

## СУЧАСНІ МЕТОДИ ЗМІЦНЕННЯ І ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ПАР ТЕРТЯ

Косарчук В.В., доктор технічних наук, Державний економіко-технологічний університет транспорту, Київ, Україна

Кульбовський І.І., кандидат технічних наук, Державний економіко-технологічний університет транспорту, Київ, Україна

Агарков О.В., кандидат технічних наук, Державний економіко-технологічний університет транспорту, Київ, Україна

## MODERN METHODS STRENGTHEN AND IMPROVE THE WEAR RESISTANCE OF FRICTION PAIRS

Kosarchuk V.V. Ph.D., Engineering (Dr.), State Economy and Technology University of Transport, Kyiv, Ukraine

Kulbovskiy I.I., Ph.D., State Economy and Technology University of Transport, Kyiv, Ukraine

Agarkov O.V., Ph.D., State Economy and Technology University of Transport, Kyiv, Ukraine

## СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ УПРОЧНЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПАР ТРЕНИЯ

Косарчук В.В., доктор технических наук, Государственный экономико-технологический университет транспорта

Кульбовский И.И., кандидат технических наук, Государственный экономико-технологический университет транспорта

Агарков А.В., кандидат технических наук, Государственный экономико-технологический университет транспорта

Однією з основних проблем сучасного машинобудування є підвищення надійності і довговічності високонавантажених деталей і вузлів механізмів. Основною причиною виходу з ладу машин є знос і, як наслідок, поверхневе руйнування їх рухомих з'єднань. За деякими оцінками, загальні витрати на ремонт і відновлення зношених деталей нині порівняні з витратами на нову техніку. Щодо залізничного транспорту, проблема полягає, в першу чергу, в підвищенні зносостійкості і довговічності таких високонавантажених фрикційних пар, як рейка – колесо, вал – втулка, а також підшипників ковзання, шарнірно-болтових з'єднань та ін. Навіть часткове вирішення цієї проблеми дозволить забезпечити суттєву економію матеріалів і зменшення витрат на ремонт і відновлення рухомого складу і рейкових шляхів.

Традиційними напрямками у вирішенні зазначеної проблеми є конструктивно-технологічні методи (вибір раціональних профілів контактуючих поверхонь для зменшення контактних напружень, застосування спеціальної термообробки рейок і вагонних коліс, використання матеріалів з поліпшеними фізико-механічними властивостями). Проте можливості цих традиційних методик на сьогоднішній день практично вичерпані і їх застосування не може привести до істотного поліпшення ситуації на залізницях без значних матеріальних витрат. Крім того, зазначені методи не вирішують проблему відновлення зношених деталей рухомого складу і рейкових шляхів.

Рекомендації щодо підвищення зносостійкості пар тертя орієнтовані, в основному, на поліпшення структури матеріалу деталі, яка формується в процесі виготовлення деталі, її механічної, а потім термічної обробки. Об'ємне легування основного матеріалу і наскрізна термообробка деталі сприяють поліпшенню фізико-механічних властивостей матеріалу деталі. Проте в процесі тертя беруть участь лише поверхневі шари матеріалу. Тому більш перспективними є технології модифікації поверхневого шару матеріалу деталей шляхом нанесення спеціальних захисних (зміцнюючих і зносостійких) покриттів. Виникла і успішно розвивається нова галузь науки – інженерія поверхні («surface engineering»), одним із завдань якої є вибір раціональних методів модифікації поверхні відповідно до умов експлуатації деталі. Проте в даний час в промисловій та дослідницькій практиці налічується понад сотні технологічних способів нанесення покриттів, що створює певні труднощі при виборі оптимального методу поверхневої обробки деталей для конкретних виробничих завдань. Один

і той же матеріал покриття може бути нанесений на поверхню деталі десятками способів. При цьому фізико-механічні та експлуатаційні властивості таких покриттів можуть значно відрізнятися. Крім того, відомі технології значно різняться за вартістю і трудомісткістю нанесення покриття, а також по можливості застосування їх в умовах, що відрізняються від лабораторних. В даний час існують вельми суперечливі погляди на переваги окремих методик, фактично не існує достатньої інформаційної бази для вибору оптимальної технології нанесення покриття та обладнання для її реалізації.

Нижче будуть коротко розглянуті деякі методи нанесення покриттів і вказані їх переваги і недоліки стосовно до досліджуваних проблем.

До покриттів, що працюють в екстремальних умовах експлуатації (зокрема, при високих контактних навантаженнях, які характерні для фрикційних пар типу рейка – колесо) пред'являються особливі вимоги.

В даний час у вітчизняній і в зарубіжній літературі склалася єдина думка про недостатню міцність покриттів в екстремальних умовах експлуатації. Всюди відзначається, що при підвищенні контактних навантажень захисні властивості покриттів зменшуються.

Зазначені умови характерні для роботи покриттів, які нанесені на ріжучий і штампувальний інструмент.

Дослідження зносостійкості покриттів залежно від величини контактної навантаження показали, що має місце різкий перехід від «м'якого» зносу до катастрофічного. При цьому часто відмічається «пороговий» характер залежності зносу від величини навантаження, тобто ступінь зносу покриття різко зростає після певної (критичної для даного виду покриття) величини навантаження. Модифікація покриття може пришвидшити або уповільнити цей перехід.

У літературі зазначається також недостатня стійкість покриттів в умовах контактної втоми при коченні, що характерно для роботи пар тертя типу колесо – рейка. Відомо, що в зазначених умовах руйнування зміцненого шару найчастіше починається в підповерхневої зоні (тобто на межі розділу «покриття – матеріал основи»), приводячи в кінцевому підсумку до викришування і відшаровування покриття. При цьому зародження втомних тріщин відбувається на межі розділу покриття – основа, причому глибина залягання цих тріщин збільшується з ростом товщини зміцненого шару.

Зауважимо, що і дотичні напруження в зоні контакту колесо-рейка, згідно з розрахунками проф. Н.М.Беляєва [1], досягають максимальної величин на глибині 4 ... 5 мм від поверхні головки рейки. За даними [2], за умов контакту в центральній частині рейки при положенні колеса, яке характерне для руху поїзда в прямій ділянці колії, максимальні еквівалентні напруження виникають на глибині 3,32 мм під поверхнею контакту. Враховуючи, що для термозміцнених рейок товщина зміцненого шару приблизно дорівнює указаним значенням, можна очікувати появу горизонтальних тріщиноподібних дефектів на межі розділу покриття-основа в процесі експлуатації таких рейок. З часом такі тріщини поступово виходять на поверхню кочення, приводячи до її викришування, а іноді і до втомного зламу рейки. Це підтверджується даними, наведеними в роботі [3], причому автори вказують, що таке явище характерне саме для термозміцнених зносостійких рейкових ниток.

Крім того, для пар тертя типу колесо – рейка характерним є підвищений абразивний знос, пов'язаний із забрудненням поверхонь контакту, корозійний знос, пов'язаний з наявністю агресивних речовин в зоні контакту, а також адгезійний знос, що виявляється в молекулярному схоплюванні контактуючих поверхонь, не захищених окисними і олійними плівками. Тому покриття на рейках і вагонних колесах повинні чинити опір усім зазначеним видам зносу.

Способи створення на основній поверхні матеріалу захисних покриттів можна розділити на чотири основні групи:

- матеріал деталі бере участь в утворенні покриття (поверхнєве термічне гартування, різні види хіміко-термічної обробки, обробка лазером, методи іонної імплантації, детонаційне легування);
- матеріал поверхні деталі практично не бере участь в утворенні зміцненого шару (гальванічні покриття, електродугове та плазмове-порошкове наплавлення, газотермічне і електродугове напилення, детонаційні покриття);
- метал деталі частково бере участь в утворенні покриття (анодне і хімічне окисдування);
- зміцнений шар формується за рахунок поверхневої пластичної деформації (дробострумінне оброблення, обкатка роликми, розкочування тощо).

Особливе місце займають комбіновані методи зміцнення, які використовують для створення багатшарових або багатокомпонентних покриттів. До них, зокрема, належать методи електроіскрового легування.

В даній статті обмежимося аналізом методів хіміко-термічної обробки виробів. Інші методи будуть розглянуті в наступних публікаціях авторів.

Методи хіміко-термічної обробки (ХТО) (борування, азотування, фосфатування, цементация, ціанування, хромування, титанування та ін) засновані на явищі дифузії атомів легуючих елементів з газового, рідкого або порошкоподібного середовища в поверхню деталі. У результаті в поверхневому шарі виникають хімічні сполуки основного металу (наприклад, заліза) з вказаними елементами (карбіди, нітриди, фосфати і т.д.), міцнісні властивості яких істотно вищі порівняно з вихідним матеріалом. Концентрація утворених хімічних сполук швидко зменшується по мірі збільшення відстані від поверхні деталі. Це обумовлює значну зміну (градієнт) твердості матеріалу від поверхні вглиб деталі.

Для інтенсифікації процесів дифузії використовуються підвищені температури (500 ... 1000 °С). Проте, малі швидкості дифузії значно збільшують тривалість процесу формування покриття (зазвичай він триває від кількох годин до кількох десятків годин). Глибина зміцненого шару при використанні технологій ХТО зазвичай становить від п'яти до двох десятків мікрметрів.

Найчастіше для зміцнення використовують суміші газів, розчинів або порошків (нітроцементация та ін), або послідовне зміцнення одним, а потім іншим легуючим елементом.

Після зазначених видів обробки в поверхневому шарі матеріалу виникають поля залишкових стискаючих напружень, що сприятливо позначається на зміні зносостійкості деталі, при цьому також можуть збільшуватися характеристики опору втомі.

Водночас підвищені температури і велика тривалість процесів ХТО можуть призводити до несприятливої зміни фізико-механічних властивостей матеріалу деталі. Так, після високотемпературної цементации часто спостерігається зростання зерен в поверхневих шарах матеріалу, що зменшує характеристики міцності деталі. Наводнювання і внутрішнє окислення може призвести до зниження втомних характеристик деталі. При газовому азотуванні процес наводнювання призводить до погіршення характеристик тривалої статичної міцності матеріалу деталі.

Альтернативою може бути використання газового азотування, яке проводять при більш низьких температурах. Однак у цьому випадку на поверхні утворюється двофазний шар нітридів, який має підвищену крихкість і часто відшаровується при експлуатації деталі. Через малу товщину азотованого шару такі деталі погано сприймають контактні навантаження.

Недоліками процесу борування (твердофазного, газового, в сольових розплавах) є велика тривалість процесу і відсутність стійких результатів. Непридатні для борування сталі, що містять більше 0,5% кремнію і міді. Для зниження деформаційних поведок борованих виробів їх рекомендується охолоджувати від температури борування зі швидкістю, яка пригнічує виділення надлишкового бору з  $\alpha$  – фази (у вигляді  $Fe_2B$  ).

Слід також мати на увазі, що в результаті ХТО об'єм поверхневого шару матеріалу деталі збільшується (не завжди рівномірно), що може викликати викривлення тонкостінних елементів. Збільшення об'єму деталі, а, отже, і розмірів часто вимагає проведення фінішної механічної обробки деталей з покриттями.

Так, при твердофазному боруванні збільшення розмірів деталі може досягати 20 ... 25% від товщини зміцненого шару для поліпшуваних сталей і до 80% для легуваних сталей. Через високу крихкість покриття, його фінішну механічну обробку потрібно проводити дуже обережно.

Але основним недоліком методів зміцнення, заснованих на хіміко-термічній обробці, є, на наш погляд, нестабільність результатів, що досягаються – незначні відхилення в параметрах технологічного процесу можуть істотно вплинути на якість покриття.

Найвні відомості про переваги того чи іншого виду ХТО досить суперечливі, тому зрозуміло недовіру конструкторів і технологів до використання такого роду покриттів при проектуванні виробів нової техніки.

На практиці для отримання задовільних результатів зазвичай використовують багатоопераційну ХТО, часто поєднуючи її з іншими методами зміцнення. Так, однією з перспективних технологій зміцнення та відновлення з'єднань деталей типу вал – втулка, перевірених на практиці [3], є послідовне електролітичне залізнення сталевих деталей в хлористому електроліті, дифузійне борування в порошковій суміші карбіду бору ( $B_4C$  ) та оксиду алюмінію ( $Al_2O_3$  ) при температурі 980 °С протягом 2 ... 6 годин з подальшим гартуванням з відпуском. В результаті можна отримати покриття товщиною від 0,1 до 0,25 мм, поверхнева мікротвердість якого може досягати 14 000 ... 16

000 МПа, що є оптимальним за показником зносостійкості, але не технологічним з точки зору оброблюваності покриття.

У більшості випадків високотемпературні впливи, що характерні процесам ХТО, накладають певні обмеження на номенклатуру оброблюваних деталей. Наявне обладнання для проведення ХТО дозволяє обробляти деталі невеликого розміру (втулки, прецизійні деталі дизельної паливної апаратури, зубчасті колеса, деякі види ріжучого інструменту та ін.).

Крім того, великі градієнти твердості від покриття вглиб деталі часто є причиною руйнування деталей з покриттями, створеними за допомогою хіміко-термічної обробки, при роботі в умовах високих контактних навантажень. Явища відшаровування покриттів часто спостерігаються, наприклад, при експлуатації шестерень, зуби яких зміцнювались цементациєю з подальшим загартуванням струмами високої частоти. Особливо погано працюють такі покриття в умовах контактної втоми при коченні – часто спостерігається викришування зміцненого шару, що пов'язано як з високою твердістю самого покриття, так і з окрихчуванням матеріалу основи.

Таким чином, слід визнати, що дифузійні покриття, реалізовані методами ХТО, навряд чи можуть бути використані для підвищення зносостійкості рейок і вагонних коліс. Тим не менш, вони можуть бути використані для збільшення терміну служби втулок, деяких деталей дизельної паливної апаратури (наприклад, плунжерних пар).

Отже, розглянуті методи поверхневого зміцнення шляхом хіміко-термічної обробки поряд із перевагами, мають значні недоліки, через які ці методи не отримали широкого використання при обробці поверхонь, що працюють в умовах контактної взаємодії.

Інші методи поверхневого зміцнення будуть розглянуті в наступних публікаціях авторів.

#### ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Беляев Н.М. Соппротивление материалов. – М.: Наука, 1965. – 856 с.
2. Косарчук В.В. Прогнозирование долговечности рельсов по критерию возникновения трещин контактной усталости / Косарчук В.В., Агарков А.В. // Зб. наук. праць ДЕТУТ. Серія «Транспортні системи і технології». – 2012. – 20. – С. 77 – 90.
3. Ebersbach D., Grohmann H.-D. Методы повышения надежности железнодорожных путей // Железнодорожный технический обзор. – 1998. – N 4. – с. 205 – 214.
4. Казанцев С.П. Восстановление и упрочнение деталей сельскохозяйственной техники железоборидными покрытиями // Материалы 9 международной научно-практической конференции «Организация и технология ремонта машин, механизмов, оборудования», 1 – 5 октября 2001 г., Киев. – Киев, 2001. – с. 39.

#### REFERENCES

1. Belyaev N.M. Strength of materials. – M.: Nauka, 1965 – 856 p.(Rus)
2. Kosarchuk V.V. The forecasting of the railway track rails service-life that is based on the criterion of the internal fatigue crack occurrence / Kosarchuk V.V., Agarkov O.V. // Scientific papers SETUT. Series «Transport Systems and Technologies» . – 2012. – 20. – P. 77 – 90. (Ukr)
3. Ebersbach D., Grohmann H.-D. Die Methoden der Zuverlässigkeit Verbessern der Eisenbahnschienen // Eisenbahntechnische Rundschau. – 1998. – N 4. – S. 205 – 214.(Deu)
4. S. Kazantsev Restoring and strengthening agricultural machinery parts zhelezoboridnymi coatings // Materials 9 international scientific-practical conference "Organization and technology of repair of machines, equipment," 1 – 5 October 2001, Kiev. – Kyiv, 2001. – P. 39.(Rus)

#### РЕФЕРАТ

Косарчук В.В. Сучасні методи зміцнення і підвищення зносостійкості пар тертя / В.В. Косарчук, І.І. Кульбовський, О.В. Агарков // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науково-технічний збірник. – К.: НТУ, 2015. – Вип. 1 (31).

В статті розглянуті методи зміцнення поверхонь, що працюють в умовах контактної взаємодії, що засновані на хіміко-термічній обробці, проаналізовано недоліки та переваги різних методів.

Об'єкт дослідження – контактуючі поверхні пар тертя.

Мета роботи – провести аналіз різних методів зміцнення контактуючих поверхонь пар тертя, встановити переваги і недоліки кожного методу, запропонувати раціональні методи зміцнення в залежності від умов навантаження.

Метод дослідження – аналіз даних використання кожного із запропонованих методів.

Зміцнення поверхонь пар тертя являє собою дуже серйозну проблему, оскільки в умовах високих силових навантажень спостерігається значний знос контактуючих поверхонь, що призводить до зменшення строків служби елементів конструкцій. В результаті зазначених процесів значно збільшується вартість експлуатації таких об'єктів. Для подовження строку їх служби та підвищення економічної ефективності експлуатації становить науковий та інженерний інтерес обґрунтування використання того чи іншого методу поверхневого зміцнення в залежності від умов роботи відповідальних елементів конструкцій.

Результати статті можуть бути використані для обґрунтування застосування одного із запропонованих методів зміцнення в залежності від умов експлуатації транспорту.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** МЕТОД, ЗМІЦНЕННЯ, ЗНОС, ПОКРИТТЯ, ХІМІКО-ТЕРМІЧНА ОБРОБКА, КОЛЕСО, РЕЙКА.

#### ABSTRACT

Kosarchuk V.V., Kulbovskiy I.I., Agarkov O.V. Modern methods strengthen and improve the wear resistance of friction pairs. Visnyk National Transport University. Series «Technical sciences». Scientific and Technical Collection. – Kyiv: National Transport University, 2015. – Issue 1 (31).

The article deals with methods of hardening surfaces operating under contact interaction, based on the chemical and thermal processing, analyzes advantages and disadvantages of different methods.

Object of study – contacting surfaces of friction pairs.

Purpose of the study – to analyze different methods of strengthening the contacting surfaces of friction pairs, set the advantages and disadvantages of each method, to offer rational methods of strengthening depending on load conditions.

Method of the study – analysis of the use of each of the proposed methods.

Strengthening the surfaces of friction pairs is a very serious problem, as in large power loads observed significant wear of contacting surfaces, which reduces the lifetime of structural elements. As a result of these processes significantly increases the cost of operating such facilities. For the extension of their services and increase economic efficiency operation is scientific and engineering interest justification for the use of a method of surface hardening, depending on the circumstances of critical structural elements.

The results of the article can be used to justify the use of one of the proposed methods of strengthening depending on the conditions of transport.

**KEY WORDS:** METHODS, STRENGTHENING, WEAR, COATING, CHEMICAL-THERMAL TREATMENT, WHEELS, RACK.

#### РЕФЕРАТ

Косарчук В.В. Современные методы упрочнения и повышения износостойкости пар трения / В.В. Косарчук, И.И. Кульбовский, А.В. Агарков // Вестник Национального транспортного университета. Серия «Технические науки». Научно-технический сборник. – К. : НТУ, 2015. – Вып. 1 (31).

В статье рассмотрены методы упрочнения поверхностей, работающих в условиях контактного взаимодействия, основанных на химико-термической обработке, проанализированы недостатки и преимущества различных методов.

Объект исследования – контактирующие поверхности пар трения.

Цель работы – провести анализ различных методов упрочнения контактирующих поверхностей пар трения, установить преимущества и недостатки каждого метода, предложить рациональные методы упрочнения в зависимости от условий нагрузки.

Метод исследования – анализ данных использования каждого из предложенных методов.

Упрочнение поверхностей пар трения представляет собой очень серьезную проблему, поскольку в условиях высоких силовых нагрузок наблюдается значительный износ контактирующих поверхностей, что приводит к уменьшению сроков службы элементов конструкций. В результате указанных процессов значительно увеличивается стоимость эксплуатации таких объектов. Для продления срока их службы и повышения экономической эффективности эксплуатации составляет научный и инженерный интерес обоснования использования того или иного метода поверхностного упрочнения в зависимости от условий работы ответственных элементов конструкций.

Результаты статьи могут быть использованы для обоснования использования одного из предложенных методов упрочнения в зависимости от условий эксплуатации транспорта.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** МЕТОД, УПРОЧНЕНИЕ, ИЗНОС, ПОКРЫТИЯ, ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА, КОЛЕСО, РЕЛЬС.

#### АВТОРИ

Косарчук Валерій Володимирович, доктор технічних наук, професор кафедри теоретичної та прикладної механіки Державного економіко-технологічного університету транспорту, email: kvval@voliacable.com, тел. +380445915187, Україна, 03049, м. Київ, вул. Лукашевича 19, к. 216

Кульбовський Іван Іванович, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельних конструкцій і споруд Державного економіко-технологічного університету транспорту, email: kulbovskiy@bigmir.net, тел. +380679305928, Україна, 03049, м. Київ, вул. Лукашевича 19, к. 208П

Агарков Олександр Володимирович, кандидат технічних наук, доцент кафедри теоретичної та прикладної механіки Державного економіко-технологічного університету транспорту, email: agarcov@ukr.net, тел. +380443836397, Україна, 03049, м. Київ, вул. Лукашевича 19, к. 802

#### AUTHOR

Kosarchuk Valeriy V., Ph.D., Engineering (Dr.), associate professor, department of theoretical and applied mechanics State Economy and Technology University of Transport, email: kvval@voliacable.com, +380445915187, Ukraine, 03049, Kyiv, Lukashevicha str. 19, of. 216

Kulbovskiy Ivan I., Ph. D., associate professor, department of building structures and facilities State Economy and Technology University of Transport, email: kulbovskiy@bigmir.net, tel. +380679305928, Ukraine, 03049, Kyiv, Lukashevicha str. 19, of. 208P

Agarkov Oleksandr V., Ph. D., associate professor, department of theoretical and applied mechanics State Economy and Technology University of Transport, email: agarcov@ukr.net, tel. +380443836397, Ukraine, 03049, Kyiv, Lukashevicha str. 19, of. 802

#### АВТОРЫ

Косарчук Валерій Владимирович, доктор технических наук, профессор кафедры теоретической и прикладной механики Государственного экономико-технологического университета транспорта, email: kvval@voliacable.com, тел. +380445915187, Украина, 03049, г. Киев, ул. Лукашевича 19, к. 216

Кульбовский Иван Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры строительных конструкций и сооружений Государственного экономико-технологического университета транспорта, email: kulbovskiy@bigmir.net, тел. +380679305928, Украина, 03049, г. Киев, ул. Лукашевича 19, к. 208П

Агарков Александр Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и прикладной механики Государственного экономико-технологического университета транспорта, email: agarcov@ukr.net, тел. +380443836397, Украина, 03049, г. Киев, ул. Лукашевича 19, к. 802

#### РЕЦЕНЗЕНТИ

Вербицький В.Г., доктор фізико-математичних наук, професор, Державний економіко-технологічний університет транспорту, професор кафедри теоретичної та прикладної механіки, Київ, Україна.

Мельниченко О.І., кандидат технічних наук, професор, Національний транспортний університет, професор кафедри транспортного права та логістики, Київ, Україна.

#### REVIEWER

Verbitskiy V.G., Ph.D., Engineering (Dr.), associate professor, State Economy and Technology University of Transport, professor, department of theoretical and applied mechanic, Kyiv, Ukraine

Melnichenko O.I., Ph. D., associate professor, National University, professor, department of transport right and logistics, Kyiv, Ukraine.