

Порівняльна оцінка зношення фрикційних елементів телескопічних коронок в експерименті

Comparative Evaluation of Wear of Friction Elements of the Telescopic Crowns in the Experiment

Макєєв В.Ф., Нестор Р.А.,
Риберт Ю.О.

Львівський національний медичний
університет ім. Д. Галицького,
каф. ортопедичної стоматології
(зав. — проф. В.Ф. Макєєв)
V.F. Makeyev, R.A. Nestor, Yu.O. Rybert

Резюме Мета роботи — дослідити в експерименті вплив механічного сухого тертя на зношування пари «первинна коронка — фрикційний елемент вторинної коронки» у частковому знімному протезі з телескопічною системою кріплення, порівняти динаміку зміни цього показника залежно від кількості робочих циклів для різних типів фрикційних елементів. Зусилля навантаження й кількість циклів знімання-насаджування ініціювали зворотно-поступальним рухом вторинної коронки по нерухомо зафіксованій первинній коронці за допомогою спеціально розробленої й виготовленої у Фізико-механічному інституті ім. Г.В. Карпенка Національної академії наук України установки СМЩ-1 для циклічного навантаження. Розглянуто й описано механізми стирання, які виникають у цих парах тертя. Здійснено порівняльну оцінку зношування фрикційних елементів телескопічних коронок в експерименті. Визначено фрикційні елементи, які мають кращі фрикційні характеристики.

Summary The aim is to put in the experiment to investigate the influence of mechanical dry friction on the wear couple: primary crown-frictional elements of secondary crowns, in a partial denture with telescopic mount system. Compare dynamics of this indicator on the number of cycles for different types of friction elements. The efforts of the load and number of cycles removal-planting are initiated by backward-forward movement of secondary crown on primary crown. The results are recorded, using a specially designed and manufactured in the Physical-Mechanical Institute. GV Karpenko National Academy of installation SMSCH-1 for cyclic loading. There are considered and described the mechanisms of abrasion by the influence of the mechanical dry friction on the wear couple: primary crown-frictional elements of secondary crowns. There was made a comparative characterization of wear and friction of the elements of telescopic crowns in the experiment. There was determined the strongest friction element that correspond to the best characteristics.

Ключові слова телескопічні елементи кріплення, фрикційні елементи, тертя, механізми стирання

Key words telescopic fasteners, friction elements, friction, abrasion mechanisms

Наука про тертя, або «трибологія» (від грец. *tribos* – буквально терти) є надзвичайно важливою як з наукового, так і з практичного погляду. Відразу відзначимо, що якщо в одних ситуаціях бажано максимально зменшити тертя, то в інших – навпаки, досягти якомога більшого тертя.

Тертя буває статичним і кінетичним. Сила статичного тертя f_s – це сила, яку потрібно прикласти до системи, щоб вивести її зі стану рівноваги в режим ковзання. Саме завдяки статичному тертю можливі ходьба і рух автомобіля, а також тримаються конструкції з болтів і гайок. Сила кінетичного тертя f_k – це сила, необхідна для підтримки плавного ковзання із заданою швидкістю. При цьому за одиницю часу виділяється енергія, яка перетворюється на тепло. Зважаючи на важливість тертя, його вивчення почалося понад три століття тому [2]. Перші наукові роботи з вивчення тертя, які дійшли до нас, належать Леонардо да Вінчі (1452 – 1519), який довів, що коефіцієнт тертя не залежить від площі контакту. Потім Гійом Амонтон (1663 – 1705) дослідив, що сила тертя прямо пропорційна навантаженню, тобто масі ковзаючого блоку. Леонард Ейлер (1707 – 1783) відзначив, що треба розрізняти статичне тертя, яке вивчав да Вінчі, і кінетичне тертя, досліджене Амонтоном. Нарешті, Шарль Кулон (1736 – 1806) установив, що кінетичне тертя не залежить від швидкості ковзання.

Проте ці закони, які одержали назву законів Амонтона, залишалися суто емпіричними аж до середини минулого століття, коли Боуден Ф. і Тейбор Д. [3] зробили першу спробу їх пояснити з погляду фізики. Автори звернули увагу на те, що контактуючі поверхні практично завжди шорсткі, тому насправді контакт здійснюється тільки на горбках (*asperities*). Прості оцінки [1] показують, що реальна площа контакту A_{real} становить усього 10^{-5} від видимої (геометричної) площі $A_{visible}$. Самі контакти перебувають у екстремальних умовах

величезного тиску – сили в контакті близькі до межі текучості матеріалів, їх складових. Це і пояснює закони Амонтона: зі збільшенням навантаження f_1 збільшується реальна площа контакту або завдяки збільшенню числа контактів (у режимі пружного відгуку системи), або через пластичну деформацію самих контактів; у результаті відношення залишається приблизно сталим $\mu_{s,k} = f_{s,k}/f_1$ [4].

Подальші експерименти показали, що закони Амонтона виконуються лише частково, а проблема тертя значно складніша. По-перше, тертя все-таки залежить від швидкості. По-друге, воно залежить від передісторії контакту, тобто тертя є різним для новоствореного контакту і для контакту, який вже зазнав ковзання. Нова ера у вивченні тертя почалася тільки близько 15 – 20 років тому, як завдяки розвитку нових експериментальних методик (перш за все «вістряних» технологій), які прийшли з фізики поверхні – скануючого тунельного мікроскопа [5] і його подальших удосконалень – атомного [6] і фрикційного [7] силових мікроскопів, так і завдяки значному прогресу комп'ютерної техніки, що дало можливість виконувати розрахунки методом молекулярної динаміки для реальних трибосистем. Водночас у фізиці важливу роль виконують прості моделі, які, з одного боку, правильно охоплюють основні аспекти проблеми, а з іншого – допускають або точно, або принаймні достатньо обґрунтоване наближене рішення із заданою точністю. У трибології є дві такі моделі – модель Томлінсона [8] і модель Френкеля-Конторової (ФК) [9]. Надалі було запропоновано також безліч узагальнених і комбінованих моделей, опис яких можна знайти у літературних джерелах [10, 11]. Проте навіть проста одновимірна модель – атом у зовнішньому періодичному потенціалі – дає змогу зрозуміти важливі аспекти тертя. При зменшенні сили, яка тягне, спочатку зупиняється тільки нижній (найближчий до контак-

ту) атомний шар верхньої підкладки, що відбувається зі швидкістю атомного масштабу. При цьому виникає «стоп-хвиля» – послідовна зупинка другого, третього і т.д. шарів верхньої підкладки, яка і відносить накопичену кінетичну енергію руху контакту в об'єм підкладки.

Друга важлива модель, яку використовують у трибології, – це модель ФК. Модель ФК описує ланцюжок взаємодіючих атомів (наприклад, атомів мастила), поміщений в зовнішній періодичний потенціал (створений, наприклад, поверхневими атомами поверхні). Успіх використання моделі ФК пов'язаний з тим, що в континуальній межі (справедливо при сильній між-атомній взаємодії) її рівняння руху зводяться до рівняння, що точно інтегрується, рішення якого, окрім лінійних хвиль (фононів), включають топологічні і динамічні солітони.

Отже, навіть прості моделі дають низку відповідей на основні питання трибології, принаймні на якісному рівні.

Стан проблеми в стоматології

Різні системи фіксації покривних протезів (кулькові, балкові, телескопічні) повинні, за визначенням, забезпечувати достатнє та довготривале їх утримання на протезному ложі. У процесі експлуатації закономірним явищем є поступова втрата ретенційних властивостей кріплення, оскільки фрикційна пара «патриця – матриця» працює у досить складних умовах, де наявні різні механічні навантаження (статично-змінні, циклічні, знакозмінні, обертові тощо), механічне абразивне середовище з решток їжі та своєрідне корозійно активне середовище із властивим йому рівнем рН, що складається зі слини і їжі, та змінний у широкому діапазоні температурний чинник. Ці загальні чинники та індивідуальні особливості окремого пацієнта (податливість слизової оболонки, рівень особистої гігієни порожнини рота, сила



Мал.1. Загальний вигляд підготовлених до випробувань первинної (зліва) та вторинної коронок і фрикційних елементів BEGO WiroFix



жування тощо) становлять багатопараметричні завдання і практично унеможливають математичне моделювання процесу тертя у зв'язку з великою кількістю параметрів і умов, які необхідно закласти в розрахунки і які є досить індивідуальними.

Проте дослідженням поведінки різних систем кріплення у процесі їх експлуатації (як *in vivo*, так і *in vitro*), порівнянню змін ретенційних властивостей, способам створення моделі для вивчення і прогнозу поведінки різних систем з'єднання в порожнині рота присвячено низку праць зарубіжних авторів [13 – 18]. Ця тематика є актуальною не тільки з огляду на використання покривних протезів з опорою на збережені корені та зуби, а і з опорою на імплантати, де застосовуються аналогічні системи фіксації [19 – 22].

У доступних нам джерелах інформації виявлено незначну кількість досліджень експлуатаційних можливостей різного типу кріплень, зокрема: метал – пластика, метал – акрил, метал – метал та комбіновані кріплення [23, 24]; довготривалого їх спостереження в клінічній практиці, порівняльної оцінки їх функціонування упродовж достатньо тривалого проміжку і виявлення та систематизації

ускладнень і способів їх усунення в клініці. Враховуючи зазначене, ми розробили підхід для часткового розв'язання окресленої проблеми, а саме – дослідити вплив найважливішого, на нашу думку, чинника – механічного сухого тертя на зношення пари «первинна коронка – фрикційний елемент вторинної коронки» та порівняли динаміку зміни цього показника від кількості робочих циклів для різних їх типів.

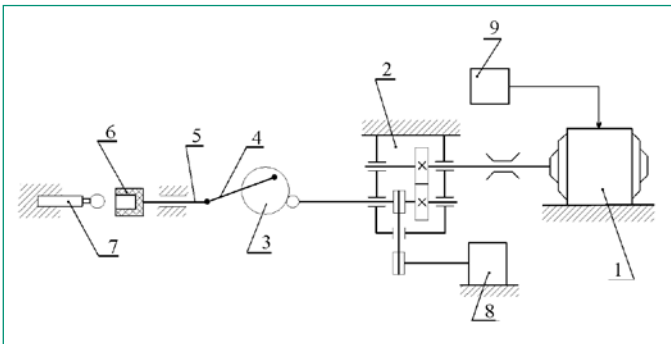
Матеріали та методи дослідження

Суть досліджень полягає у створенні циклічного механічного тертя на нерухомо зафіксовану поверхню атакмена у вторинній коронці з внутрішньою канавкою на поверхні рухомої первинної коронки через її зворотно-поступальний рух [25 – 27]. Тобто запропонована модель відтворює процес ковзання та силу притискання в парі «первинна коронка – атакмен у вторинній коронці», які виникають під час жування та знімання-накладання протеза, а механічні переміщення враховані частково (осьове зворотно-поступальне) завдяки циклічному переміщенню канавки первинної коронки по поверх-

ні атакмена, зафіксованого нерухомо у вторинній коронці з сухим тертям цієї пари.

Для експериментальної реалізації цієї моделі ми напрацювали відповідну методику. Перед початком випробувань інструментально з точністю до $\pm 0,001$ мм вимірювали початкові розміри атакмента, зокрема його товщину та канавки первинної коронки, які потім монтували на відповідних оправках (мал. 1).

Зусилля навантаження та кількість циклів знімання-насаджування ініціювали зворотно-поступальним рухом вторинної коронки по нерухомо зафіксованій первинній за допомогою спеціально розробленої та виготовленої у Фізико-механічному інституті ім. Г.В. Карпенка Національної академії наук України під керівництвом доктора технічних наук, професора Скальського В.Р. установки СМЩ-1 для циклічного навантаження, опис якої подано у літературі [15]. Одночасно зі створенням навантажувального зусилля, величина якого була в межах 30,0 Н і встановлювалась на установці зі застосуванням тензометричного динамометра, відбувалось тертя поверхонь цієї пари зі швидкістю 0,95 мм/с. Тобто імітували



Мал. 2. Кінематична схема установки СМЩ-1:

- 1 — електричний двигун, 2 — редуктор,
3 — поводок, 4 — шатун, 5 — повзун, 6 — первинна коронка,
7 — вторинна коронка із атачменом, 8 — лічильник,
9 — електричний блок управління



Мал. 3. Загальний вигляд пари тертя (а), робочого вузла (б) та установки (в)

зусилля притискання під час жування і одночасно сухе тертя зношування під час їх механічного розділення (насаджування-знімання).

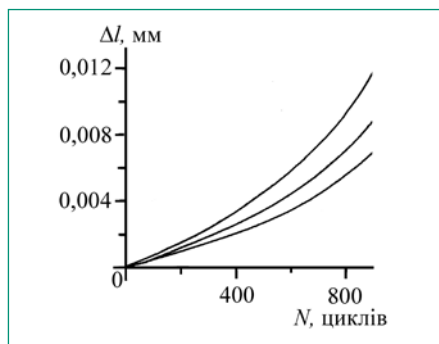
Після фіксованого базового числа циклів навантаження-розвантаження (насаджування-знімання) зупиняли установку і проводили поточні контрольні вимірювання, як і перед початком експериментів. Отримані дані про кількість циклів та зміну розмірів занесли у таблицю протоколу експериментальних досліджень, які проводили аж до досягнення вільного випадання об'єктів дослідження. Інтенсивність циклів навантаження та швидкість пересування

матриці вибирали, виходячи з умови запобігання в місцях тертя підвищенню температури, що могло б негативно впливати на експериментальні результати. Ось чому остаточно вибраний експериментальний режим навантаження-розвантаження становив 2,5 цикли за хвилину, що забезпечувало вказану вище швидкість тертя ковзання та необхідні умови експерименту.

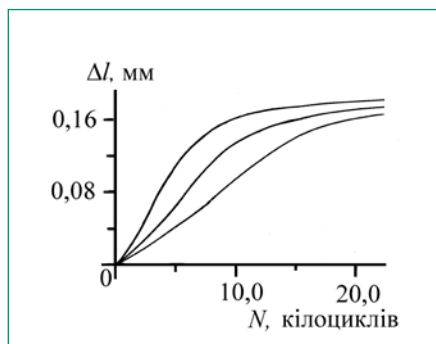
Випробування проводили на установці СМЩ-1, кінематичну схему якої показано на мал. 2.

З електродвигуна 1 типу РД-09, який має швидкість обертання 1195 об./хв., за допомогою редуктора 2 створювали

обертання поводка 3 зі швидкістю 2,5 об./хв. Приєднаний до обертового диска-поводка 3 шатун 4 перетворює обертальний рух у зворотно-поступальний рух повзуна 5, до якого жорстко, за допомогою спеціальної оправки, приєднано вторинну коронку 6. Остання плавно, внаслідок зворотно-поступального руху повзуна 5, насаджується на циліндричну поверхню первинної коронки 7, яка є нерухомою у результаті жорсткого фіксування її у спеціальній опорі. Установку обладнано лічильником циклів 8, а блок її електричного управління 9 забезпечує можливість під'єднання установки до по-



Мал. 4. Залежності зміни товщини атачменів від кількості циклів тертя на початкових стадіях зношування: верхня крива — BEGO WiroFix допоміжна частина, жовта, пластмасова; середня крива — BEGO WiroFix фрикційний елемент, стандартної ретенції, червоний, акриловий; нижня крива — BEGO WiroFix фрикційний елемент, жорсткої ретенції, помаранчевий, пластмасовий



Мал. 5. Інтегральна характеристика зміни товщини атачменів від кількості циклів тертя за весь період (25 тисяч циклів) випробувань: верхня крива — BEGO WiroFix допоміжна частина, жовта, пластмасова; середня крива — BEGO WiroFix фрикційний елемент, стандартної ретенції, червоний, акриловий; нижня крива — BEGO WiroFix фрикційний елемент, жорсткої ретенції, помаранчевий, пластмасовий

бутової мережі живлення з напругою 220 V. Її можна використовувати у довготривалому безперервному режимі експлуатації, установка має автономне конструкційне завершення у вигляді змонтованих на єдиній основі окремих вузлів та блоків (мал. 3, в).

Результати дослідження та їх обговорення

В експериментальних дослідженнях використовували фрикційні елементи BEGO WiroFix, стандартної ретенції — акрилові, червоного кольору; фрикційні елементи BEGO WiroFix, жорсткої ретенції — пластмасові, помаранчевого кольору; BEGO WiroFix допоміжні частини — пластмасові, жовтого кольору, виробництва фірми «BEGO» (Німеччина), а також спеціально підготовлені первинну і вторинну коронки. Досліджували залежності зміни товщини атачмена від кількості циклів тертя зношування. Базова кількість циклів випробувань становила 25000. Після кожних 200 циклів зупиняли установку та проводили необхідні вимірювання, як описано вище. Отримані за допомогою інструментального мікроскопа дані вимірювань використовували для по-

будови графічних залежностей зменшення товщини атачменів (фрикційних елементів) від кількості циклів їхнього насаджування-знімання.

Експерименти показали, що для BEGO WiroFix допоміжної частини — пластмасової, жовтого кольору зношування розпочинається приблизно після 50 циклів насаджування-знімання і проходить, здебільшого, за параболічним законом аж до досягнення 1000 циклів (мал. 4). Далі товщина атачменів стабілізується за всією поверхнею тертя і швидкість стирання є незмінною до досягнення приблизно 8000 циклів (мал. 5). Після досягнення цієї кількості циклів зношення практично припиняється. Гіпотетично можна вважати, що щільність прилягання елементів пари тертя після цього змінюється настільки, що суттєво зменшується початкове зусилля їхнього притискання.

Аналогічно проходить динаміка стирання решти атачменів, але з властивими кожному із них типовими кількісними показниками. На мал. 4 і 5 показано усереднення за результатами випробувань залежності зміни товщини атачменів від кількості циклів тертя (насаджування-знімання). Окремо необхідно зазначити, що характерним для

зношування атачменів є те, що воно розпочинається з передньої їх частини і поширюється рівномірно далі за поверхню тертя аж до досягнення тильної частини атачменів.

Інакше зношуються фрикційні елементи червоного кольору. Тут зафіксовано значно менші швидкості зношування як на початкових, так і на кінцевих стадіях випробувань. Практично рівномірна і значно менша, ніж у попередніх атачменів, швидкість стирання поверхні тертя для червоних атачменів триває приблизно до 15 тисяч циклів. Далі вона починає суттєво зменшуватись, очевидно, через вказану вище причину.

Щодо фрикційного елемента помаранчевого кольору, то характер кривих зношування на мал. 4 і 5 подібний до кривих, притаманних червоному фрикційному елементу. Особливість полягає лише в тому, що вони відрізняються більшими кількісними показниками.

Під час побудови графіків використовували прямокутну (декартову) систему координат xOy . Координатні осі були шкалами для експериментальних даних. Відстані між двома сусідніми позначками шкали були графічним інтервалом, а різниця цих позначок є ціною поділки. Для побудови графіків необхідно насамперед раціонально вибрати масштаб, щоб на графіку розмістився весь діапазон експериментальних величин. Будуючи графіки, обмежувалися нанесенням експериментальних точок, а потім характер зміни їх розташування у системі координат описували аналітичними залежностями: лінійною, степеневою, логарифмічною тощо. Причому функції підбирали так (апроксимація), щоби вони якомога достовірніше описували отримані експериментальні точки. Крива має проходити якнайближче до всіх експериментальних точок.

Висновки

Отже, експериментальні дані, які ми отримали у результаті проведених

експериментальних робіт, апроксимували математичною функцією, яка з високою достовірністю описує характер зміни зношування поверхні атачмена залежно від кількості циклів насаджування-знімання.

Розглядаючи механізми стирання, які виникають у цих парах тертя, можна констатувати, що первинній коронці властива шорсткість поверхонь канавкової частини, яка зумовлена висотою гострих нерівностей металу. Дещо менші є гладкі виступи полімеру на поверхні фрикційного елемента. Під час їх взаємодії і проходить стирання

останнього, яке супроводжується відриванням частинок пластмасової поверхні мікронерівностями канавки первинної коронки. Ці частинки відриваються з поверхні атачмена і виносяться поза контактуючі поверхні. Звичайно, протікання та інтенсивність процесу залежить від фізико-хімічних властивостей матеріалів, умов навантаження, мікрогеометричних характеристик поверхонь тертя тощо. Окрім цього, враховуючи багатофакторність процесу тертя, на процес зношування також впливає сукупність зовнішніх умов, які виникають на поверхні тертя:

швидкість ковзання та зміна її величини, навантаження пари тертя (по дотичній чи по нормальній складовій), характер дії зусилля навантаження (статична, дотична, циклічна тощо); температурний фактор, конфігурація поверхонь тертя, що впливає на розподіл контактних тисків та багато інших факторів, які і зумовили отримані нами експериментально кількісні показники зношування, наведені вище. Очевидно, що найкращі фрикційні характеристики мають фрикційні елементи BEGO WigoFix жорсткої ретенції, помаранчевого кольору, виготовлені з пластмаси.

Література

- Persson B. N. J. Sliding Friction: Physical Principles and Applications / B. N. J. Persson. — Berlin: Springer-Verlag, 1998.
- Dowson D. History of Tribology / D. Dowson. — N.-Y.: 1979.
- Боуден Ф. Трение и смазка твердых тел / Ф. Боуден, Д. Тейбор. — М.: Мир, 1968. — Переклад за вид.: Bowden F. P., Tabor D. Friction and Lubrication of Solids (Clarendon: Oxford, 1950).
- Greenwood J. A. Contact of Nominally Flat Surfaces / J. A. Greenwood, J. B. P. Williamson // Proc. Roy. Soc. A. — 1966. — 295. — P. 300—319.
- Surface Studies by Scanning Tunneling Microscopy / G. Binnig, H. Rohrer, C. Gerber, E. Weibel // Phys. Rev. Lett. — 1982. — 49. — P. 57 — 61.
- Binnig G. Atomic Force Microscope / G. Binnig, C. F. Quate, C. Gerber // Phys. Rev. Lett. — 1986. — 56. — P. 930—933.
- Atomic-scale friction of a tungsten tip on a graphite surface / C. M. Mate, G. M. McClelland, R. Erlandsson, S. Chang // Phys. Rev. Lett. — 1987. — 59. — P. 1942—1945.
- Tomlinson G. A. A molecular theory of friction / G. A. Tomlinson // Phil. Mag. Series. — 1929. — 7. — P. 935 — 939.
- Конторова Т. А. О теории пластических деформаций и двойникования / Т. А. Конторова, Я. И. Френкель // ЖТЭФ. — 1938. — 8. — С. 1340.
- Braun O. M. Nanotribology: Microscopic mechanism of friction / O. M. Braun, A. G. Naumovets // Surf. Sci. Reports. — 2006. — 60. — P. 79 — 158.
- Braun O. M. The Frenkel-Kontorova Model: Concepts, Methods and Applications / O. M. Braun, Yu. S. Kivshar. — Berlin: Springer-Verlag, 2004.
- Люксютов И. Ф. Двумерные кристаллы / И. Ф. Люксютов, А. Г. Наумовец, В. Л. Покровский. — К.: Наук. думка, 1988. — 219 с.
- Besimo C.E. In vitro retention force changes of prefabricated attachments for overdentures / C.E. Besimo, A. Guarneri // J. Oral Rehabil. — 2003. — 30, No 7. P. 671—678.
- Comparison of the retention properties of six prefabricated post overdenture attachment system / D.D. Epstein, P.L. Epstein, V.J. Cohen, M.K. Pagnillo // J. Dent. — 1999. — 27, No 25. — P. 579—584.
- Fromentin O. In vitro study of the retention and mechanical fatigue behavior of four implant overdenture stud-type attachments / O. Fromentin, B. Picard, B. Tavernier // Pract. Periodontics Aesthet Dent. — 1999. — 11, No 23. — P. 391—7 quiz 398.
- Schwarz W.D. Some aspects of the retention of precision-attachment prostheses / W.D. Schwarz // Quintessence Dent. Technol. — 1980. — 4, No 2. — P. 13—20.
- Setz J.M. Effect of attachment type on the mobility of implant-stabilized overdentures — an in vitro study / J.M. Setz, P.S. Wright, A.M. Ferman // Int. J. Prosthodont. — 2000. — 13, No 6. — P. 494—499.
- Amzalag G. Prostheses supraradiculares: Overdentures / G. Amzalag, E. Bataree, R. Schoedorff // G. Paris. — 1988. — P. 124.
- Coye R. B. Precision attachment removable partial dentures / R.B. Coye // J. Calif. Dent. Assoc. — 1992. — 20, No 11. — P. 45 — 52.
- Besimo C. Removable dentures on implants / C. Besimo, H.R. Rohner // In: Interesting Fact About Attachments. — 1999. — No 9. — P. 114.
- Nachbur R. Grundsatzliche uberlegungun bei der Wahl eines Attachments/R. Nachbur // Die Quintessents Zahntechnik. — 1984. — No 11. — S. 1233-1242.
- Preiskel H.W. Deckprothesen leicht gemacht / H.W. Preiskel. — Berlin: Quintessenz Verlags. — GmbH, 1997. — 252 s.
- Андрейкив А.Е. Оценка крнтактного взаимодействия трущихся деталей машин / А.Е. Андрейкив, М.В. Чернец. — К.: Наук. думка, 1991. — 158 с.
- Крагельский И.В. Трение и износ / И.В. Крагельский. — М.: Машиностроение, 1968. — 384 с.
- Щерба П.В. Технологічні втрати лінійних розмірів кулікоподібних атачментів для фіксації покривних протезів на лабораторних етапах виготовлення / П.В. Щерба // Новини стоматології. — 2004. — №3 (40). — С. 80 — 84.
- Скальський В.Р. Експериментальна оцінка зношування пари полімер-метал за сухого тертя / В.Р. Скальський, В.Б. Михальчук, П.В. Щерба, О.Я. Піх // Машинознавство. — 2005. — №8. — С. 33 — 37.
- Макєєв В.Ф. Порівняльна оцінка зношення матриць та втрати ретенційних властивостей матриць кулікоподібних атачментів і балкової системи кріплення покривних протезів у модельному експерименті / В.Ф. Макєєв, П.В. Щерба, Н.Р. Ключковська // Український стомат. альманах. — 2010. — №1, 2. — С. 14 — 19.