

УДК 621.923.77:621.85

Андрій Сеник¹, к.т.н., доц.; Володимир Кобельник¹, к.т.н., доц.; Роман Лещук¹, к.т.н., доц.; Оксана Кобельник², к.т.н.

¹ Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

² Відокремлений структурний підрозділ «Тернопільський фаховий коледж Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя», Україна

ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ПРИВОДНИХ РОЛИКОВИХ ЛАНЦЮГІВ ШЛЯХОМ ФОРМУВАННЯ РЕГУЛЯРНИХ МІКРОРЕЛЬЄФІВ НА ЗГОРТНИХ ВТУЛКАХ МЕТОДОМ ВІБРООБКОЧУВАННЯ

Анотація. У роботі досліджено вплив мікрорельєфу поверхонь згортних втулок приводних ланцюгів на їх трибологічні характеристики та довговічність. Проаналізовано сучасні методи формування регулярних мікроструктур і обґрунтовано доцільність їх застосування. Встановлено, що регуляризація мікрорельєфу дозволяє підвищити зносостійкість та ефективність роботи шарнірних з'єднань.

Ключові слова: мікрорельєф, згортна втулка, приводний роликовий ланцюг, віброобкочування, регуляризація, трибологія.

Andrii Senyk, Volodymyr Kobelnyk, Roman Leshchuk, Oksana Kobelnyk

ENHANCING THE DURABILITY OF STANDARD ROLLER CHAINS BY FORMING REGULAR MICRORELIEFS ON JOINT BUSHINGS USING VIBRO- ROLLING METHOD

Abstract. The paper investigates the influence of the microrelief of the surfaces of the rolling bushings of drive chains on their tribological characteristics and durability. Modern methods of forming regular microstructures are analyzed and the feasibility of their application is substantiated. It is established that the regularization of the microrelief allows to increase the wear resistance and efficiency of the articulated joints.

Keywords: microrelief, rolled bushing, roller chain, vibration burnishing, tribology, wear resistance.

Приводні роликові ланцюги широко застосовуються у транспортних, сільськогосподарських, металургійних, підйомно-транспортних та технологічних машинах завдяки високій надійності, компактності та здатності передавати значні навантаження. Одним із найбільш навантажених елементів ланцюгової передачі є шарнірне з'єднання типу «валик–втулка», у якому реалізуються процеси тертя ковзання, циклічного навантаження та зношування. Саме технічний стан згортної втулки значною мірою визначає ресурс роботи всього привідного ланцюга.

Відомо, що під час експлуатації у зоні контакту валика і втулки виникають високі питомі навантаження, які призводять до розвитку абразивного, адгезійного та втомного зношування. Особливо інтенсивно процеси руйнування проходять у випадку недостатнього змащування або при нерівномірному розподілі контактних напружень по поверхні контакту. Однією з основних причин такого явища є неоднорідність мікрорельєфу поверхонь, сформованого традиційними методами механічної обробки.

Традиційні технології обробки внутрішніх поверхонь згортних втулок, такі як розгортання, шліфування чи хонінгування, забезпечують досягнення заданої шорсткості, однак формують випадковий характер мікронерівностей. У результаті контакт між поверхнями відбувається переважно по окремих мікроступах, що викликає концентрацію контактних напружень та локальні перегріви. Це, у свою чергу, спричиняє порушення умов мащення, появу задирів і прискорене зношування шарнірів.

У працях П.Д. Кривого, С.А. Дубиняка та інших представників наукової школи ТНТУ показано, що одним із найбільш ефективних шляхів підвищення довговічності шарнірів приводних ланцюгів є створення регулярного мікрорельєфу поверхонь згортних втулок. Регулярний мікрорельєф дозволяє керовано формувати геометрію мікронерівностей, створювати сприятливі умови для утримання мастильного матеріалу та забезпечувати більш рівномірний розподіл навантаження по контактній поверхні.

Особливе значення мають дослідження, присвячені формуванню регулярних мікрорельєфів методом віброобкочування. У працях П.Д. Кривого та співавторів доведено, що віброобкочування дозволяє не лише формувати регулярні мікроструктури, а й зміцнювати поверхневий шар за рахунок пластичного деформування. Отриманий при цьому мікрорельєф характеризується високою маслomisткістю, підвищеною мікротвердістю та стабільністю трибологічних параметрів.

Важливий внесок у розвиток технологій керованого формування поверхневих структур здійснено В.О. Дзюрою, у працях якого досліджено закономірності зміцнення поверхневого шару деталей машин та встановлено вплив параметрів мікрогеометрії на експлуатаційні властивості поверхонь тертя.

Актуальність даної роботи полягає у необхідності подальшого розвитку технологічних методів формування регулярних мікрорельєфів саме на згортних втулках приводних роликів ланцюгів із урахуванням особливостей їх роботи, характеру навантаження та умов змащування.

Метою роботи є підвищення довговічності приводних роликів ланцюгів шляхом формування регулярних мікрорельєфів на згортних втулках методом віброобкочування, що забезпечує покращення умов змащення, зниження контактних напружень та підвищення зносостійкості шарнірного з'єднання «валик–втулка».

Мікрорельєф поверхні визначає умови контакту, режим тертя та здатність поверхні утримувати мастильний матеріал. На відміну від випадкової шорсткості, регуляризований мікрорельєф характеризується впорядкованою геометрією мікронерівностей, що дозволяє керувати процесами тертя та зношування [2]. Згідно з дослідженнями [4], оптимізація мікрогеометрії сприяє більш рівномірному розподілу навантаження та зменшенню пікових контактних напружень.

Мікровпадини виконують функцію резервуарів мастила, забезпечуючи перехід від граничного до змішаного режиму тертя, що дозволяє знизити коефіцієнт тертя та інтенсивність зношування [1]. Встановлено, що регулярний мікрорельєф може підвищити ресурс шарнірного з'єднання на 20–40 % [2].

Значний внесок у розвиток технологій формування регулярних мікрорельєфів зробили праці наукової школи ТНТУ під керівництвом П.Д. Кривого. У праці [3] досліджено закономірності утворення регулярних структур методом віброобкочування та встановлено вплив параметрів режиму обробки на відносну площу перекриття мікрорельєфу.

У роботі показано, що одним із найважливіших параметрів регулярного мікрорельєфу є ступінь перекриття, який визначається відношенням віброобкоченої площі до загальної площі поверхні. Встановлено, що підвищення ступеня перекриття забезпечує покращення маслomisткості поверхні, рівномірність розподілу навантаження та зростання зносостійкості контактних поверхонь.

Особливий інтерес для згортних втулок приводних ланцюгів становлять результати, пов'язані з формуванням зигзагоподібного регулярного мікрорельєфу. У статті наведено умови, за яких формується різна геометрія мікрорельєфу залежно від співвідношення кроку канавки tk до її ширини ρ . Встановлено три характерні режими формування структури: при $tk/\rho < 0,5$; $tk/\rho = 0,5$ та $0,5 < tk/\rho \leq 1$.

Саме другий режим забезпечує найбільш рівномірне перекриття поверхні та формування стабільної структури мікронерівностей.

У роботі також запропоновано конструкцію пристрою для формування регулярного мікрорельєфу методом віброобкочування, яка забезпечує стабільність зусилля деформування за рахунок використання гідравлічної системи та пружного навантаження. Принцип дії пристрою базується на поєднанні осциляційного руху віброобкатників і поздовжньої подачі заготовки, що дозволяє отримувати регулярні мікроканавки із заданими параметрами.

Аналіз побудованих авторами графіків показує, що зі збільшенням амплітуди коливань віброобкатника зростає площа поверхні, яка покривається регулярним мікрорельєфом. Іншими словами, чим більшими є коливання деформуючого елемента, тим щільніше мікроканавки перекривають поверхню деталі. При певних режимах обробки ступінь перекриття може наближатися майже до 100%, тобто практично вся поверхня втулки покривається впорядкованим мікрорельєфом.

Для згортних втулок привідних роликів і втулкових ланцюгів це має особливо важливе значення, оскільки сформовані мікроканавки виконують роль мікрорезервуарів для мастильного матеріалу. Завдяки цьому мастило краще утримується у зоні контакту «валик–втулка», зменшується сухе тертя та забезпечується більш рівномірний розподіл навантаження по контактній поверхні. У результаті знижуються контактні напруження, сповільнюється процес зношування та підвищується довговічність шарнірного з'єднання.

Запропоновані у статті математичні моделі дозволяють визначати площу віброобкоченої поверхні залежно від ширини канавки, частоти осциляцій, подачі та амплітуди деформування. Отримані залежності можуть бути адаптовані для оцінки параметрів мікрорельєфу згортних втулок приводних ланцюгів.

Враховуючи специфіку роботи вузла «валик–втулка», застосування регулярного мікрорельєфу із підвищеним ступенем перекриття дозволяє знизити локальні контактні напруження, забезпечити більш стабільний режим мащення та підвищити ресурс роботи шарнірного з'єднання. Крім того, регулярні мікроканавки можуть виконувати функцію мікрорезервуарів для накопичення мастильного матеріалу, що особливо важливо в умовах граничного тертя.

У праці [5] додатково обґрунтовано, що ефективність регулярного мікрорельєфу значною мірою залежить від орієнтації мікроструктури відносно напрямку ковзання.

Орієнтований мікрорельєф забезпечує зниження зсувних напружень та покращує умови формування мастильного клина.

Сучасний розвиток технологій інженерії поверхні дозволяє формувати регулярні мікрорельєфи різними методами, які відрізняються фізичною природою впливу на матеріал, точністю формування структури та технологічною ефективністю.

Найбільш поширеними залишаються методи механічної обробки, зокрема шліфування, хонінгування та полірування. Вони забезпечують необхідний рівень шорсткості та геометричної точності поверхонь, однак не дозволяють формувати впорядковані мікроструктури. Отриманий мікрорельєф має випадковий характер, а напрямок мікронерівностей часто не відповідає напрямку ковзання у зоні контакту.

Більш перспективними є методи поверхневого пластичного деформування. До них належать роликове накатування, алмазне вигладжування, віброобкочування та ультразвукове пластичне деформування. У процесі такої обробки поверхневий шар матеріалу зазнає локальної пластичної деформації без видалення матеріалу. Це дозволяє одночасно формувати регулярний мікрорельєф і зміцнювати поверхневий шар.

Особливий інтерес для згортних втулок приводних ланцюгів становить метод віброобточування, який забезпечує формування регулярних мікроканалок із заданим кроком, глибиною та ступенем перекриття. Як показано у роботах П.Д. Кривого, віброобточування дозволяє формувати мікрорельєфи з високою відносною площею перекриття, що позитивно впливає на утримання мастильного матеріалу та зменшення контактних напружень.

Лазерне текстування є одним із найбільш високоточних способів формування регулярних мікрорельєфів. За допомогою лазерного променя на поверхні можуть формуватися мікроямки, канавки або комбіновані структури з високою точністю розташування. Основною перевагою методу є можливість керування геометрією мікроструктури, однак висока вартість обладнання обмежує його застосування у серійному виробництві приводних ланцюгів.

Електрохімічні методи базуються на локальному розчиненні матеріалу в електроліті. Вони забезпечують високу чистоту поверхні та відсутність механічних пошкоджень, проте мають обмежені можливості керування формою та орієнтацією мікрорельєфу.

Абразивно-струменеві методи дозволяють створювати розвинену мікрошорсткість за рахунок ударної дії абразивних частинок. Такі поверхні характеризуються високою масломісткістю, однак отриманий мікрорельєф має випадковий характер.

Аналіз існуючих технологій свідчить, що найбільш перспективними для згортних втулок приводних роликів ланцюгів є методи поверхневого пластичного деформування, зокрема віброобточування, які забезпечують оптимальне поєднання зміцнення поверхні та формування регулярного мікрорельєфу.

Вибір методу визначається матеріалом, умовами навантаження та режимами змащування. Для згортних втулок зі сталі 40ХН найбільш доцільним є застосування методів пластичного деформування, які забезпечують оптимальне поєднання геометричної регулярності та зміцнення поверхні [4].

Раціональним є формування мікрорельєфу з орієнтацією елементів структури відповідно до напрямку ковзання, що дозволяє мінімізувати зсувні напруження та покращити утримання мастильного матеріалу [2].

Для оцінки умов тертя та ефективності утримання мастильного матеріалу використовується безрозмірний параметр змащування:

$$\lambda = h_{\min} / \sqrt{(R_{a1}^2 + R_{a2}^2)}.$$

де $h_{\min}$ – мінімальна товщина мастильного шару між контактуючими поверхнями;
 R_{a1} та R_{a2} – середні арифметичні відхилення профілю поверхонь валика та втулки.

Даний параметр характеризує режим тертя у шарнірному з'єднанні приводного ланцюга. При $\lambda < 1$ реалізується режим граничного тертя, коли контакт між поверхнями відбувається переважно по вершинах мікронерівностей. У межах $1 < \lambda < 3$ формується змішаний режим тертя, а при $\lambda > 3$ створюються умови гідродинамічного мащення.

Формування регулярного мікрорельєфу сприяє накопиченню мастильного матеріалу у мікроканалках та мікровпадинах, що забезпечує збільшення товщини мастильного шару $h_{\min}$ і покращення умов мащення у зоні контакту.

Для оцінки напруженого стану у зоні контакту «валик–втулка» використовується залежність Герца для максимальних контактних напружень:

$$\sigma_{\max} = \sqrt{(3 \cdot F \cdot E_{eq}) / (2 \cdot \pi \cdot b \cdot L)}.$$

де F – навантаження, прикладене до шарнірного з'єднання;
 E_{eq} – приведений модуль пружності контактуючих матеріалів;
 b – ширина контактної площадки;

L – довжина контакту між валиком і втулкою.

Із наведеного співвідношення видно, що величина контактних напружень суттєво залежить від площі фактичного контакту.

Формування регулярного мікрорельєфу забезпечує збільшення ефективної площі взаємодії поверхонь, що сприяє більш рівномірному розподілу навантаження та зменшенню локальних пікових напружень. У результаті знижується інтенсивність втомного руйнування поверхневого шару та підвищується довговічність шарнірного з'єднання приводного ланцюга.

Оптимальні параметри мікрорельєфу для втулок повинні становити $R_a = 0,4\text{--}1,2$ мкм [2]. Крок елементів структури доцільно вибирати в межах 10–50 мкм, а глибина мікровпадин повинна забезпечувати накопичення мастила без зниження несучої здатності поверхні [5].

Для серійного виробництва доцільно застосовувати віброобробкування або роликове накатування як найбільш економічно ефективні методи [4].

Формування регулярного мікрорельєфу є ефективним способом підвищення довговічності згортних втулок. Регуляризована структура забезпечує рівномірний розподіл навантаження, стабілізацію тертя та покращення умов змащування. Найбільш перспективними є методи пластичного деформування та комбіновані технології, обґрунтовані у працях Кривого П.Д. та Дзюри В.О.

Перелік посилань

1. Bhushan B. Introduction to Tribology. Wiley, 2013.
2. Kryvyi P.D., Kryvinskyi P., Bodnar V., Senyk A. Theoretical and experimental substantiation of angular orientation of rolling bushings. MSEC, 2007.
3. Кривий П.Д., Кашуба Н.П., Сенік А.А., Кривінський П.П. Формування на плоских поверхнях віброобробкуванням регулярного мікрорельєфа з підвищеним ступенем перекриття // Збірник наукових праць «Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем». – Краматорськ: ДДМА, 2011. – Вип. 29. – С. 138–145.
4. Кривий П.Д., Сенік А.А. Конструкторсько-технологічне забезпечення підвищеної якості згортних втулок. Тернопіль: ТНТУ, 2018. 232 с.
5. Технологічні методи забезпечення параметрів якості поверхонь тіл обертання та їх профілометричний контроль / В.О. Дзюра, П.О. Марущак. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2021. – 170 с.