

УДК 539.3: 539.538: 539.621

DOI: 10.18372/0370-2197.3(84).13845

М. В. ЧЕРНЕЦЬ, М. В. КІНДРАЧУК, А. О. КОРНІЄНКО, М. А. ГЛОВИН

Національний авіаційний університет, Київ

ПРО МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ЗНОШУВАННЯ І ДОВГОВІЧНОСТІ МЕТАЛЕВИХ, МЕТАЛОПОЛІМЕРНИХ ТА ПОЛІМЕРНИХ ЗУБЧАСТИХ ПЕРЕДАЧ

Наведено аналіз стану проблеми з розробкою методів розрахунку зношування і довговічності зубчастих передач з металевими колесами, металоолімерних передач та полімерних передач. Охарактеризовано відомі у літературі методи для зубчастих передач з металевими колесами. Подано базовий авторський метод розрахунку циліндричних передач. Описано чинники впливу, за якими на основі базового методу сформовано модифіковані методи розрахунку зубчастих передач. Це, відповідно, наступні чинники: експлуатаційний – зміна кривин евольвентних профілів зубів внаслідок їх зношування, конструкційний – парність зачеплення зубів, технологічний – корекція зубів, трибологічний – зносостійкість матеріалів. Зазначено, що за розробленими методами проведено прогнозну оцінку контактних тисків, зношування і довговічності циліндричних та конічних прямо- і косо-зубих передач, а також черв'ячних передач з металевих конструкційних матеріалів. Модифікований метод використано для розрахунку циліндричної прямозубої металоолімерної передачі (гібридної передачі) зі сталлюю шестернею і колесом з поліаміду, армованого скляними чи вуглецевими волокнами.

Ключові слова: *зубчасті передачі: з металевих конструкційних матеріалів, металоолімерні, полімерні; методи розрахунку, навантажувальна здатність, зношування, довговічність*

Вступ. Без використання зубчастих передач важко собі уявити екзистенцію сучасної цивілізації. Вони знаходять застосування в усіх сферах діяльності людини. Відповідно вже давніше було вирішено завдання розробки методів розрахунку на контактну і згинну міцність зубів передач з урахуванням усіх геометричних, кінематичних, конструкційних та навантажувальних чинників. Ці методи є стандартизованими і ґрунтовно перевіреними в інженерній практиці при експлуатації різних розроблених видів і модифікацій зубчастих передач: циліндричних, конічних, гіпоїдних з прямими, косими і криволінійними зубами різних профілів; черв'ячних з різними видами черв'яків. Тому поверхнєве руйнування зубів внаслідок викришування їх робочих профілів під дією контактних тисків чи їх об'ємне руйнування внаслідок злому під впливом згинних напружень може трапитись в обмежених випадках при порушенні умов експлуатації чи з передбачених причин.

Як відомо при експлуатації зубчастих передач під впливом сил тертя, що діють у зачепленні при передачі крутного моменту, неминує виникає зношування зубів. Власне саме зношування і є тим практичним критерієм, який визначає тривалість життя, тобто довговічності зубчастих передач. Слід, однак, зазначити, що, незважаючи на очевидну необхідність на стадії проектування проведення прогнозного розрахунку довговічності передач за критерієм допустимого лінійного зношування зубів, ще не розроблено ефективних і надійних методів розрахунку.

У літературі відомо декілька розрахункових методів такого виду. У 70 – 80 – их роках минулого століття у СРСР цьому питанню були присвячені роботи Дроздова Ю.Н. [1 – 3], Пронікова А.С. [4], Гриба В.В. [5] стосовно розрахунку

циліндричних передач. Продовження цих досліджень іншими дослідниками у країнах колишнього СРСР немає. З кінця 90 – их років у світі розробкою таких методів для розрахунку певних видів зубчастих передач займалися декілька груп вчених. Зокрема це Bajpai P., Kahraman A., Anderson N.E. [6], Brauer J., Andersson S. [7], Flodin A., Andersson S. [9 – 12], Kahraman A., Bajpai P., Anderson N.E. [13], Kolivand M., Kahraman A. [14], Mao K. [15], Pasta A., Mariotti Virzi G. [16], Wu S., Cheng H.S. [17].

При розрахунку евольвентних зубчастих передач різних видів в усіх перелічених спрощених розрахункових методах оцінки зношування зубів в зачепленні використовується закон абразивного зношування Архарда. Згідно нього швидкість зношування лінійно залежить від шляху тертя і контактного тиску, чого, як правило немає, немає навіть при сухому терті. У закритих зубчастих передачах, де наявне мащення, абразивне зношування не виникає і внаслідок цього використання цих методів є необґрунтованим. Окрім того і інші фактори, які не враховані у цих методах і про які буде мова нижче, унеможливають їх використання в інженерній практиці. Навіть у відкритих зубчастих передачах теж нечасто зустрічається абразивне зношування, бо за наявності абразивного середовища передача швидко втрачає працездатність.

Загальна характеристика авторських методів. У зв'язку з недоліками і обмеженнями у спрощених методах розрахунку зубчастих передач, розроблених різними авторами, щодо дійсних умов трибоконтактної взаємодії у зачепленні, починаючи з 2001 року, було розпочато дослідження по розробленню нових розрахункових методів, що враховують усі особливості трибоконтактної взаємодії зубів. У результаті багаторічних досліджень такі методи розроблено для циліндричних та конічних прямо- і косозубих передач, а також черв'ячних передач. Вони базуються на відомій у літературі авторській методології дослідження кінетики зношування при терті ковзання, як процесі поверхневого фрикційно – втомного руйнування матеріалів [18]. В основу математичної моделі процесу, яка описує кінетику зношування, покладено, що швидкість (інтенсивність) зношування є функцією питомої сили тертя у фрикційному контакті. Ця гіпотеза зайшла своє підтвердження не лише у авторській методології, а й у численних працях інших дослідників. За результатами численних модельних трибоекспериментальних досліджень було встановлено, що швидкість (інтенсивність) зношування нелінійно залежить від питомої сили тертя.

Попередньо зазначалось, що згідно закону абразивного зношування Архарда швидкість зношування лінійно залежить від шляху тертя і контактного тиску. У авторській методології, яка була апробована при різних видах тертя: сухого, граничного та абразивного зношування різного виду, гідроабразивного зношування пульпою залізородного концентрату не спостерігалась лінійна залежність не лише від шляху тертя і контактного тиску, а й від питомих сил тертя, які встановлюються згідно закону Кулона. Використання у моделях оцінки зношування матеріалів контактного тиску, як чинника навантаження фрикційного контакту, жодним чином не відображає умов трибоконтактної взаємодії у трибосистемі ковзання. Бо при незмінному контактному тиску, але при різних коефіцієнтах тертя ковзання, що виникає при сухому, напівсухому, змішаному терті, абразивному зношуванні, граничному чи рідинному терті, швидкість зношування може відрізнитися дуже суттєво (навіть до 10 порядків).

Наприклад, якщо завантажити санки постійним вантажем і переміщати їх по поверхнях з різним станом: по льоді, при ожеледиці, по снігу, по вологому ґрунті, по сухому ґрунті, по сухому бетоні, по сухому асфальті, то орієнтовно

коефіцієнти тертя ковзання будуть – 0.015; 0.1; 0.25; 0.4; 0.6; 0.8; 1.0. Відповідно і зношування полів при переміщенні санок буде суттєво різним.

Базовий метод розрахунку зубчастих передач з металевими колесами. Як уже зазначалось у розроблених авторських методах силовим чинником, що спричиняє зношування матеріалів трибопари, є питома сила тертя τ , яка виникає в області фрикційного контакту при взаємному переміщенні елементів трибосистеми при дії на них зовнішнього навантаження. Найпростішим і загально використовуваним у трибології співвідношенням для її визначення є закон Амонтона–Кулона

$$\tau = fp, \quad (1)$$

де f – коефіцієнт тертя ковзання, який визначається експериментально; p – контактний тиск, для визначення величини якого використовуються у загальному випадку методи теорії пружності.

У випадку зубчастих передач для визначення величини максимальних контактних тисків p_{max} і ширини $2b$ площадки контакту використовують відомі формули Герца

$$p_{jmax}^{(w)} = 0.564 \sqrt{N'\theta/\rho_j}, \quad 2b_j^{(w)} = 2.256 \sqrt{\theta N'\rho_j}, \quad (2)$$

де $N' = N/lw$; $N = 9550P/r_1 n_1 \cos \alpha$ – сила, що виникає у зачепленні; $j = 1, 2, 3, \dots$ – точки контакту на робочих поверхнях зубів; P – передавана потужність; r_1 – радіус діляльного кола шестерні; n_1 – частота обертання ведучого вала; l – сумарна довжина ліній контакту; w – кількість пар зачеплень зубів; $\theta = (1 - \nu_1^2)/E_1 + (1 - \nu_2^2)/E_2$; E, ν – модулі Юнга та коефіцієнти Пуасона мате-

ріалів зубчастих коліс; $\rho_j = \frac{\rho_{1j}\rho_{2j}}{\rho_{1j} + \rho_{2j}}$ – зведений радіус кривини профілів зубів у

нормальному перерізі; ρ_{1j}, ρ_{2j} – радіуси кривини профілю зубів шестерні і колеса, які обчислюються за відомими формулами для кожного виду зубчастих передач [19; 51].

Згідно моделі зношування [19], загальний вираз для функції лінійного зношування зубів

$$h_k = \frac{v t_k}{C_k} \left(\frac{\tau}{\tau_S} \right)^{m_k}, \quad (3)$$

де C_k, m_k – характеристики зносостійкості матеріалів трибопари для вибраних умов; $\tau_S = 0.35\sigma_B$ – границя міцності матеріалів на зріз; σ_B – границя міцності матеріалів при розтязі.

У випадку зубчастих передач одиничне лінійне зношування h'_{kj} зубів в j -ій точці контакту їх бокової поверхні протягом змінного відрізка часу t'_j при однопарному зачепленні буде

$$h'_{kj} = \frac{v_j t'_j \left(fp_{jmax}^{(w)} \right)^{m_k}}{C_k (0.35\sigma_B)^{m_k}}, \quad (4)$$

де v_j – швидкість ковзання; $k = 1, 2$ – нумерація коліс (1 – шестерня, 2 – зубчасте колесо); p_{jmax} – максимальний контактний тиск у j -ій точці в однопарному за-

чепленні; C_k , m_k – характеристики зносостійкості матеріалів трибопари для вибраних умов.

Час трибоконтактної взаємодії (зношування) зубів

$$t'_j = 2b_j / v_0, \quad (5)$$

де $v_0 = \omega_1 r_1 \sin \alpha$ – швидкість переміщення точки контакту по бічній поверхні зуба; ω_1 – кутова швидкість шестерні; $\alpha = 20^\circ$ – кут зачеплення.

Швидкість ковзання обчислюється за формулою

$$v_j = e_j (\omega_1 + \omega_2), \quad (6)$$

де $e_j = r_2 \left[\sqrt{(r_{2j} / r_1)^2 - \cos^2 \alpha} - \sin \alpha \right]$ [23]; r_2 – радіус ділительного кола колеса;

$\omega_2 = \omega_1 / u$ – кутова швидкість зубчастого колеса; u – передаточне відношення передачі.

При допустимому зношуванні h_{k*} зубів довговічність t_* передачі за вихідних умов контактної взаємодії зубів буде:

$$t_* = h_{k*} / \bar{h}_{kj}, \quad (7)$$

де $\bar{h}_{kj} = 60n_k h'_{kj}$ – лінійне зношування зубів у вибраних точках j на боковій поверхні протягом однієї години роботи передачі; $n_2 = n_1 / u$ – частота обертання веденого вала.

Модифіковані методи розрахунку зубчастих передач. На основі базового методу сформовано різнофакторні модифіковані (розширені) методи розрахунку зубчастих передач, що відповідним чином враховують нижчезказані чинники впливу.

Вплив зношування зубів (експлуатаційний чинник – Е). Оскільки під час експлуатації зубчастих передач відбувається зношування зубів розроблено методи, де враховано вплив зміни радіусів кривини евольвентних профілів зубів на параметри контакту та трибоконтакту. Відповідно ця зміна профілю зубів призводить до зменшення лінійного зношування, контактних тисків та підвищення довговічності передачі. У літературі відсутні методики врахування впливу зношування на максимальні контактні тиски p_{jmax} , сумарне зношування h_{kj} зубів, довговічність t_* передачі.

Вплив парності зачеплення зубів (конструкційний чинник – К). Також у цих методах враховуються умови зачеплення зубів, тобто парність w зачеплення, і відповідно її вплив на p_{jmax} , h_{kj} , t_* . Парність зачеплення залежить від низки геометричних розмірів передачі, кута нахилу зубів, модуля зачеплення. Відомо, що у зубчастих передачах крім найпростішого дво – одно – двопарного зачеплення можливе три – дво – трипарне, а, навіть, чотири – три – чотирипарне. У літературі відсутні методики врахування впливу w на p_{jmax} , h_{kj} , t_* .

Вплив коригування зубів (технологічний чинник – Т). При виготовленні зубчастих передач широко використовується кутове та висотне коригування зачеплення, яке, як на загал відомо з практики, призводить до зниження контактних тисків та зношування зубів, підвищення довговічності передачі. Метод дозволяє визначити оптимальні величини коефіцієнтів корекції на досягнення найменшого зношування і найбільшої довговічності. Однак у літературі у наяв-

них методах розрахунку зубчастих передач не враховується вплив цього важливого технологічного чинника на $p_{j\max}$, h_{kj} , t_* .

Зносостійкість матеріалів (трибологічний чинник – 3). У розробленій методології дослідження кінетики зношування при терті ковзання у математичній моделі зношування використовуються характеристики зносостійкості C_k , m_k матеріалів у трибопарі для вибраних умов роботи. Для їх встановлення використовуються результати модельних трибоекспериментальних досліджень трибопар в достатньо широкому діапазоні питомих сил тертя. Така методика дозволяє апроксимувати певного виду функцію дані експериментальних досліджень в певному їх діапазоні зміни з можливістю визначення C_k , m_k . Це дуже практично важлива обставина, бо умови трибоконтракту, як правило, є змінними підчас експлуатації триботехнічних систем, зокрема у зубчастих передачах. Такий підхід практично не реалізується в існуючих експериментальних методиках.

Отже у найбільш загальному випадку у інтегрованому розрахунковому методі можливо врахувати усі вказані чинники і провести кількісну оцінку їх сумарного впливу на важливі для інженерної практики контактні та триботехнічні параметри.

Розрахункові методи та результати прогнозу оцінки зношування зубів і довговічності зубчастих передач згідно різних модифікацій розроблених методів наведено у працях:

- а) циліндричні прямо- і косозубі [19 – 36 та ін.],
- б) конічні прямо- і косозубі [37 – 44 та ін.].

Також цю ж методологію дослідження використано для розроблення методів розрахунку черв'ячних передач з Архімедовим та евольвентним черв'яками. Розрахункові методи та результати прогнозу оцінки зношування зубів і довговічності черв'ячних передач згідно різних модифікацій розроблених методів наведено у працях [48 – 55 та ін.].

Слід зазначити, що у літературі є лише окремі праці, де розроблено такі методи розрахунку з використанням модифікованого закону абразивного зношування [45; 46], яке є недопустимим у цих передачах. У [47] подано метод напівемпіричного розрахунку.

Метод розрахунку металополімерних (гібридних) зубчастих передач. Металополімерні зубчасті передачі знаходять досить широке застосування в машинобудуванні, приладобудуванні та інших галузях. Однак слід зазначити, що методи розрахунку зношування і ресурсу металополімерних передач з колесами з армованих полімерних матеріалів, в літературі практично відсутні. Тільки в роботі [56] з використанням методу [2], що передбачає лінійну залежність зношування від шляху тертя згідно закону абразивного зношування, частково проведено дослідження цієї проблеми на прикладі циліндричної передачі з поліамідним колесом, армованим дисперсійними скляними чи вуглецевими волокнами. Цими ж авторами у [57] проведено певну модифікацію свого спрощеного методу.

Особливістю експлуатації металополімерних зубчастих передач є робота, як правило, в умовах сухого тертя. Проте абразивне зношування не є характерним для металополімерних передач. Найявні у літературні дані експериментальних досліджень зношування свідчать, що для більшості полімерів і композицій на їх основі реалізується втомний механізм зношування.

Ще більш значимою особливістю металополімерних передач є суттєва різниця величини модуля пружності Юнга металевого і полімерного композитного колеса,

яка сягає 40 ... 50 разів у залежності від виду полімерної матриці і армуючого наповнювача. У передачах з металевими колесами це відношення не перевищує 2-х разів. Тобто у металополімерних зубчастих передачах є іншими умови контактної взаємодії зубів у зачепленні та, відповідно, кінетика їх зношування.

З використанням вище поданих методів було проведено розрахунок циліндричної прямозубої металополімерної передачі. Вказані особливості складу і будови було досліджено і оцінено їх вплив на прикладі передачі зі сталлюю шестернею і колесом з поліаміду, армованого скляними чи вуглецевими волокнами. Також у наступному досліджено вплив коригування зубів коліс на розрахункові параметри – $p_{j\max}$, h_{kj} , t_* . На черзі проведення детальніших досліджень з метою використання методів розрахунку інших видів передач з металевими колесами для таких же металополімерних передач – циліндричних косозубих та конічних.

Оскільки гама полімерних матеріалів, що знаходять застосування для виготовлення металополімерних передач, неухильно зростає, то розроблювані нами модифіковані методи забезпечують проведення на етапі їх проектування обґрунтованої прогностичної оцінки навантажувальної здатності та триботехнічних характеристик при використанні різних видів зміцнених композитів з урахуванням усього комплексу вказаних чинників впливу (E , K , T , 3).

Результати досліджень зношування і довговічності металополімерних зубчастих передач опубліковано у [58, 59].

Щодо металополімерних черв'ячних передач, то тут відсутні розрахункові методи оцінки зношування чи ресурсу. Також неприйнятним є режим абразивного зношування в умовах сухого тертя при значно вищих коефіцієнтах тертя ковзання, ніж у металевих передачах.

Зубчасті передачі з полімерними колесами. Поряд із активним зростанням застосування металополімерних передач, подібна тенденція спостерігається і з полімерними передачами для малонавантажених механізмів чи пристроїв найрізноманітнішого призначення. Однак поки що не було щонайменшої спроби розробити нові чи трансформувати існуючі методи розрахунку їх зношування і довговічності. Нами розглядається можливість зайнятися цією технічною проблемою.

Слід відзначити, порівняльна оцінка зносостійкості матеріалів, в т.ч. і для металополімерних та полімерних зубчастих передач, у різних трибопарах за результатами експериментальних досліджень, не дозволяє оцінити довговічність передач. Це зумовлено тим, що в експериментальних дослідженнях жодним чином не враховуються характеристики пружності матеріалів (модуль Юнга, коефіцієнт Пуасона) трибопари. Це спостерігається не лише у силових схемах з плоским контактом, а й з криволінійним контактом. Натомість при розв'язку трибоконтактних задач, зокрема і у зубчастих передачах, ці характеристики, зокрема модуль Юнга, мають значний вплив на параметри контакту. Зокрема у [58, 59] було показано, що відношення розрахованих довговічностей двох металополімерних передач – з колесом з поліаміду з вуглеволокнами і поліаміду зі скловолокнами, було більш ніж удвічі більше, ніж відношення характеристик їх зносостійкості.

Висновок. З використанням вищевказаних розроблених розрахункових методів для передач з металевими колесами у металополімерних і полімерних зубчастих передачах є можливою ефективною і науково - обґрунтованою оцінкою навантажувальної здатності за критерієм максимальних контактних тисків у зачепленні, лінійного зношування зубів вздовж робочого профілю за критерієм

нормативного терміну експлуатації чи, обернено, довговічності передач за критерієм допустимого зношування зубів. При цьому враховуватиметься увесь комплекс вказаних реальних чинників впливу (**Е, К, Т, З**).

Список літератури

1. Дроздов Ю.Н. К расчету зубчатых передач на износ // *Машиноведение*. - 1969. - № 2. - С. 84 - 88.
2. Дроздов Ю. Н. К разработке методики расчета на изнашивание и моделирование трения // *Износостойкость*. - М.: Наука, 1975. - С. 120–135.
3. Дроздов Ю.Н., Нажесткин Б.П. Развитие методов расчета на износ зубчатых колес // *Вестник машиностроения*. - 1990. - № 11. - С. 15 – 17.
4. Проников А. С. Надежность машин. – М.: Машиностроение, 1978. – 590 с.
5. Гриб В. В. Решение триботехнических задач численными методами. – М.: Наука, 1982. –115 с.
6. Bajraj P., Kahraman A., Anderson N.E. A surface wear prediction methodology for parallel-axis gear pairs // *J. Tribology*. – 2004. – Vol. 126. – P. 597 – 605.
7. Brauer J., Andersson S. Simulation of wear in gears with flank interference – a mixed FE and analytical approach // *Wear*. – 2003. - № 254. – P. 1216-1232.
8. Flodin A. Wear of spur and helical gears. Dissertations and Theses, UMJ Dissertations Publishing, 2000, 103 p.
9. Flodin A., Andersson S. Simulation of mild wear in spur gears // *Wear*. - 1997. - № 207 (1-2). – P. 16-23.
10. Flodin A., Andersson S. Wear simulation of spur gears // *Tribotest J*. – 1999. - № 5 (3). – P. 225-250.
11. Flodin A., Andersson S. Simulation of mild wear in helical gears // *Wear*. - 2000. - № 241 (2). – P. 123-128.
12. Flodin A., Andersson S. A simplified model for wear prediction in helical gears // *Wear*. –2001. –№ 249 (3-4). – P. 285-292.
13. Kahraman A., Bajraj P., Anderson N.E. Influence of tooth profile deviations on helical gear wear // *J. Mech. Des.* – 2005. – Vol. 127, Issue 4. – P. 656-663.
14. Kolivand M., Kahraman A. An ease-off based method for loaded tooth contact analysis of hypoid gears having local and global surface deviations // *J. Mech. Des.* – 2010. – Vol. 132, Issue 7.
15. Mao K. Gear tooth contact analysis and its application in the reduction of fatigue wear // *Wear*. – 2007. – Vol. 262, Issue 11/12. – P. 1281-1288.
16. Pasta A. , Mariotti Virzi G. Finite element method analysis of a spur gear with a corrected profile // *J. Strain Analysis*. – 2007. – Vol.42. – P. 281-292.
17. Wu S., Cheng H.S. Sliding wear calculation in spur gears // *J. Tribology*. – 1993. - № 115. – P. 493-500.
18. Андрейкив А.Е., Чернец М.В. Оценка контактного взаимодействия трущихся деталей машин. – К.: Наук. думка, 1991. – 160 с.
19. Оцінка довговічності, зношування та контактної міцності зубчастих передач / Під заг. ред. М.В.Чернеця. – Дрогобич: Вимір. - 2002. – 128 с.
20. Чернец М.В., Клименко Л.П., Пашечко М.И., Невчас А. Трибомеханика. Триботехника. Триботехнологии. В 3-х томах. Т.1. Механика трибоконтактного взаимодействия при трении скольжения. – Николаев: Изд-во НГТУ им. Петра Могилы. - 2006. – 472 с.
21. Чернец М. В., Келбиньски Ю. Расчетная оценка износа и ресурса косозубых эвольвентных цилиндрических передач // *Проблеми трибології*. – 2004. - № 3. – С. 61 – 70.
22. Чернец М.В., Береза В.В. Метод дослідження впливу коригування зубів на контактну міцність, зношування та довговічність циліндричних евольвентних прямозубих передач // *Проблеми трибології*. – 2010. - №1. – С. 17-25.
23. Чернец М.В., Береза В.В. До питання про закономірності впливу на довговічність і зношування циліндричних евольвентних зубчастих передач їх основних параметрів. Ч.1. Прямозубі передачі // *Проблеми трибології*. – 2010. - № 3. - С. 11-17.

24. Чернець М.В., Береза В.В. До питання про закономірності впливу на довговічність і зношування циліндричних евольвентних зубчастих передач їх основних параметрів. Ч.2. Косозубі передачі // Проблеми трибології. – 2010. - № 4. - С. 65-72.
25. Чернець М.В., Келбінські Ю., Ярема Р.Я. Узагальнений метод оцінки зношування циліндричних евольвентних зубчастих передач // ФХММ. – 2011. – №1. – С. 44 – 49.
26. Чернець М.В., Ярема Р.Я. Узагальнений метод оцінки впливу коригування зубів на ресурс, зношування та контактну міцність циліндричних евольвентних передач // ФХММ. – 2011. – №4. – С. 115 – 121.
27. Чернець М.В., Ярема Р.Я., Чернець Ю.М. Метод оцінки впливу коригування і зношування зубів евольвентної циліндричної передачі на довговічність та міцність. Ч.1. Довговічність та зношування // ФХММ. – 2012. - № 3. – С. 30-39.
28. Чернець М.В., Ярема Р.Я., Чернець Ю.М. Метод оцінки впливу коригування і зношування зубів евольвентної циліндричної передачі на довговічність та міцність. Ч.2. Контактна міцність // ФХММ. – 2012. - № 6. – С. 56-59.
29. Чернець М.В., Чернець Ю.М. Дослідження умов зачеплення зубів циліндричної евольвентної передачі на контактну міцність, зношування і довговічність. Част. 1. Постійні умови взаємодії у некоригованому зачепленні // Проблеми трибології. -2014. -№3. – С. 84 – 92.
30. Чернець М.В., Чернець Ю.М. Дослідження умов зачеплення зубів циліндричної евольвентної передачі на контактну міцність, зношування і довговічність. Част. 2. Постійні умови взаємодії у коригованому зачепленні // Проблеми трибології. -2014. -№4. – С. 6– 15.
31. Чернець М.В., Чернець Ю.М. Дослідження умов зачеплення зубів циліндричної евольвентної передачі на контактну міцність, зношування і довговічність. Част. 3. Змінні умови взаємодії у некоригованому зачепленні // Проблеми трибології. -2014. -№4. – С. 49 – 53.
32. Чернець М.В., Чернець Ю.М. Дослідження умов зачеплення зубів циліндричної евольвентної передачі на контактну міцність, зношування і довговічність. Част. 4. Змінні умови взаємодії у коригованому зачепленні // Проблеми трибології. -2015. -№1. – С. 69 - 76.
33. Чернец М.В., Чернец Ю.М. Оценка прочности, износа и ресурса корригированной цилиндрической зубчатой передачи с учетом условий зацепления зубьев // Трение и износ. – 2016. -№1. – С.89 – 97.
34. Chernets M., Kiełbiński J., Chernets Yu. A study on the impact of teeth meshing conditions and profile correction on the capping capacity, wear and life of a cylindrical gear // Tribologia. - 2016. - No.2. – p.p. 25-43.
35. Чернец М.В., Чернец Ю.М. Метод расчета триботехнических характеристик цилиндрической косозубой тяговой передачи локомотива ВЛ – 10 // Трение и износ. – 2016. -№6. – С.728 – 736.
36. Chernets M., Chernets Ju. The simulation of influence of engagement conditions and technological teeth correction on contact strength, wear and durability of cylindrical spur gear of electric locomotive // Proc. JMechE. Part J: Journal of Engineering Tribology. – 2017. - No 1. - Vol. 231. –p.p.57 – 62.
37. Чернець М.В., Береза В.В., Чернець Ю.М. Оцінка впливу параметрів конічних евольвентних передач на їх довговічність та зношування. Ч. 1. Прямозубі передачі // Проблеми трибології. – 2011. - №1. – С. 12 – 18.
38. Чернець М.В., Береза В.В., Чернець Ю.М. Оцінка впливу параметрів конічних евольвентних передач на їх довговічність та зношування. Ч. 2. Косозубі передачі // Проблеми трибології. – 2011. – №2. – С. 6 – 12.
39. Чернець М.В., Береза В.В., Чернець Ю.М. Дослідження навантажувальної здатності, зношування і довговічності конічних косозубих евольвентних передач при двопарному зачепленні. – Ч. 1. Вплив модуля зачеплення // Проблеми трибології. – 2011. – №3. – С. 18 – 23.
40. Чернець М.В., Береза В.В., Чернець Ю.М. Дослідження навантажувальної здатності, зношування і довговічності конічних косозубих евольвентних передач при двопарному зачепленні. – Ч. 2. Вплив передавального відношення // Проблеми трибології. – 2011. – №4. – С. 6 – 11.
41. Чернець М.В., Чернець Ю.М. До питання оцінки умов взаємодії зубів у конічній передачі на контактні параметри та триботехнічні характеристики. Част. 1. Прямозуба передача // Проблеми трибології. -2015. -№3. – С. 23 - 28 .

42. Чернець М.В., Чернець Ю.М. До питання оцінки умов взаємодії зубів у конічній передачі на контактні параметри та триботехнічні характеристики. Част. 2. Косозуба передача // Проблеми трибології. -2015. -№3. – С. 29 - 35.

43. Chernets M. A generalized method for predicting contact strength, wear and life of involute conical spur and helical gears: Part 1. Spur gears // Tribologia. – 2018. - №1. -p.p. 11-18.

44. Chernets M. A generalized method for predicting contact strength, wear and life of involute conical spur and helical gears: Part 2. Helical gears // Tribologia. – 2018. - №1. -p.p. 19-23.

45. Sharif K.J., Evans H.P., Snidle R.W., Barnett D., Egorov I.M. Effect of elasto-hydrodynamic film thickness on a wear model for worm gears // Proc.ImechE. Part J: Journal of Engineering Tribology. - 2006. - Vol. 220. - p.p. 295 – 306.

46. Sharif K.J., Evans H.P., Snidle R.W. Prediction of the wear pattern in worm gears // Wear. - 2006.- Vol. 261. - p.p. 666 – 673.

47. Sabiniaк H. G. . Wear and life of the worm gears. Publishing House of Lodz University of Technology. Lodz, 2007.

48. Чернець М.В., Береза В.В. Метод дослідження кінетики зношування черв'ячної передачі з архімедовим черв'яком // Машинознавство. – 2009. - №6. – С.18-23.

49. Czerniec M., Kielbinski I. Metoda badania zuzywania przekladni ślimakowej ze ślimakiem Archimedesа // Tribologia. - 2009. -№3. – S. 31-40.

50. Czerniec M., Kielbiński J. Metoda obliczeniowa trwałości przekładni ślimakowej ze ślimakiem ewolwentowym // Tribologia. - 2010. - №6. – S. 37-46.

51. Чернець М.В., Ярема Р.Я. Прогнозування довговічності черв'ячних передач з архімедовим та евольвентним черв'яком // Проблеми трибології. – 2011. – №2. – С. 21 – 25.

52. Чернець М.В., Чернець Ю.М. Метод оцінки впливу зношування зубів черв'ячної передачі з евольвентним черв'яком на несучу здатність і довговічність // Проблеми трибології. – 2012. - № 3. – С. 58-62.

53. Czerniec M., Kielbiński J. Metoda obliczeniowa trwałości przekładni ślimakowej ze ślimakiem ewolwentowym // Tribologia. – 2013. - №2. – S. 16 – 23.

54. Czerniec M., Kielbiński J., Czerniec J. The effect of teeth correction in an Archimedes worm gear on the contact strenght, wear, and life of the worm gear teeth. // Tribologia. – 2017. - Nr.1. - p.p. 31 - 34.

55. Chernets M. A Method for predicting Contact Strenght and Life of Archimedes and Involute Worm Gears, Considering the Effect of Wear and Teeth Correction // Tribology in Industry. -2019. -№1. – P. 134 - 141.

56. Шилько С.В., Старжинский В.Е. Расчет износостойкости зубчастой передачи с колесами из армированных композиционных материалов // Трение и износ. – 1993 (13). - №3. – С. 444 – 451.

57. Шилько С.В., Старжинский В.Е., Петроковец Е.М., Черноус Д.А. Двухуровневый метод расчета трибосопряжений из дисперсно – армированных композитов. Часть 1 // Трение и износ. – 2013 (34). - №1. – С. 82 – 86.

58. Chernets M.V., Shil'ko S.V., Pashechko M.I., and Barshch M. Wear resistance of glass- and carbon-filled polyamide composites for metal-polymer gears // Journal of Friction and Wear. – 2018. -No. 5. - Vol. 39. - p.p. 361 – 364.

59. Chernets M., Shil'ko S., Pashechko M. Study of wear resistance of reinforced polyamide composites for metal-polymer gear drives // Tribologia/ - 2018. - №3. - p.p. 19 – 23.

Стаття надійшла до редакції 16.09.2019.

Чернець Мирон Васильович – д-р техн. наук, професор, с. н. с. Національного авіаційного університету, myron.czerniec@gmail.com

Кіндрачук Мирослав Васильович – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри машинознавства Національного авіаційного університету, kindrachuk@ukr.net

Корнієнко Анатолій Олександрович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри машинознавства Національного авіаційного університету

Гловин Михайло Андрійович — студент Національного авіаційного університету, Київ, Україна.

M. CHERNETS, M. KINDRACHUK, A. KORNIENKO, M. GLOVIN

ABOUT METHODS OF CALCULATION OF WEAR AND DURABILITY OF METAL, METAL-POLYMER AND POLYMER GEARS

The analysis of the state of the problem with the development of wear and durability calculation methods of metal, metal-polymer and polymer gears is presented. Known methods in the literature are characterized for gears with metal wheels. The basic author's method of calculating cylindrical gears has been provided. Impact factors were described by which modified gear calculation methods were formed based on the basic method. These are the following factors: operational - change in the curves of involute teeth profiles due to their wear, structural - parity of the teeth, technological - correction of teeth, tribological - wear resistance of materials. According to the developed methods, the estimation of contact pressures, wear and durability of spur and bevel straight and helical gears, worm gears made of metal structural materials was carried out. The modified method was used to calculate a spur straight-tooth metal-polymer transmission (hybrid transmission) with steel gear and a glass or carbon fiber reinforced polyamide wheel.

Key words: gears: made of metal structural materials, metal-polymeric, polymeric; calculation methods, load capacity, wear, durability

References

1. Drozdov Ju.N. K raschetu zubchatyh peredach na iznos // Mashinovedenie. - 1969. - № 2. - S. 84 - 88.
2. Drozdov Ju. N. K razrabotke metodiki rascheta na iznashivanie i modelirovanie trenija // Iznosostojkost'. - M.: Nauka, 1975. - S. 120-135.
3. Drozdov Ju.N., Nazhestkin B.P. Razvitie metodov rascheta na iznos zubchatyh ko-les // Vestnik mashinostroenija. - 1990. - № 11. - S. 15 - 17.
4. Pronikov A. S. Nadezhnost' mashin. - M.: Mashinostroenie, 1978. - 590 s.
5. Grib V. V. Reshenie tribotekhnicheskikh zadach chislennymi metodami. - M.: Nauka, 1982. - 115 s.
6. Bajpaj P., Kahraman A., Anderson N.E. A surface wear prediction methodology for parallel-axis gear pairs // J. Tribology. - 2004. - Vol. 126. - P. 597 - 605.
7. Brauer J., Andersson S. Simulation of wear in gears with flank interference - a mixed FE and analytical approach // Wear. - 2003. - № 254. - P. 1216-1232.
8. Flodin A. Wear of spur and helical gears. Dissertations and Theses, UMJ Dissertations Publishing, 2000, 103 p.
9. Flodin A., Andersson S. Simulation of mild wear in spur gears // Wear. - 1997. - № 207 (1-2). - P. 16-23.
10. Flodin A., Andersson S. Wear simulation of spur gears // Tribotest J. - 1999. - № 5 (3). - P. 225-250.
11. Flodin A., Andersson S. Simulation of mild wear in helical gears // Wear. - 2000. - № 241 (2). - P. 123-128.
12. Flodin A., Andersson S. A simplified model for wear prediction in helical gears // Wear. - 2001. - № 249 (3-4). - P. 285-292.
13. Kahraman A., Bajpaj P., Anderson N.E. Influence of tooth profile deviations on helical gear wear // J. Mech. Des. - 2005. - Vol. 127, Issue 4. - P. 656-663.
14. Kolivand M., Kahraman A. An ease-off based method for loaded tooth contact analysis of hypoid gears having local and global surface deviations // J. Mech. Des. - 2010. - Vol. 132, Issue 7.
15. Mao K. Gear tooth contact analysis and its application in the reduction of fatigue wear // Wear. - 2007. - Vol. 262, Issue 11/12. - P. 1281-1288.
16. Pasta A., Mariotti Virzi G. Finite element method analysis of a spur gear with a corrected profile // J. Strain Analysis. - 2007. - Vol. 42. - P. 281-292.
17. Wu S., Cheng H.S. Sliding wear calculation in spur gears // J. Tribology. - 1993. - № 115. - P. 493-500.
18. Andrejkiv A.E., Chernec M.V. Ocenka kontaktnogo vzaimodejstviya trushhihsja detalej mashin. - K.: Nauk. dumka, 1991. - 160 s.

19. Otsinka dovhovichnosti, znoshuvannia ta kontaktnoi mitsnosti zubchastykh peredach / Pid zah. red. M.V.Chernetsia. – Drohobych: Vymir. - 2002. – 128 s.
20. Chernec M.V., Klimenko L.P., Pashechko M.I., Nevchas A. Tribomehanika. Tribotekhnika. Tribotekhnologii. V 3-h tomah. T.1. Mehanika tribokontaktynogo vzaimodejstvija pri trenii skol'zhenija. – Nikolaev: Izd-vo NGGU im. Petra Mogily. - 2006. – 472 s.
21. Chernec M. V., Kelbin'ski Ju. Raschetnaja ocenka iznosa i resursa kosozubnyh jevol'ventnykh cilindricheskih peredach // Problemi tribologii. – 2004. - № 3. – S. 61 – 70.
22. Chernets M.V., Bereza V.V. Metod doslidzhennia vplyvu koryhuvannia zubiv na kontaktnu mitsnist, znoshuvannia ta dovhovichnist tsylindrychnykh evolventnykh priamozubnykh peredach // Problemy trybolohii. – 2010. - №1. – S. 17-25.
23. Chernets M.V., Bereza V.V. Do pytannia pro zakonornosti vplyvu na dovhovichnist i znoshuvannia tsylindrychnykh evolventnykh zubchastykh peredach yikh osnovnykh paramet-riv. Ch.1. Priamozubi peredachi // Problemy trybolohii. – 2010. - № 3. - S. 11-17.
24. Chernets M.V., Bereza V.V. Do pytannia pro zakonornosti vplyvu na dovhovichnist i znoshuvannia tsylindrychnykh evolventnykh zubchastykh peredach yikh osnovnykh paramet-riv. Ch.2. Kosozubi peredachi // Problemy trybolohii. – 2010. - № 4. - S. 65-72.
25. Chernets M.V., Kelbinski Yu., Yarema R.Ia. Uzahalnenyi metod otsinky znoshuvannia tsylindrychnykh evolventnykh zubchastykh peredach // FKHM. – 2011. – №1. – S. 44 – 49.
26. Chernets M.V., Yarema R.Ia. Uzahalnenyi metod otsinky vplyvu koryhuvannia zubiv na resurs, znoshuvannia ta kontaktnu mitsnist tsylindrychnykh evolventnykh peredach // FKHM. – 2011. – №4. – S. 115 – 121.
27. Chernets M.V., Yarema R.Ia., Chernets Yu.M. Metod otsinky vplyvu koryhuvannia i znoshuvannia zubiv evolventnoi tsylindrychnoi peredachi na dovhovichnist ta mitsnist. Ch.1. Dohovichnist ta znoshuvannia // FKHM. – 2012. - № 3. – S. 30-39.
28. Chernets M.V., Yarema R.Ia., Chernets Yu.M. Metod otsinky vplyvu koryhuvannia i znoshuvannia zubiv evolventnoi tsylindrychnoi peredachi na dovhovichnist ta mitsnist. Ch.2. Kontaktna mitsnist // FKHM. – 2012. - № 6. – S. 56-59.
29. Chernets M.V., Chernets Yu.M. Doslidzhennia umov zacheplennia zubiv tsylindrychnoi evolventnoi peredachi na kontaktnu mitsnist, znoshuvannia i dovhovichnist. Chast. 1. Postiini umovy vzaiemodii u nekoryhovanomu zacheplenni // Problemy trybolohii. -2014. -№3. – S. 84 – 92.
30. Chernets M.V., Chernets Yu.M. Doslidzhennia umov zacheplennia zubiv tsylindrychnoi evolventnoi peredachi na kontaktnu mitsnist, znoshuvannia i dovhovichnist. Chast. 2. Postiini umovy vzaiemodii u koryhovanomu zacheplenni // Problemy trybolohii. -2014. -№4. – S. 6– 15.
31. Chernets M.V., Chernets Yu.M. Doslidzhennia umov zacheplennia zubiv tsylindrychnoi evolventnoi peredachi na kontaktnu mitsnist, znoshuvannia i dovhovichnist. Chast. 3. Zminni umovy vzaiemodii u nekoryhovanomu zacheplenni // Problemy trybolohii. -2014. -№4. – S. 49 – 53.
32. Chernets M.V., Chernets Yu.M. Doslidzhennia umov zacheplennia zubiv tsylindrychnoi evolventnoi peredachi na kontaktnu mitsnist, znoshuvannia i dovhovichnist. Chast. 4. Zminni umovy vzaiemodii u koryhovanomu zacheplenni // Problemy trybolohii. -2015. -№1. – S. 69 - 76.
33. Chernec M.V., Chernec Ju.M. Ocenka prochnosti, iznosa i resursa korigirovan-noj cilindricheskoj zubchatoj peredachi s uchetom uslovij zaceplennia zub'ev // Trenie i iznos. – 2016. -№1. – S.89 – 97.
34. Chernets M., Kielbiński J., Chernets Yu. A study on the impact of teeth meshing conditions and profile correction on the capping capacity, wear and life of a cylindrical gear // Tribologia. - 2016. - No.2. – p.p. 25-43.
35. Chernec M.V., Chernec Ju.M. Metod rascheta tribotekhnicheskikh harakteristik cilindricheskoj kosozuboj tjagovoj peredachi lokomotiva VL – 10 // Trenie i iznos. – 2016. -№6. – S.728 – 736.
36. Chernets M., Chernets Ju. The simulation of influence of engagement conditions and technological teeth correction on contact strength, wear and durability of cylindrical spur gear of electric locomotive // Proc. JMechE. Part J: Journal of Engineering Tribology. – 2017. - No 1. - Vol. 231. –p.p.57 – 62.
37. Chernets M.V., Bereza V.V., Chernets Yu.M. Otsinka vplyvu parametriv konichnykh evolventnykh peredach na yikh dovhovichnist ta znoshuvannia. Ch. 1. Priamozubi peredachi // Problemy trybolohii. – 2011. - №1. – S. 12 – 18.
38. Chernets M.V., Bereza V.V., Chernets Yu.M. Otsinka vplyvu parametriv konichnykh evolventnykh peredach na yikh dovhovichnist ta znoshuvannia. Ch. 2. Kosozubi peredachi // Problemy trybolohii. – 2011. – №2. – S. 6 – 12.

39. Chernets M.V., Bereza V.V., Chernets Yu.M. Doslidzhennia navantazhuvalnoi zdatnosti, znoshuvannia i dovhovichnosti konichnykh kosozubykh evolventnykh peredach pry dvoparnomu zacheplenni. – Ch. 1. Vplyv modulua zacheplennia // Problemy trybolohii. – 2011. – №3. – S. 18 – 23.
40. Chernets M.V., Bereza V.V., Chernets Yu.M. Doslidzhennia navantazhuvalnoi zdatnosti, znoshuvannia i dovhovichnosti konichnykh kosozubykh evolventnykh peredach pry dvoparnomu zacheplenni. – Ch. 2. Vplyv peredavalnogo vidnoshennia // Problemy trybolohii. – 2011. – №4. – S. 6 – 11.
41. Chernets M.V., Chernets Yu.M. Do pytannia otsinky umov vzaiemodii zubiv u konichnii peredachi na kontaktni parametry ta trybotekhnichni kharakterystyky. Chast. 1. Priamozuba peredacha // Problemy trybolohii. -2015. -№3. – S. 23 - 28 .
42. Chernets M.V., Chernets Yu.M. Do pytannia otsinky umov vzaiemodii zubiv u konichnii peredachi na kontaktni parametry ta trybotekhnichni kharakterystyky. Chast. 2. Kosozuba peredacha // Problemy trybolohii. -2015. -№3. – S. 29 - 35.
43. Chernets M. A generalized method for predicting contact strength, wear and life of involute conical spur and helical gears: Part 1. Spur gears // Tribologia. – 2018. - №1. -p.p. 11-18.
44. Chernets M. A generalized method for predicting contact strength, wear and life of involute conical spur and helical gears: Part 2. Helical gears // Tribologia. – 2018. - №1. -p.p. 19-23.
45. Sharif K.J., Evans H.P., Snidle R.W., Barnett D., Egorov I.M. Effect of elasto-hydrodynamic film thickness on a wear model for worm gears // Proc.ImechE. Part J: Journal of Engineering Tribology. - 2006. - Vol. 220. -p.p. 295–306.
46. Sharif K.J., Evans H.P., Snidle R.W. Prediction of the wear pattern in worm gears // Wear. - 2006.- Vol. 261. - p.p. 666 – 673.
47. Sabiniak H. G. . Wear and life of the worm gears. Publishing House of Lodz University of Technology: Lodz, 2007.
48. Chernets M.V., Bereza V.V. Metod doslidzhennia kinetyky znoshuvannia cherviachnoi peredachi z arkhimedovym cherviakom // Mashynoznavstvo. – 2009. - №6 . – S.18-23.
49. Czerniec M., Kielbinski I. Metoda badania zuzywania przekladni ślimakowej ze ślimakiem Archimedesza // Tribologia. - 2009. -№3. – S. 31-40.
50. Czerniec M., Kielbiński J. Metoda obliczeniowa trwałości przekładni ślimakowej ze ślimakiem ewolwentowym // Tribologia. - 2010. - №6. – S. 37-46.
51. Chernets M.V., Yarema R.Ia. Prohnozuvannia dovhovichnosti cherviachnykh peredach z arkhimedovym ta evolventnym cherviakom // Problemy trybolohii. – 2011. – №2. – S. 21 – 25.
52. Chernets M.V., Chernets Yu.M. Metod otsinky vplyvu znoshuvannia zubiv cherviachnoi peredachi z evolventnym cherviakom na nesuchu zdatnist i dovhovichnist // Problemy trybolohii. – 2012. - № 3. – S. 58-62.
53. Czerniec M., Kielbiński J. Metoda obliczeniowa trwałości przekładni ślimakowej ze ślimakiem ewolwentowym // Tribologia. – 2013. - №2. – S. 16 – 23.
54. Czerniec M., Kielbiński J., Czerniec J. The effect of teeth correction in an Archimedes worm gear on the contact strength, wear, and life of the worm gear teeth. // Tribologia. – 2017. - Nr.1. - p.p. 31 - 34.
55. Chernets M. A Method for predicting Contact Strength and Life of Archimedes and Involute Worm Gears, Considering the Effect of Wear and Teeth Correction // Tribology in Industry. -2019. -№1. – P. 134 - 141.
56. Shil'ko S.V., Starzhinskij V.E. Raschet iznosostojkosti zubchastoj peredachi s kolesami iz armirovannykh kompozicionnykh materialov // Trenie i iznos. – 1993 (13). - №3. – S. 444 – 451.
57. Shil'ko S.V., Starzhinskij V.E., Petrokovec E.M., Chemous D.A. Dvuhurovnevij metod rascheta tribosopryazhenij iz dispemo – armirovannykh kompozitov. Chast'1 // Trenie i iznos. – 2013 (34). -№1. – S. 82–86.
58. Chernets M.V., Shil'ko S.V., Pashechko M.I., and Barshch M. Wear resistance of glass- and carbon-filled polyamide composites for metal-polymer gears // Journal of Friction and Wear. – 2018. -No. 5. - Vol. 39. - p.p. 361 – 364.
59. Chernets M., Shil'ko S., Pashechko M. Study of wear resistance of reinforced polyamide composites for metal-polymer gear drives // Tribologia/ - 2018. - №3. - p.p. 19 – 23.