

О. А. ОХРИМЕНКО, О. Ю. ЗАКОВОРОТНИЙ, Є. В. МИРОНЕНКО, К. В. КАМЧАТНА-СТЕПАНОВА, Л. В. КЛОЧКО, С. С. ГЛУШКО, Є. О., ПЕРМЯКОВ, В. С. ФЕДОРЕНКО

ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ШВИДКІСНОЇ ЗУБООБРОБКИ ЗАГАРТОВАНИХ КРУПНОМОДУЛЬНИХ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС

Забезпечення високих експлуатаційних характеристик загартованих крупномодульних зубчастих коліс прямо залежить від параметрів їхнього поверхневого шару. У межах цього дослідження було проаналізовано теоретичні підходи щодо формування зв'язку між характеристиками стану поверхні зубів і режимами механічної обробки. Встановлено, що зв'язок між технологічними умовами зубообробки та параметрами поверхневого шару можна описати системою аналітичних рівнянь. Ці рівняння можуть бути використані при створенні алгоритмів і програм для вибору оптимальних технологічних режимів обробки з урахуванням необхідних параметрів якості поверхневого шару, які забезпечують довговічність роботи зубчастих пар. Процес пластичного деформування матеріалу при обробці пов'язаний із геометрією ріжучого інструмента, зокрема з радіусом заокруглення його ріжучої крайки. Зміна цього радіуса впродовж обробки обумовлена умовами навантаження та характеристиками оброблюваного матеріалу. Цей вплив розглянуто з урахуванням кінематики взаємодії інструмента з деталлю, що дозволяє стабілізувати якість поверхневого шару при виготовленні зубчастих коліс.

Ключові слова: функціональні властивості, експлуатація, крупногабаритні зубчасті передачі, формування похибок, зносостійкість, зубофрезерування, режими різання,

О. А. OKHRIMENKO, O. Yu. ZAKOVOROTNY, E. V. MIRONENKO, K. V. KAMCHATNA-STEPANOVA, L. V. KLOCHKO, S. S. GLUSHKO, E. O. PERMYAKOV, V. S. FEDORENKO

WAYS TO ENHANCE THE EFFICIENCY OF HIGH-SPEED GEAR MACHINING OF HARDENED LARGE-MODULE GEARS

Ensuring high performance characteristics of hardened large-module gears directly depends on the parameters of their surface layer. Within this study, theoretical approaches to establishing the correlation between surface condition characteristics of gear teeth and machining parameters have been analyzed. It has been determined that the relationship between the technological conditions of gear processing and the surface layer parameters can be described by a system of analytical equations. These equations can be employed in the development of algorithms and software for selecting optimal machining modes, taking into account the required surface quality parameters that ensure the long-term performance of gear pairs. The process of plastic deformation during machining is closely related to the geometry of the cutting tool, particularly the radius of curvature of its cutting edge. Changes in this radius throughout the machining process are determined by loading conditions and the properties of the workpiece material. This influence has been analyzed considering the kinematics of tool-workpiece interaction, which allows stabilization of surface layer quality during gear manufacturing.

Keywords: functional properties, performance, large-size gear transmissions, error formation, wear resistance, gear milling, cutting modes.

Вступ. Функціональна надійність зубчастих передач значною мірою залежить від контактних характеристик поверхонь, що утворюються в результаті остаточної обробки. Ефективне забезпечення експлуатаційних параметрів досягається через комплексне врахування механічних методів впливу на поверхню та принципів функціонально-вартісного підходу до вибору технологічних рішень.

Дослідження у напрямку підвищення продуктивності зубообробки, водночас забезпечуючи задані параметри мікрогеометрії поверхні, які є критично важливими для експлуатаційних характеристик крупномодульних зубчастих коліс (ЗКЗК)

Аналіз останніх досліджень та публікацій. До важко навантажених зубчастих передач відносяться приводи машин, при проектуванні яких висуваються жорсткі вимоги до мінімізації їх габаритів, маси і вартості. Сюди, в першу чергу, відносяться транспортні машини і гірські машини, що працюють в обмеженому просторі. Реалізація цих жорстких вимог призводить до значного зростання удільної сили навантаженості, а вимога максимізації продуктивності машин призводить до зростання швидкісних характеристик приводу. До цього слід додати динамічний характер зовнішнього навантаження і значну забрудненість навколишнього середовища дрібнодисперсними речовинами абразивного характеру [1, 17]. Всі перераховані фактори сприяють зниженню надійності машин і їх приводів, габарити і маса яких в основному визначаються параметрами зубчастих передач.

Підвищення ефективності обробки зубчастих коліс передбачає глибоке вивчення фізичних процесів, що супроводжують формування стружки та відділення матеріалу в зоні різання. Зокрема, при високошвидкісному зубофрезеруванні пластична деформація матеріалу здійснюється за комбінованою схемою стиснення і зсуву [1].

Аналіз механізмів формування похибок крупногабаритних зубчастих коліс свідчить про те, що елементарні похибки систем операцій зубообробки характеризуються випадковими числовими характеристиками, які визначають величину і характер входження у відповідні комплексні складові, які, в свою чергу, взаємодіючи між собою, визначають досліджувані похибки крупногабаритних зубчастих коліс [2, 4, 6, 14, 16, 18].

У зв'язку з тим, що досліджувані похибки обробки виникають в результаті впливу ряду випадкових факторів, характеристики яких, в залежності від рівня складності структурної будови похибок, є величинами або функціями, що носять випадковий характер прояви, їх визначення можливо з використанням методів теорії ймовірностей.

Сучасні тенденції розвитку машинобудування призводять до ще більшого посилення вимог до параметрів якості передач при їх проектуванні внаслідок:

- збільшення об'ємних і контактних напружень при значній нерівномірності їх розподілу;
- збільшення швидкостей ковзання і температур внаслідок зростання продуктивності машин;

– підвищення ймовірності відмов через ускладнення конструкцій машин і збільшення економічних втрат за час усунення відмов (втрачена вигода);

Підвищення довговічності приводів машин є одним з найважливіших (поряд з підвищенням продуктивності і зниженням собівартості) вимог до проектування машин, яке в значній мірі забезпечується за рахунок збільшення ресурсу основних деталей приводу і, в першу чергу, за рахунок підвищення зносостійкості їх контактних поверхонь. [3, 4, 7, 8, 10, 13]

Несуча здатність і зносостійкість зубчастих передач приводу визначається рівнем конструктивних рішень щодо забезпечення оптимальних умов роботи передач, якістю їх виготовлення і ступенем відповідності умов експлуатації режимів, прийнятих при їх проектуванні.

Конструктивні рішення щодо забезпечення необхідної несучої здатності зубів зубчастих передач зазвичай базуються на виконанні умов запобігання двох основних видів пошкоджень – поломок зубів (статичних і втомних) і контактної втоми викришування (підтіг) робочих поверхонь.

Методи розрахунку згинальної і контактної витривалості досить добре розроблені, пройшли багаторічну експлуатаційну перевірку і є основними методами розрахунку зубчастих передач на міцність, що знайшло своє відображення в стандартах Міжнародного Комітету по Нормалізації ISO/DIS 6336 / III (згинальна витривалість) і ISO/DIS (контактна витривалість), а також в стандарті ГОСТ 21354-87 [2, 8, 11, 12, 16, 18,].

Зносостійкість визначається як властивість матеріалу чинити опір зношуванню в певних умовах тертя. Відповідно, зношування являє собою процес поступової зміни розмірів тіла при терті, що виявляється у відділенні з поверхні тертя матеріалу і (або) його залишкової деформації [9, 14].

У зубчастих передачах важконавантажених машин має місце граничне тертя кочення з проковзуванням. При цьому основним видом зношування є абразивно-втомне механічне зношування, а в разі настання заїдання – молекулярно-механічне.

Відповідно до роботи [6, 17], при високих швидкостях різання умови деформування в зоні стружкоутворення такі, що теплота від деформації в зоні локалізованого зсуву тобто дифузійні процеси не можуть реалізуватися і опір зсуву тедв знижується.

Можливість реалізації адіабатичного зсуву при швидкісному зубофрезеруванні лезовим інструментом пов'язана, перш за все, з низькими значеннями тепло- та температуропровідності. Внаслідок цього припускають, що нижчі значення опору зсуву титанового сплаву порівняно з $\sigma_{сдв}$ сталей, одержувані при їх різанні, обумовлені цією обставиною.

Результати численних досліджень показують, що в зоні первинної і вторинної деформації відбувається впорядковане витягування кристалів у напрямку площини зсуву, формуючи так звану "текстуру цементиту", яка характеризується витягнутими зернами.

Експерименти підтверджують: у зоні зсуву (СДВ) опір пластичній деформації зберігає стабільне значення через насичення деформаційними дефектами. У процесі швидкісного різання сталі спостерігається еволюція типів стружки: від елементної — до зливної, і згодом до сегментної. Для титанових і жароміцних сплавів сегментна стружка формується навіть при помірних швидкостях обробки [2, 3].

Мета дослідження. Дослідження технологічних умов довговічності крупногабаритних зубчастих передач по початковим параметрам евольвентних профілів зубів без урахування забезпечення параметрів стану поверхневого шару зубчастих коліс з вельми наближеною, не відображає того факту, що через знос зубів форма профілю стає відмінною від початкової евольвентної поверхні. В результаті чого змінюються навантажено-кінематичні параметри контакту, які, в свою чергу, інтенсивно змінюють процес зношування і форму профілів зубів по лінії контакту і в поперечному перерізі [1, 2, 3, 15, 18].

Загальна імітаційна модель формування та прогнозування інтермітентії в результаті зносу форми робочої поверхні зубів спрямована на розробку засобів диференційованого і комплексного забезпечення експлуатаційних властивостей поверхонь крупномодульних зубчастих коліс за допомогою системної оптимізації та дозволяє науково обґрунтувати зміни якісних характеристик крупногабаритних зубчастих передач в залежності від часу їх експлуатації, є актуальною і відповідає вимогам науково-технічного прогресу сучасного машинобудування.

Основна частина. Формування адіабатичного зсуву при швидкісному зубофрезеруванні обумовлюється низькими показниками теплопровідності і температуропровідності оброблюваних сплавів. Це пояснює зменшення опору зсуву титанових сплавів у порівнянні зі сталями в аналогічних умовах.

Сучасні підходи до зубофрезерування постійно еволюціонують у напрямку підвищення продуктивності та точності. Одним із ключових завдань є скорочення технологічного часу обробки без шкоди для якості поверхневого шару. Ефективність процесу можна оцінити за формулою розрахунку базового часу механічної обробки t_0 :

$$t_0 = \frac{(b+y_1+y_2)z\pi D_f}{Sk10^3v} \quad (1)$$

де: b – ширина вінця зубчастого колеса, мм;

y_1 – довжина входу фрези при обробці;

y_2 – довжина виходу фрези з матеріалу;

z – кількість зубів оброблюваної шестерні;

D_f – діаметр фрезерного інструменту, мм;

S – подача на оберт заготовки, мм/об;

k – число проходів фрези;

v – швидкість різання при високошвидкісному фрезеруванні, м/хв.

З метою інтенсифікації процесу зубообробки можуть застосовуватись такі стратегічні підходи:

- Підвищення швидкості обертання фрези сприяє скороченню часу обробки та зменшенню теплового впливу на заготовану поверхню.
- Збільшення подачі дозволяє обробити більший об'єм матеріалу за меншу кількість проходів.
- Скорочення траєкторії переміщення інструменту (тобто шляхів y_1 та y_2) оптимізує використання ресурсу верстата.
- Збільшення кількості робочих заходів інструменту на чорнових стадіях обробки розвантажує зуб фрези і підвищує її довговічність.
- Визначення регламентованих параметрів обробки, зокрема геометрії різальної частини інструменту (радіуса заокруглення леза) та мінімального кута врізання без припуску, забезпечує стійку якість поверхні.

Одним із ефективних методів підвищення швидкісних режимів зубофрезерування є створення сприятливих умов формування профілю зуба. Це досягається шляхом оптимального вибору режимів різання, застосуванням інструментів з високотвердих сплавів, зокрема мінералокераміки, а також розробкою раціональних схем обробки.

Ще одним резервом підвищення ефективності є поєднання осевого та радіального рухів фрези, що дозволяє зменшити час переходів та підвищити стійкість інструменту.

Зокрема, для черв'ячних модульних фрез продуктивність підвищується за рахунок раціонального управління моментом входження зуба фрези в заготовку. За умови мінімального кута врізання та обробки без припуску досягається зменшення контактного навантаження, що позитивно впливає на довговічність інструмента.

До інноваційних рішень, що дозволяють значно покращити ефективність, слід віднести:

1. Використання спеціальних дискових немодульних фрез із збільшеним діаметром (300–450 мм), що забезпечують стійку геометрію ріжучих елементів.
2. Застосування гнучкої кінематики, при якій відсутній жорсткий зв'язок між обертанням інструменту та заготовкою, що дозволяє адаптувати процес до динаміки навантажень.
3. Регулювання профільного коефіцієнта формоутворення відповідно до жорсткості системи "інструмент – верстат – заготовка".

Сукупне використання зазначених підходів дозволяє реалізувати високопродуктивні та надійні технологічні процеси обробки зубчастих елементів великого модуля із гатованою структурою. При цьому гарантовано зберігається належний рівень точності та експлуатаційної надійності оброблених поверхонь.

Як встановлено у попередніх дослідженнях, жорсткість технологічної верстатної системи є визначальним чинником при досягненні необхідної якості поверхневого шару, зокрема параметра шорсткості. При незмінних умовах — швидкість обробки $v=2,5$ м/с, радіус заокруглення ріжучої кромки $\rho=50$ мкм та інших стабільних технологічних параметрах, аналогічних попереднім серіям дослідів, було отримано таку узагальнену аналітичну залежність:

$$R_z = 133,11 + 435S - 500[S(1 - 0.25S)]^{0.5} + \frac{9200S^{0.5}}{j}, \quad (2)$$

де: S — подача, мм/об,

j — жорсткість технологічної системи, Н/мм.

Аналіз графічних результатів, наведених на рис. 1, засвідчив чітко виражений вплив жорсткості системи на параметр шорсткості R_z , що проявляється особливо інтенсивно зі збільшенням подачі. Отримані теоретичні й експериментальні залежності демонструють, що при різних подачах можливо досягти однакових значень шорсткості, проте це вимагає коригування жорсткісних характеристик технологічної схеми.

З цього випливає практично важливий висновок: при забезпеченні заданої якості поверхні шестерень варто обов'язково враховувати жорсткість ТСС як один з ключових параметрів системи обробки.

Ще одним аспектом, що заслуговує на увагу, є відносна довжина опорної лінії шорсткого профілю, яка при зубофрезеруванні залишається незмінною щодо режимів обробки. Цей висновок було підтверджено узагальненням результатів 50 експериментів, які наведені у вигляді середніх значень з відповідними інтервалами розсіювання на рис. 2. Добра відповідність між теоретичною кривою та усередненими експериментальними значеннями свідчить про достовірність моделі та підтверджує її практичну застосовність.

Варіації параметра t_p пояснюються впливом таких чинників, як:

- шорсткість ріжучої кромки фрези R_{zbp} ,
- радіус заокруглення ρ ріжучої кромки,
- жорсткість ТСС j ,
- неоднорідність твердості по глибині шару ΔHRC .

Загальний аналіз отриманих результатів дає змогу стверджувати, що висота нерівностей шорсткого мікрорельєфу зубчастого колеса при зустрічному фрезеруванні визначається комплексом факторів, серед яких домінуючий вплив мають величина подачі S_{min} та радіус заокруглення ріжучої кромки ρ .

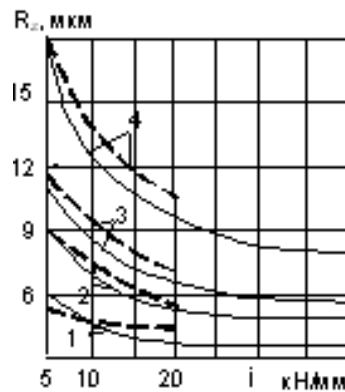
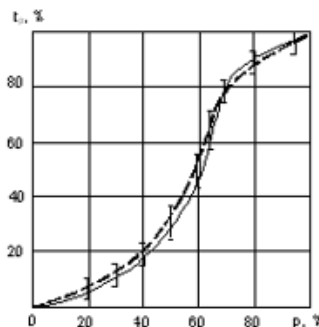


Рис. 1 – Графічне відображення впливу жорсткості технологічної верстатної системи j на величину параметра шорсткості R_z

Для досягнення найнижчих значень параметра шорсткості поверхні при фінішному зубофрезеруванні доцільно забезпечити мінімально можливий радіус заокруглення ріжучої кромки інструмента — ρ . У випадку, коли цей радіус дорівнює 50 мкм, а шорсткість ріжучої кромки R_z становить 0,5 мкм, за умови коефіцієнта тертя $\mu=0,3$, модуля пружності $E=19,6$ ГПа, межі пружності оброблюваного матеріалу $\sigma_t=1590$ МПа та застосування твердосплавного інструмента типу ВК100М з $\tau_0=1290$ МПа, можна обчислити граничне значення шорсткості, що формується на обробленій поверхні при використанні мінімальних значень подачі:

$$R_{zmin} = 500\sqrt{1 \cdot 0,05} \left(1 - \frac{2 \cdot 29,3}{60} \right) + 0,5 = 3,11 \text{ мкм}$$



Суцільна лінія - теорія, штрихова - експеримент)

Рис. 2 – Зміна параметра t_p в залежності від радіуса округлення ріжучої крайки інструменту під час зустрічного зубофрезерування

Таким чином, отримані аналітичні вирази з достатньою точністю відображають закономірності формування мікрогеометрії обробленої поверхні. Представлені залежності підтверджують ефективність

використання швидкісного зубофрезерування з інструментом, оснащеним ріжучими пластинами з мінералокераміки (ФОМ).

Побудовані математичні моделі розподілу мікронерівностей — виступів і западин — поверхневого профілю при обробці ФОМ забезпечують встановлення взаємозв'язків між висотними характеристиками шорсткості. Зокрема:

$$R_a = 0,18R_z, \quad (3)$$

$$R_{max} = 1,35R_z, \quad (4)$$

Крокові параметри шорсткості при зубофрезеруванні інструментом з мінералокерамічними пластинами визначаються співвідношеннями:

$$S_m = \frac{t_m S_{np}}{B} \zeta \left(\frac{N}{S_{np}} - 1 \right), \quad (5)$$

$$S = \frac{S_{np}}{\sum_0^t 2} \zeta \left(\frac{N}{S_{np}} - 1 \right), \quad (6)$$

Припускаючи, що для умов обробки з використанням ФОМ мікрогеометрія поверхні має випадковий розподіл, отримуємо залежність для розрахунку відносної довжини опорної лінії профілю t_p залежно від радіуса округлення ріжучої крайки ρ :

$$\text{при } \rho \leq 0,050\text{мм}; t_p = 0,02\rho_2, \quad (7)$$

$$\text{при } \rho > 0,050\text{мм}; t_p = 100 - 0,02(100 - \rho)^2, \quad (8)$$

Таким чином, розроблені аналітичні моделі доводять, що ключовими факторами, які впливають на формування мікропрофілю при швидкісному зубофрезеруванні з використанням мінералокерамічних пластин, є режими різання, геометричні параметри інструменту (насамперед радіус округлення крайки), діаметр фрези, а також початкова твердість оброблюваного матеріалу.

Однак, реалізація високопродуктивної зубообробки загартованих крупномодульних зубчастих коліс на основі зазначених підходів призводить до виникнення похибок у вигляді поздовжньої хвилястості уздовж профілю зуба. Ці мікродефекти потребують окремого аналізу, оскільки можуть істотно впливати на експлуатаційні характеристики елементів зубчастих передач.

Висновки.

Новий підхід прогнозування похибок механічної обробки зубчастих коліс, що базується на принципах суперпозиції, векторному характері складових похибки і методі статистичного математичного моделювання ґрунтується на методі Монте – Карло.

Відмінністю реального формоутворення від номінального (ідеального) є наявність відхилень параметрів стану поверхневого шару крупногабаритних зубчастих коліс реальних профілів від номінальних. Основними кінцевими задачами, які повинні бути вирішені при дослідженні закономірностей реального формоутворення, є задачі імітаційного моделювання прогнозування з заданою вірогідністю похибок, які виникають, а також задачі управління, в тому числі оптимального, цими похибками.

Результати експериментального визначення навантаження заїдання, для умов експлуатації важконавантажених гірських машин, дозволили уточнити значення коефіцієнта: для нелегованих масел – $c_p = 1,7$; для масел, легованих протизадирними присадками – $c_p = 2,2$.

Список літератури

1. Шелковой А.Н., Гасанов М.И., Набока Е.В., Ключко А.А., Белоусов Н.А., Новиков Ф.В. Имитационное моделирование технологического обеспечения эксплуатационных свойств крупногабаритных зубчатых колес. Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении: Материалы международной научно-технической конференции, 22-24 сентября 2021 г., г. Одесса. – Одесса: Государственный университет «Одесская политехника», 2021. – С. 207 – 210.
2. Kovalev Viktor D, Vasilchenko Yana V., Klochko Alexander A., Gasanov Magomedemin I. Technology of restoration of large gear boxes. Dašić, P. (editor): Modern trends in metalworking, Vol. 1: Vrnjačka Banja: SaTCIP Publisher Ltd., 2018. – P. 43–63. ISBN 978-86-6075-065-7.
3. Технологические основы зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес: монография / А. А. Ключко [и др.]. – Краматорск : ДГМА, 2014. – 479 с. ISBN 978-966-379-667-3.
4. Исследование процессов зубофрезерования закаленных шевронных зубчатых колес / А.А. Ключко, М.И.

- Гасанов, Е.В. Басова, С.Ю. Палашек, А.Л. Невмержицкий // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб.наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2017. – Вип. 40. – С. 90–101.
5. Klochko, O., Okhrimenko, O., & Shapovalov, M. (2021). Initial instrumental surface of modular millings on the basis of one-band hyperboloid for the manufacture of gear wheeled wheels. *Mechanics and Advanced Technologies*, 5(3), 374–380. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2021.5.3.250168>.
6. Полонський, Л. Г., Ключко, О. О., Охріменко, О. А., Бецко, Ю. М., Коваль, Б. Г., & Храбан, Д. В. (2024). Особливості визначення профілю інструменту для гвинтових поверхонь за допомогою САД-систем. *Технічна інженерія*, 1(93), 70–80. [https://doi.org/10.26642/ten-2024-1\(93\)-70-80](https://doi.org/10.26642/ten-2024-1(93)-70-80)
7. Гасанов М.І., Заковоротний О.Ю., Ключко О.О., Рябченко С.В. Перспектива дослідження процесу швидкісного абразивного зубофрезерування циліндричних зубчастих коліс // Сучасні питання виробництва та ремонту в промисловості і на транспорті: Матеріали Міжнародного науково-технічного семінару, 26–27 березня 2024 р. – Київ: АТМ України, 2024. – С. 24–25.
8. Гасанов М.И., Ключко А.А., Черкашина Г.И., Перминов Е.И. Групповые маршрутные технологические процессы восстановления крупногабаритных зубчатых колес на основе имитационного моделирования с учетом прогрессирующих видов износа // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб.наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2018. – Вип. 42. – С. 28–36.
9. Гасанов М.І., Ключко О.О., Заковоротний О.Ю., Перминов Є.В. Технологічний регламент оптимізації систем відновлення функціональних властивостей великогабаритних відкритих зубчатих передач // 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. / Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХПІ», 2018. – № 6 (1282) 2018. – С. 107–112. – ISSN 2079-004X.
10. Шелковой А.Н. Обеспечение эксплуатационных свойств закаленных зубчатых колес / А.Н. Шелковой, А.А. Ключко, М.И. Гасанов // Вестник современных технологий: сб. науч. тр. – Севастополь : ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», 2017. – Вып. 8. – С. 61–70.
11. Функциональные аспекты имитационного математического моделирования геометрических параметров процесса зубофрезерования / О.М. Шелковий, О.О. Ключко, М.І. Гасанов, Д.О. Кравченко, О.О. Анциферова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології у машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 26 (1248). – С. 66–74. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-004X.
12. Ключко А.А., Гасанов М.И., Басова Е.В. Регламент выбора и назначения параметров состояния поверхностного слоя закаленных зубчатых колес. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології у машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 33 (1205). – С. 145–157. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-004X.
13. Ключко О.О., Гасанов М.І., Заковоротний О.Ю., Майборода В.С., Охріменко О.О., Федоренко В.С. Технологічні передумови деформації і руйнування зрізуючого шару при швидкісному зубофрезеруванні загартованих циліндричних зубчастих коліс на основі атомного підходу // 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», 2022. – № 1 (5) 2022. – С. 10–20. – ISSN 2079-004X, DOI: 10.20998/2079-004X.2022.1(5).02
14. 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.
15. Gołębski, R., & Ivandic, Z. (2018). Analysis of Modification of Spur Gear Profile. *Tehnicky 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. Нежебовський В.В., Дергоусов В.М., Пермяков О.А., Ключко О.О., Устиненко О.В., Рябченко С.В. Новітні процеси обробки зубчастих коліс редукторів вугледобувних комбайнів // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XX Міжнародної науково-технічної конференції 01–03 вересня 2022 року / за заг. ред. В. Д. Ковальова. – Краматорськ-Тернопіль: ДДМА, 2022. – С. 162–163. – ISBN 978-617-7889-20-4.
18. Нежебовський В.В., Бережний Р.А., Пермяков О.А., Ключко О.О., Рябченко С.В., Устиненко О.В. Системи параметрів стану робочих поверхонь і точності розмірів циліндричних загартованих зубчастих коліс очисного комбайну укд200-500 нового покоління // 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», 2022. – № 2 (6) 2022. – С. 7–15. – ISSN 2079-004X, DOI: 10.20998/2079-004X.2022.2(6).02.

References (transliterated):

1. Shelkovi A.N., Gasanov M.I., Naboka E.V., Klochko A.A., Belousov N.A., Novikov F.V. Imitatsionnoe modelirovanie tekhnologicheskogo obespecheniia ekspluatatsionnykh svoistv krupnogabaritnykh zubchatykh koles. *Novye i netraditsionnye tekhnologii v resurso- i enerhosberezenii: Materialy mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi*

- konferentsii, 22–24 sentiabria 2021 g., g. Odessa. – Odessa: Gosudarstvennyi universitet «Odessaia politehnika», 2021. – S. 207–210.
2. Kovalev Viktor D., Vasilchenko Yana V., Klochko Alexander A., Gasanov Magomedemin I. Technology of restoration of large gear boxes. Dašić, P. (editor): Modern trends in metalworking, Vol. 1: Vrnjačka Banja: SaTCIP Publisher Ltd., 2018. – P. 43–63. ISBN 978-86-6075-065-7.
 3. Tekhnolohichni osnovy zuboobrobky zakalenykh krupnomodulnykh zubchatykh koles: monografiia / A.A. Klochko [i dr.]. – Kramatorsk: DGMA, 2014. – 479 s. ISBN 978-966-379-667-3.
 4. Issledovanie protsessov zubofrezerovaniia zakalenykh shevronnykh zubchatykh koles / A.A. Klochko, M.I. Gasanov, E.V. Basova, S.Yu. Palashek, A.L. Nevmerzhytskii // Nadiinist instrumentu ta optymizatsiia tekhnologichnykh system: zb. nauk. pr. – Kramatorsk: DDMA, 2017. – Vyp. 40. – S. 90–101.
 5. Klochko, O., Okhrimenko, O., & Shapovalov, M. (2021). Initial instrumental surface of modular millings on the basis of one-band hyperboloid for the manufacture of gear wheeled wheels. *Mechanics and Advanced Technologies*, 5(3), 374–380. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2021.5.3.250168>
 6. Polonskyi, L.H., Klochko, O.O., Okhrimenko, O.A., Betsko, Yu.M., Koval, B.H., & Khraban, D.V. (2024). Osoblyvosti vyznachennia profiliiu instrumentu dlia hvyntovykh poverkhon za dopomohoiu CAD-system. *Tekhnichna inzheneriia*, (1(93)), 70–80. [https://doi.org/10.26642/ten-2024-1\(93\)-70-80](https://doi.org/10.26642/ten-2024-1(93)-70-80)
 7. Gasanov M.I., Zakovorotnyi O.Yu., Klochko O.O., Riabchenko S.V. Perspektiva doslidzhennia protsesu shvydkisnogo abrazyvnoho zubofrezeruvannia tsylyndr ychnykh zubchatykh koles // Suchasni pytannia vyrobnytstva ta remontu v promyslovosti i na transporti: Materialy Mizhnarodnoho naukovy-tekhnichnoho seminaru, 26–27 bereznia 2024 r. – Kyiv: ATM Ukrainy, 2024. – S. 24–25.
 8. Gasanov M.I., Klochko A.A., Cherkashyna G.I., Perminov E.I. Gruppovye marshrutnye tekhnologicheskie protsessy vosstanovleniia krupnogabaritnykh zubchatykh koles na osnove imitatsionnogo modelirovaniia s uchetom progressiruiushchikh vidov iznosa // Nadiinist instrumentu ta optymizatsiia tekhnologichnykh system: zb. nauk. pr. – Kramatorsk: DDMA, 2018. – Vyp. 42. – S. 28–36.
 9. Gasanov M.I., Klochko O.O., Zakovorotnyi O.Yu., Perminov E.V. Tekhnolohichni rehlyment optymizatsii system vidnovlennia funktsionalnykh vlastyvostei velikohabaritnykh vidkrytykh zubchatykh peredach // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Serii: Tekhnolohii v mashynobuduvanni – Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Techniques in a machine industry: zb. nauk. pr. / Natsionalnyi tekhnichnyi universytet «Kharkivskiy politekhnichnyi instytut». – Kharkiv: NTU «KhPI», 2018. – № 6 (1282). – S. 107–112. ISSN 2079-004X.
 10. Shelkovi A.N., Klochko A.A., Gasanov M.I. Obespechenie ekspluatatsionnykh svoistv zakalenykh zubchatykh koles / A.N. Shelkovi, A.A. Klochko, M.I. Gasanov // Vestnik sovremennykh tekhnologii: sb. nauch. tr. – Sevastopol: FGAVO UO «Sevastopolskii gosudarstvennyi universitet», 2017. – Vyp. 8. – S. 61–70.
 11. Funktsionalnye aspekty imitatsionnogo matematicheskogo modelirovaniia heometriinykh parametrov protsesa zubofrezerovaniia / O.M. Shelkovi, O.O. Klochko, M.I. Gasanov, D.O. Kravchenko, O.O. Antsyferova // Visnyk NTU «KhPI». Serii: Tekhnolohii u mashynobuduvanni. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2017. – № 26 (1248). – S. 66–74. – Bibliogr.: 6 nazv. – ISSN 2079-004X.
 12. Klochko A.A., Gasanov M.I., Basova E.V. Reglyment vyboru i naznacheniiia parametrov stanu poverkhnevoho sharu zakalenykh zubchatykh koles. Visnyk NTU «KhPI». Serii: Tekhnolohii u mashynobuduvanni. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2016. – № 33 (1205). – S. 145–157. – Bibliogr.: 7 nazv. – ISSN 2079-004X.
 13. Klochko O.O., Gasanov M.I., Zakovorotnyi O.Yu., Maiboroda V.S., Okhrimenko O.O., Fedorenko V.S. Tekhnolohichni peredumovy deformatsii i rushennia zrizuiemoho sharu pry shvydkisnomu zubofrezeruvanni zakalenykh tsylyndricheskikh zubchatykh koles na osnovi atomnogo pidkhotu // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Serii: Tekhnolohii v mashynobuduvanni = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry: zb. nauk. pr. / Nats. tekhn. un-t «Kharkiv. politekhn. inst». – Kharkiv: NTU «KhPI», 2022. – № 1 (5). – S. 10–20. – ISSN 2079-004X, DOI: 10.20998/2079-004X.2022.1(5).02
 14. 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.
 15. Gołębski, R., & Ivandic, Z. (2018). Analysis of Modification of Spur Gear Profile. *Tehnicky Vjesnik*, 25(2), 643–648.
 16. Ciavarella, M. (2017). On the significance of asperity models predictions of rough contact with respect to recent alternative theories. *ASME J. Tribol.*, 139, 021402–1–11.
 17. Nezhebovskiy V.V., Derhousov V.M., Permiakov O.A., Klochko O.O., Ustynenko O.V., Riabchenko S.V. Novitni protsesy obrobky zubchatykh koles reduktoriv vuheldobuvnykh kombainiv // Vazheke mashynobuduvannia. Problemy

ta perspektyvy rozvytku. Materialy XX Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii 01–03 veresnia 2022 roku / za zah. red. V.D. Kovalova. – Kramatorsk-Ternopil: DDMA, 2022. – S. 162–163. ISBN 978-617-7889-20-4.

18. Nezhebovskiy V.V., Berezhnyi R.A., Permiakov O.A., Klochko O.O., Riabchenko S.V., Ustyenko O.V. Systemy parametriv stanu robochych poverkhon i toch-nosti rozmiriv tsylindrychkyh zakalenykh zubchatykh koles ochnystoho kombainu UKD200-500 novoho pokolinnia // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Seriya: Tekhnolohii v mashynobuduvanni = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry: zb. nauk. pr. / Nats. tekhn. un-t «Kharkiv. politekhn. inst». – Kharkiv: NTU «KhPI», 2022. – № 2 (6). – S. 7–15. – ISSN 2079-004X, DOI: 10.20998/2079-004X.2022.2(6).02

Надійшла (received) 10.02.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Охріменко Олександр Анатолійович (Okhrimenko Oleksandr Anatoliiovych) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інтегрованих технологій машинобудування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ; пр. Перемоги, 37, Україна; e-mail: alexhobs77@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5446-6987

Заковоротний Олександр Юрійович (Zakovorotnyi Oleksandr Yuriiovych) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри обчислювальної техніки та програмування Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел.: (097) 967-3271; e-mail: arcade@i.ua; ORCID: 0000-0003-4415-838X

Мироненко Євген Васильович (Mironenko Evgen Vasylovych) – декан, доктор технічних наук, професор кафедри комп'ютеризованих мехатронічних систем, інструмент і технології Донбаської державної машинобудівної академії, м. Краматорськ; тел.: (050)-604-4967; e-mail: evgeny.mironenko@dgma.donetsk.ua;

Камчатна-Степанова Катерина Валеріївна (Kamchatna-Stepanova Kateryna Valeriivna) – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри технологій машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, вул. Кирпичова, 2, Україна; e-mail: katerina.ks@i.ua, ORCID: 0000-0001-7825-1238

Клочко Лариса Володимирівна (Klochko Larysa) – методист першої категорії відділу забезпечення якості освітньої діяльності Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, вул. Кирпичова, 2, Україна; тел.: +38096-8295602, e-mail: klochko1971@gmail.com, ORCID: 0009-0006-1488-0709

Глушко Станіслав Сергійович (Hlushko Stanislav) – аспірант кафедри Інтегровані технології машинобудування Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, вул. Кирпичова, 2, Україна; тел.: +380967871482 e-mail: glushko1979@ukr.net, ORCID: 0009-0006-2459-2153;

Пермяков Єгор Олександрович (Permyakov Egor) – аспірант кафедри Інтегровані технології машинобудування Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, вул. Кирпичова, 2, Україна; тел.: e-mail: perm_a@i.ua, ORCID: 0000-0003-2843-6108,

Федоренко Віталій Сергійович (Fedorenko Vitalii) – аспірант кафедри інтегровані технології машинобудування ім. М.Ф.Семка Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: (095) 9159688–e-mail: 19fws98@gmail.com, ORCID: 0009-0006-3781-6144