейок досліджувалася в залежності від зміни технологічних параметрів нарізання зубів. На рис. 8 показана інтенсивність зносу зубчастих рейок від зміни кута неузгодженості при фрезеруванні зубчастих рейок спареними дисковими фрезами.

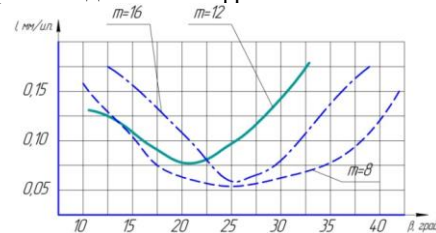


Рис. 8 - Вплив кута неузгодженості при фрезеруванні на зносостійкість зубчастих рейок

Досліджуючи комплексний параметр ефективності процесу формування $K_{\text{фр}}$, встановлені теоретичні залежності технологічних параметрів обробки на зносостійкість рейок в процесі експлуатації. На рис.9 показані залежності зміни зносостійкості зубчастих рейок модулем 8-16 мм від ефективності процесу формування. Коефіцієнт ефективності процесу формування $K_{\text{фр}}$ з фізичної точки зору показує безпосередню участь в обробці ріжучого інструменту і дозволяє судити про якість обробленої поверхні [1,5].

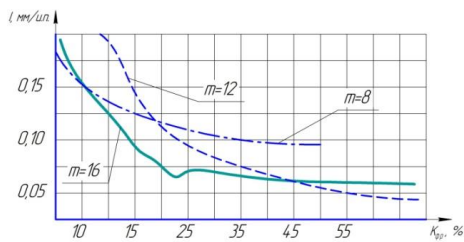


Рис. 9 - Зміна зносостійкості зубчастих рейок в процесі експлуатації від коефіцієнта ефективності процесу формоутворення

Висновки. 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 комплексним параметром стану поверхневого шару, вираженому через параметр шорсткості R_z . Розглянуті технологічні умови забезпечення показників якості поверхневого шару від кута ковзання при фрезеруванні зубчастих рейок. Аналіз структури технологічного процесу показав широкі можливості зміни технологічних параметрів обробки шляхом глибокого вивчення процесу формоутворення поверхневого шару зубчастих рейок і застосування нових високопродуктивних технологічних способів обробки. Проведено теоретичні та експериментальні дослідження з визначення оптимальних кутів ковзання $\psi_{ск}$ при яких встановлюється стабільність процесу зубофрезерування і необхідні умови по стійкості інструмента і якості оброблюваної поверхні.

Список літератури

1. Пермяков О.А., Клочко О.О., Синиця Ю.О. Синтез технологічних параметрів високопродуктивної обробки зубчастих рейок спареними фрезами. *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2018, № 17 (1239), С.71–77.
2. Клочко А.А., Зиновьев Н.И., Клочко Ю.А., Мироненко Е.В. Новые технологические направления чистовой обработки зубчатых реек. *Высокие технологии в машиностроении* : сб. науч. пр. ХДПУ. 2000, №1(3), С. 138–145.
3. Тимофеев Ю.В., Волошин А.И., Мироненко Е.В., Клочко А.А., Кравцов А.Н. Научное обоснование технологических методов обеспечения эксплуатационных свойств закаленных

крупномодульных зубчатых колес. *Надежность инструмента и оптимизация технологических систем* : сб. науч. тр. 2012, №30, С. 194–204.

4. Шелковой А.Н., Мироненко Е.В., Клочко А.А., Ефремов Д.В., Клиновский А.А. Методика расчета параметров состояния поверхностного слоя закаленных крупномодульных зубчатых колес в зависимости от условий их обработки. *Надежность инструмента и оптимизация технологических систем* : сб. науч. тр. 2012, №31, С. 157–173.
5. Мироненко Е.В., Клочко А.А., Шелковой А.Н., Ярошенко А.А., Палашек С.Ю. Исследование влияния параметров волнистости на эксплуатационные свойства цилиндрических крупномодульных зубчатых колес. *Надежность инструмента и оптимизация технологических систем* : сб. науч. тр. 2014, №34, С. 19–25.

References (transliterated)

1. Permyakov O. A., Klochko A. A., Sinitza Y.O. *SynteZ tekhnolohichnykh parametriv vysokoproduktyvnoi obrobky zubchastykh reioK sparenymy frezamy* [Synthesis of technological parameters of high-performance processing of toothed racks by twin milling cutters]. *Bulletin of NTU "KhPI"*. 2017, No.17 (1239), pp. 71–77.
2. Klochko A.A., Zinoviev N.I., Klochko Y.A., Mironenko E.V. *Novie tekhnolohicheskye napravleniya chystovoi obrabotky zubchatykh reek* [New technological directions of finishing processing of cogged racks]. *Visoki tehnologii v mashinobuduvanni: zb. Sciences. Pr. KhPPU*. 2000, No.1 (3), pp. 138–145.
3. Timofeev Y.V., Voloshin A.I., Mironenko E.V., Klochko A.A., Kravtsov A.N. *Nauchnoe obosnovanye tekhnolohicheskyykh metodov obespecheniya ekspluatatsyonnykh svoystv zakalennykh krupnomodulnykh zubchatykh koles* [Scientific substantiation of technological methods for ensuring the operational properties of hardened coarse-grained cogwheels]. *Instrument reliability and optimization of technological Systems: Sat. Sci. Tr.* 2012, No. 30, pp.194–204.
4. Shelkova A.N., Mironenko E.V., Klochko A.A., Efremov D.V., Klinovskii A.A. *Metodyka rascheta parametrov sostoianiya poverkhnostnogo sloia zakalennykh krupnomodulnykh zubchatykh koles v zavyssymosti ot uslovyi ykh obrabotky* [Methods for calculating the parameters of the state of the surface layer of quenched coarse-grained gears, depending on the processing conditions]. *Tool reliability and optimization of technological systems: Sat. Sci. Tr.* 2012, No.31, pp.157–173.
5. Mironenko E.V., Klochko A.A., Shelkova A.N., Yaroshenko A.A., Palashek S.Y. *Yssledovanye vliyaniya parametrov volnistosti na ekspluatatsyonnye svoystva tsylindricheskyykh krupno-modulnykh zubchatykh koles* [Investigation of the influence of ripple parameters on the operational properties of cylindrical coarse-grained cogwheels]. *Instrument reliability and optimization of technological systems: Sat. Sci. Tr.* 2014, No.34, pp.19–25.

Поступила (received) 14.05.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Пермяков Олександр Анатолійович (Пермяков Александр Анатольевич, Permyakov Olexsandr Anatoliyovych) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9589-0194>; тел.: (057)-720-66-25; e-mail: perm_a@i.ua.

Клочко Олександр Олександрович (Клочко Александр Александрович, Klochko Alexander Alexandrovich) – доктор технічних наук, професор кафедри технологія машинобудування і металорізальні верстати Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2841-9455>; тел.: (067) 936-36-64; e-mail: ukrstanko21@ukr.net.

Веселовська Наталія Ростиславівна (Веселовская Наталья Ростиславовна, Veselovskaya Natalia Rostislavovna) - доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри машин та обладнання сільського господарювання виробництва Вінницький національний аграрний університет, м Вінниця, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9399-6721>; тел. +380975370748; e-mail: wnatalia@ukr.net.

Синиця Юрій Олександрович (Синица Юрий Александрович, Sinitza Yuriy Olexsandroovich) – магістр кафедри технологія машинобудування і металорізальні верстати Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7081-2536>; тел.: (063) 656-75-16; e-mail: yura.sinitza.at@gmail.com.

ЗМІСТ

Сліпченко К. В., Петруша І. А., Туркевич В. З. Фізико-механічні властивості cnp композитів зі зв'язками на основі карбідів TI, CR, V в умовах високошвидкісного точіння AISI 316L.....	3
Підгаєцький М.М., Щербина К.К. Дослідження повздовжньої сталості пружно-гвинтового хону.....	8
Єнікєєв О.Ф., Євсюкова Ф.М., Суботін О.В., Приходько О.Ю. Аналіз частотних характеристик систем автоматичного керування параметрами технологічних процесів.....	13
Гермашев А. И., Логоминов В. А., Козлова Е. Б., Кришталь В. А. Основы формирования обработанной поверхности при фрезеровании тонкостенных деталей.....	18
Гаращенко Я.Н. Сложности контуров областей послойного формообразования на основе анализа фрактальной размерности.....	24
Сизый Ю. А., Ушаков А. Н., Слипченко С. Е. Проектирование оптимальных параметров операции врезного шлифования, ограниченных предельно допустимой контактной температурой.....	31
Добротворский С. С., Кононенко С. Н., Басова Е. В. Технологическое обеспечение высокоскоростного фрезерования деталей с неравномерной малой жёсткостью.....	38
Данилейко О.В., Ладенко С.В., Жуков А.Н. Повышение надежности и эффективности торцового уплотнения для компрессора углекислого газа.....	43
Губський С. О., Цебрєнко М.В., Окунь А. О. Дослідження напруженого деформованого стану металоконструкції стєнду механізму підйому вантажу.....	50
Майборода В. С., Слободянюк І. В., Джулій Д. Ю., Тарган Д. В. Вплив магнітно-абразивного оброблення на якість шпонкових фрез із швидкорізальної сталі.....	55
Приходько О.Ю., Слипченко С.Е., Евсюкова Ф.М., Басова Е.В., Иванова М.С. вопросы управления агрегированными технологическими системами на основе структурного синтеза конечных автоматов.....	60
Добротворский С.С., Сокол Е.И., Гнучих С.С., Добровольская Л.Г. Разработка и внедрение enterprise resource planning (ERP) систем на open source технологиях в машиностроительных предприятиях.....	67
Пермяков О.А., Клочко О.О., Веселовська Н.Р., Синиця Ю.О. Технологічне забезпечення підвищення параметрів точності та якості зубчастих рейок важких верстатів з ЧПК.....	72
Костюк Г. И., Екасёва Ю. В. О влиянии доли нитрида тантала в твердых сплавах t12a и t23a на эффективность получения наноструктур при действии фемтосекундного лазера.....	78
Костюк Г. И. Перспективы создания высокоэнтропийных силицидных, нитридных, карбидных, боридных и оксидных нанопокрытий на твёрдом сплаве T12A.....	84
Костюк Г. И., Григор О. Д. Сравнение температурных режимов в зоне лазерной фемтосекундной обработки твердого сплава волкар при использовании теплофизических и термомеханических характеристик, стохастических значений, просчитанных квантово-механическим методом.....	90
Фесенко А. В., Басова Е. В., Иванова М. С., Евсюкова Ф. М., Забара А. С. Анализ конструкции и испытание рабочей зоны роторно-кавитационного активатора.....	95
Герасим В. В., Охрем В. Г. Нові аспекти фізики термоелектричного охолодження.....	101
Гасанов М.І., Клочко О.О., Заковортний О.Ю., Пермінов Є.В. Технологічний регламент оптимізації систем відновлення функціональних властивостей великогабаритних відкритих зубчастих передач.....	107
Костюк Г. И., Тимофеев А. Г. Разработка высокоэнтропийных карбидных и силицидных нанопокрытий на стм кортинит.....	113
Ищенко Г. И., Стрельчук Р. М. О финишной обработке рабочей части лопаток паровых турбин.....	119
Новіков Ф.В., Клочко О.О., Охріменко О.А., Анциферова О.О., Басова Є.В. Математична модель теплонапруженості процесу імпульсного переривчастого шліфування.....	127
Ковалевський С.В., Ковалевська О.С. Кодування інформації як основа створення інноваційних виробничих систем.....	133