

Вплив покриттів на характеристики утоми сталей при контактному навантаженні

П. В. Каплун^а, Б. А. Ляшенко^б

^а Хмельницький національний університет, Хмельницький, Україна

^б Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України, Київ, Україна

Запропоновано новий метод технологічного процесу для підвищення довговічності конструктивних елементів при терті кочення. Наведено результати порівняльних експериментальних досліджень щодо підвищення довговічності сталей при терті кочення з використанням безводневих інтегральних технологій нанесення градієнтних покриттів з оптимальними властивостями, залишковими напруженнями та твердістю основи в умовах іонного азотування та термічної обробки.

Ключові слова: довговічність, кочення, покриття, іонне азотування, нітрогартування, азотований шар, мікротвердість.

Вступ. У техніці велика кількість деталей і вузлів машин та механізмів працюють при терті кочення. Це – підшипники кочення, зубчасті колеса, колеса поїздів та кранів, подавальні вальці, накатні ролики тощо. Довговічність таких конструктивних елементів при терті кочення залежить від багатьох чинників: конструкційних; технологічних; експлуатаційних. Основним видом їх пошкоджень при терті кочення є викришування від утоми матеріалу при змінному контактному навантаженні. Підвищення довговічності конструктивних елементів має велике значення для народного господарства.

Дослідженню довговічності при терті кочення присвячено ряд робіт [1–10], у більшості з яких розглядається роботоздатність однорідних матеріалів, що мають певні обмежені можливості з підвищення довговічності при коченні. Одним із перспективних напрямків вирішення цієї проблеми є нанесення на поверхню зміцнювальних покриттів. Окрім вищезазначеного на контактну витривалість конструктивних елементів із покриттями впливають чинники, що залежать від властивостей композиції покриття–основа, а саме: конструкції і технології нанесення покриттів; товщини; твердості та її градієнта по товщині; хімічного і фазового складу; залишкових напружень у покритті; твердості основи та адгезійної міцності покриття й основи. Досліджень щодо впливу цих чинників на зносостійкість і контактну витривалість конструктивних елементів із покриттями дуже мало і вони є актуальними.

В основі контактної утоми лежать ті ж процеси, що і за іншого виду утоми [5, 7]. Разом із тим при змінному контактному навантаженні мають місце процеси, що не зустрічаються при інших видах утоми. До них відносяться тертя, зношування, окислення при терті, теплові процеси, які можуть суттєво впливати на контактну утому. Великий вплив на утому матеріалів мають також середовище і водень [11–13].

Утомне викришування і відшарування робочих поверхонь кілець і тіл кочення зумовлено розвитком мікротріщин, що утворюються через повторні мікропластичні зсуви перенапруженого матеріалу. Утомні пошкодження локалізуються в місцях концентрації напружень на поверхні і в підповерхневих шарах. У більшості випадків руйнування починається з поверхні [8, 9]. Утворення підповерхневих тріщин унаслідок контактної утоми металу при дії контактних напружень має місце в матеріалах із неоднорідною структурою (азотовані, цементовані і з поверхневим гартуванням) і

зумовлено додатковим впливом залишкових напружень [10]. У роботах [14, 15] показано, що в деталях із покриттям при терті кочення тріщини можуть виникати всередині покриття, на межі покриття з основою і в основі в залежності від фізико-механічних характеристик покриття та виду зовнішнього навантаження.

Дослідження напружено-деформованого стану матеріалу з покриттям показали, що підвищити несівну здатність та довговічність конструкції при контактному навантаженні можна завдяки використанню градієнтних покриттів, збільшенню модуля пружності і товщини покриття, твердості основи, зменшенню градієнта твердості по глибині та наявності на поверхні низькомодульного шару [14–16]. На сьогодні є велика кількість технологій для нанесення покриттів, кожна з яких має свої переваги і недоліки та забезпечує певні з вищезазначених чинників. Але немає такої, що забезпечувала б усі чинники. Тому перспективним є використання в технологічному процесі інтегральних технологій [17] кількох одинарних технологій, що дозволить забезпечити усі чинники. Найбільш поширеними для підвищення довговічності при змінному контактному навантаженні є технології хіміко-термічної обробки (ХТО) – цементації та нітроцементації. Але вони є високотемпературними, і для насичення поверхню конструктивних елементів необхідно використовувати середовища з воднем, що негативно впливає на характеристики міцності і довговічності матеріалів.

Нижче запропоновано новий метод технологічного процесу для підвищення довговічності конструктивних елементів при терті кочення, а саме: низькотемпературна ХТО в безводневих середовищах з оптимальними властивостями дифузійного шару (висока твердість, максимальна товщина, мінімальний градієнт твердості по товщині, оптимальні залишкові напруження стиску) та наступна термічна обробка з метою досягнення максимальної твердості основи.

Для забезпечення даного методу пропонуються інтегральні технології нітрогартування та оксинітрогартування, які включають відповідно іонне азотування або іонне оксиазотування в безводневих середовищах за оптимальними технологічними режимами (за критерієм максимальної твердості), термоактивування дифузійного шару в розплаві солей з певною витримкою в часі за температури гартування, наступне гартування та низькотемпературний відпуск.

Методика та результати досліджень. Порівняльні експериментальні дослідження довговічності при змінному контактному навантаженні сталей з покриттям проводилися на універсальній установці [18], що дозволяє випробовувати зразки при терті кочення з точковим і лінійним контактом. Досліджувалася торцева поверхня плоских зразків діаметром 40 мм зі сталей 40Х, ШХ15 і Х12М із дифузійними покриттями та без покриттів. Дифузійні покриття наносили методами іонного азотування в безводневих середовищах та за інтегральними технологіями нітрогартування і оксинітрогартування. Технологія нітрогартування базується на іонному азотуванні в безводневому середовищі, термоактивуванні за температури гартування (860°C для сталей 40Х, ШХ15 і 930°C для Х12М) протягом 7 хв, гартуванні в мастилі з наступним відпуском за температури 160°C протягом 90 хв. Технологія оксинітрогартування включала іонне азотування в безводневому середовищі, іонне оксидування в середовищі кисню за тим режимом, що й іонне азотування, термоактивування за температури гартування (860°C для сталей 40Х, ШХ15 і 930°C для Х12М) протягом 7 хв, гартування в мастилі з наступним відпуском за температури 160°C протягом 90 хв. Перед випробуванням зразки шліфували ($Ra = 0,125$ мкм). За тіла кочення слугували кульки діаметром 7,14 мм при точковому контакті і ролики діаметром 4,5 мм і довжиною 4,6 мм при лінійному контакті твердістю HRC 63, які рухалися по колу діаметром 30 мм. Випробування проводилися при максимальному тиску на ділянці контакту 2140 МПа в середовищі мастила І-20. У процесі випробувань через певне число циклів вимірювалися мікротвердість та деформація на поверхні доріжки кочення. Для одержання максимальної твердості поверхні покриття після іонного азоту-

вання в безводневих середовищах використовували оптимальні технологічні режими, що визначалися методом планування експериментів.

На рис. 1–3 наведено розподіл мікротвердості по глибині сталей після нітрогартування та оксинітрогартування за різними технологічними режимами. Видно, що після нітрогартування сталі ШХ15 максимальна мікротвердість спостерігається на певній відстані від поверхні і залежить від режиму нітрогартування. При термоактивуванні азотованого шару відбувається частковий розпад твердих нітридних фаз і дифузія азоту в глибину металу, що призводить до зменшення максимальної мікротвердості азотованого шару, збільшення його товщини та зменшення градієнта твердості по товщині. Зменшення мікротвердості на поверхні зумовлено частковою дифузією азоту і вуглецю з поверхневого шару в навколишнє середовище. Зі зростанням часу витримки збільшується товщина дефектного поверхневого шару, який необхідно видаляти шліфуванням. При оксинітрогартуванні на поверхні азотованого шару є тонкий оксидний шар, що утворений при іонному оксидуванні, який слугує бар'єром для дифузії азоту в навколишнє середовище при термоактивуванні. При цьому на поверхні не виникає дефектного шару, і весь азот дифундує в глибину металу, збільшуючи твердість і товщину азотованого шару (рис. 2). Параметри технологічного режиму при нітрогартуванні та оксинітрогартуванні суттєво впливають на властивості азотованого шару, які можна змінювати за рахунок зміни технологічних параметрів процесу азотування (рис. 3). Це дозволяє проводити оптимізацію за критерієм максимальної довговічності композиції покриття–основа (таблиця, пп. 9–11).

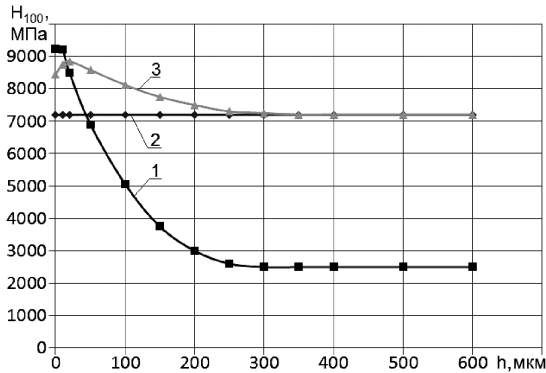


Рис. 1. Розподіл мікротвердості від поверхні по глибині зразків зі сталі ШХ15 після іонного азотування (1), гартування (2) та нітрогартування за оптимальним режимом (3).

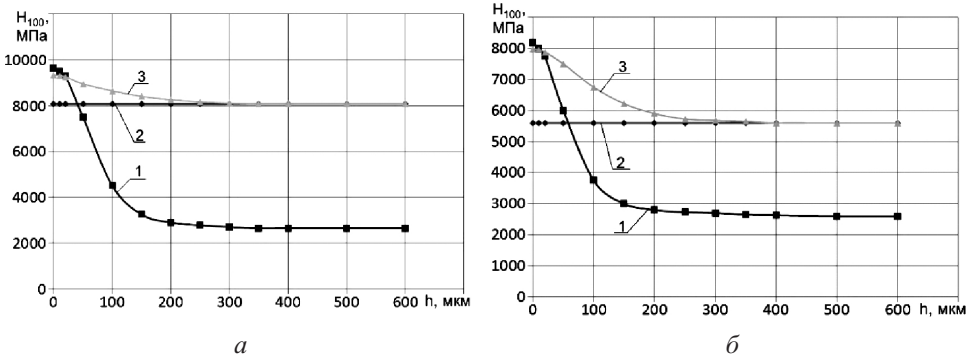


Рис. 2. Розподіл мікротвердості від поверхні по глибині зразків зі сталей X12M (а) і 40X (б) після іонного азотування (1), гартування (2) та оксинітрогартування (3).

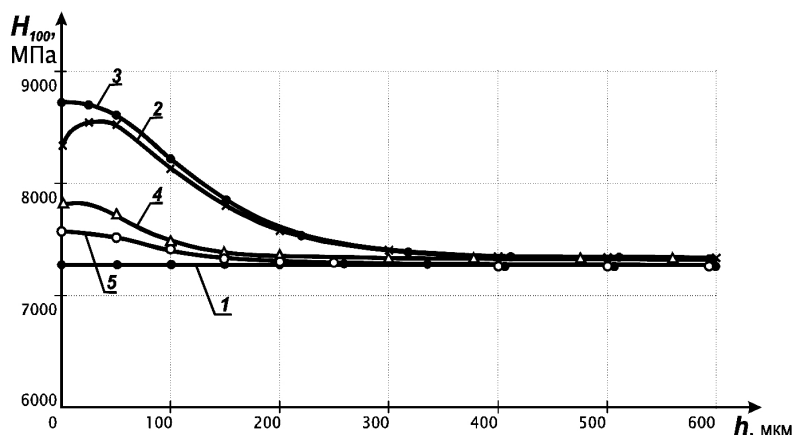


Рис. 3. Зміна мікротвердості по глибині зразків зі сталі ШХ15 після гартування (1), нітрогартування (2) та оксинітрогартування за режимами 1 (3), 2 (4) і 3 (5).

Дослідження довговічності сталей при змінному контактному навантаженні показують, що при перших циклах навантаження на ділянці контакту має місце значна пластична деформація поверхні матеріалу, яка зменшується з часом до мінімуму. Після 9 тис. цикл навантаження в зразках зі сталі 40X без термічної обробки внаслідок пластичної деформації на доріжці кочення з'являлася канавка глибиною 17–18 мкм (рис. 4). На її краях утворювалися буртики у вигляді виступів над площиною кільця висотою до 30 мкм. Аналогічні буртики є також на зразках сталі 40X без термічної обробки з подальшим іонним азотуванням, але їх висота була значно меншою і не перевищувала 10 мкм. На зразках із високою твердістю основи (гартовані та нітрогартовані) таких буртиків не утворювалось. Після 90 тис. цикл навантаження величина пластичної деформації складала 60% сумарного значення деформації за весь період випробувань від початку і до появи викришування на доріжці кочення. В азотованих зразках величина пластичної деформації поступово зменшувалась і в аналогічних умовах випробувань була в 1,5...1,7 раза меншою, ніж в неазотованих. Із рис. 4 видно, що в початковий період навантаження (до $0,01 \cdot 10^6$ цикл) внаслідок перебудови структури поверхні мікротвердість поверхні азотованих і неазотованих зразків спочатку зменшується. При подальшому циклічному навантаженні відбувається ущільнення структури поверхні і, як наслідок, підвищення її мікротвердості до максимального значення, яке на 10...15% вище, аніж мікротвердість поверхні до початку випробувань. Така мікротвердість зберігається до початку руйнування (розвитку мікротріщин) і знижується в період викришування поверхні доріжки кочення.

Процес довговічності при багатоциклового навантаженні при коченні має три стадії: припрацювання; накопичення пошкоджень і руйнування. Фізичні процеси, що відбуваються в кожній зі стадій при терті кочення деталей з покриттями, аналогічні процесам при коченні деталей без покриттів і відрізняються лише тривалістю часу кожної зі стадій.

У таблиці наведено результати випробувань на довговічність зразків зі сталей 40X, ШХ15 і Х12М із різними покриттями і без покриття при терті кочення з точковим контактом. Видно, що довговічність сталей без термічної обробки після іонного азотування значно (в 1,44...1,6 раза) вища порівняно з неазотованими зразками. При цьому довговічність зразків із більшою твердістю основи вища. Із даних таблиці видно, що твердість загартованих зразків із середньовуглецевої сталі 40X більш ніж у два рази, а із високовуглецевих легованих сталей ШХ15 і Х12М більш ніж у три рази

Довговічність зразків із різних сталей з різним покриттям і без покриття при випробуваннях на тертя кочення з точковим і лінійним контактом у середовищі мастила I-20

№ п/п	Марка сталі	Вид термообробки та технології нанесення покриття	Мікротвердість H_{100} , МПа			Товщина покриття, мкм	Довговічність до появи пітингу при контакті, $N \cdot 10^6$ цикл	
			H_{100}^n	H_{100}^o	H_{100}^d		л.к	т.к
1	40X	Без термообробки	3200	2560	3320	0	0,45	0,65
2	40X	Без термообробки + іонне азотування	7620	2560	7240	290	0,7	1,00
3	40X	Гартування	5600	5500	5420	0	16,1	23,75
4	40X	Гартування + іонне азотування	7800	4100	7240	290	18,4	26,80
5	40X	Нітрогартування	7940	5500	7630	310	29,4	44,55
6	40X	Оксинітрогартування	8320	5500	7830	320	33,7	48,1
7	ШХ15	Гартування	7210	7210	7030	0	17,3	25,1
8	ШХ15	Гартування + іонне азотування	9180	4970	7160	300	15,7	24,2
9	ШХ15	Оксинітрогартування, режим 1	8700	7200	7630	330	27,3	40,8
10	ШХ15	Оксинітрогартування, режим 2	7700	7200	7420	350	34,2	48,8
11	ШХ15	Оксинітрогартування, режим 3	7300	7200	7380	410	26,5	38,4
12	ШХ15	Нітрогартування, режим 1	8300	7200	7410	320	27,1	38,7
13	X12M	Гартування	8560	8520	8470	0	19,7	28,6
14	X12M	Нітрогартування, режим 1	9270	9140	9530	340	28,5	43,25
15	X12M	Оксинітрогартування, режим 1	9340	9140	9680	360	41,2	62,48

Примітка. H_{100}^n , H_{100}^o , H_{100}^d – мікротвердість поверхні, основи, доріжки кочення після випробувань відповідно; т.к – точковий контакт, л.к – лінійний контакт; максимальний тиск на ділянці контакту 2140 МПа.

вища за твердість зразків без термічної обробки. Таким чином, їх довговічність більш ніж на порядок перевищує довговічність азотованих та неазотованих сталей без термообробки. Дослідження показують, що іонне азотування за оптимальними режимами гартованих сталей призводить до збільшення довговічності до 35% порівняно з такими сталями без іонного азотування. Зазначимо, що при іонному азотуванні відбувається високотемпературний відпуск гартованої сталі, і азотований шар опирається на основу значно меншої твердості, ніж твердість гартованої сталі. Твердість основи після відпуску залежить від режиму азотування і може знижуватися на

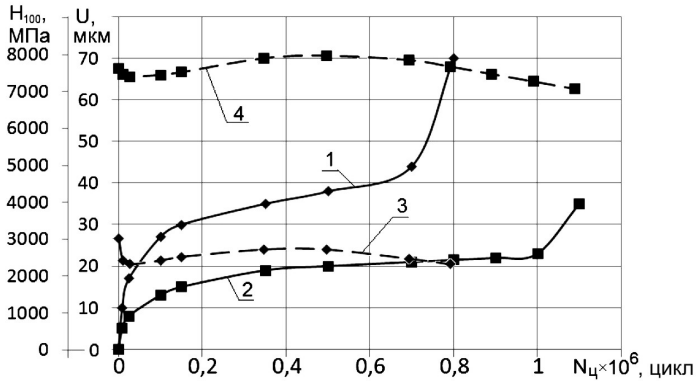


Рис. 4. Залежність глибини канавки на доріжці кочення (1, 2) та мікротвердості (3, 4) від числа циклів навантаження сталі 40X у середовищі мастила I-20: 1, 3 – без термообробки; 2, 4 – без термообробки + іонне азотування.

20...30% порівняно з твердістю гартованої сталі (таблиця). Це призводить до зменшення ефекту від азотування для підвищення довговічності композиції покриття–основа.

Альтернативою технології іонного азотування після гартування є іонне нітрогартування й оксинітрогартування. Із даних таблиці видно, що довговічність зразків зі сталей ШХ15 і Х12М після зміцнення за різними режимами нітрогартування й оксинітрогартування значно вища, ніж довговічність зразків, що піддавалися іонному азотуванню після гартування. Так, після нітрогартування зразків зі сталей ШХ15 і Х12М їх довговічність відповідно складала $38,7 \cdot 10^6$ і $43,25 \cdot 10^6$ цикл навантажень, що в 1,5 раза більше довговічності гартованих зразків. Застосування оптимальних режимів технології оксинітрогартування для сталей Х12М (в таблиці п. 15) і ШХ15 (п. 10) дозволило підвищити довговічність зразків відповідно в 1,9 і 2,2 раза порівняно з гартованими. Найвищу довговічність після оксинітрогартування мають зразки зі сталі Х12М із вмістом в її структурі 30% залишкового аустеніту. Завдяки цьому сталь має високу твердість основи після оксинітрогартування. Під дією циклічних навантажень азотистий залишковий аустеніт у поверхневому шарі перетворюється в азотистий мартенсит, який сприяє підвищенню довговічності поверхневого шару за рахунок збільшення його твердості та дисипації енергії на ділянці контакту. Зменшення твердості основи при збільшенні в її структурі вмісту залишкового аустеніту призводить до значного зниження довговічності сталі Х12М при змінному контактному навантаженні після оксинітрогартування (рис. 5).

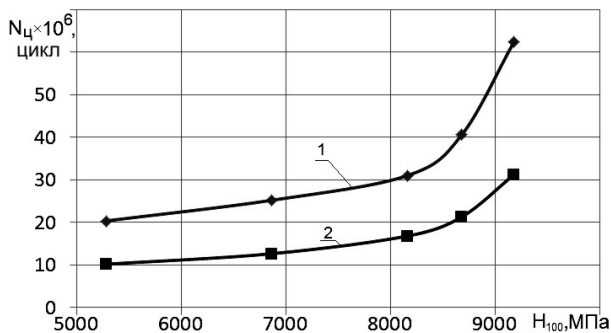


Рис. 5. Залежність довговічності сталі Х12М від твердості основи при змінному контактному навантаженні $N_{ц} \times 10^6$ цикл після оксинітрогартування (1) і гартування (2).

Результати випробувань (таблиця) показують, що довговічність зразків із досліджуваних сталей при лінійному контакті в середовищі мастила I-20 на 30...34% менша порівняно з точковим контактом при ідентичних умовах випробувань. Це зумовлено різними умовами роботи матеріалу при плоскому й об'ємному напружено-деформованому станах. Як відзначалося в [1, 2], матеріал при точковому контакті працює в умовах всебічного стиснення і має вищу несівну здатність порівняно з матеріалом при лінійному контакті.

Висновки

1. Проведені дослідження свідчать про перспективність запропонованого методу підвищення довговічності конструктивних елементів шляхом використання безводневих інтегральних технологічних процесів зміцнення композиції покриття–основа нанесенням градієнтних покриттів з оптимальними властивостями на основу високої твердості.

2. Розроблені інтегральні технології нітрогартування і оксинітрогартування із застосуванням іонного азотування в безводневих середовищах дозволяють підвищити довговічність сталей при змінному контактному навантаженні в середовищі мастила I-20 в 1,5 і 1,9...2,2 раза відповідно порівняно з довговічністю гартованих сталей. Цього можна досягти за рахунок отримання на поверхні сталей покриття з оптимальними властивостями (відсутність крихкої ϵ -фази, малий градієнт твердості по глибині покриття, значна товщина азотованого шару – 420 мкм).

3. Використання іонного азотування в безводневих середовищах для зміцнення поверхні сталей без термічної обробки підвищує їх довговічність при терті кочення в середовищі мастила I-20 в 1,44...1,6 раза. Зі збільшенням твердості основи довговічність зростає.

4. Довговічність сталей при терті кочення з лінійним контактом у середовищі мастила I-20 менша на 30...34% порівняно з довговічністю сталей при точковому контакті, що зумовлено різною здатністю матеріалу чинити опір контактній утомі при плоскому й об'ємному напружено-деформованому станах.

Резюме

Предложен новый метод технологического процесса для повышения долговечности конструктивных элементов при трении качения. Приведены результаты сравнительных экспериментальных исследований повышения долговечности сталей при трении качения с применением безводородных интегральных технологий нанесения градиентных покрытий с оптимальными свойствами, остаточными напряжениями и твердостью основы в условиях ионного азотирования и термической обработки.

1. Ковальский Б. С. Расчет деталей на местное сжатие. Харьков: ХВКИУ, 1967. 222 с.
2. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. Пер. с англ. под ред. В. Э. Наумова, А. А. Спектора. М.: Мир, 1989. 510 с.
3. Пинегин С. В. Работоспособность деталей подшипников. М.: Машгиз, 1949. 168 с.
4. Перель Л. Я. Подшипники качения: расчет, проектирование и обслуживание опор. Справочник. М.: Машиностроение, 1983. 543 с.
5. Трубин Г. К. Контактная усталость материалов для зубчатых колес. М.: Машгиз, 1962. 403 с.

6. Зинченко В. М. Инженерия поверхности зубчатых колес методами химико-термической обработки. М.: Изд. МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. 303 с.
7. Сосновский Л. А., Махутов Н. А., Трощенко В. Т. О развитии представлений об усталости металлов при объемном нагружении и трении: Тр. VI Междунар. симп. по трибофатике (ISTF 2010) (25 окт.–1 нояб. 2010, Минск). Т. 1. Минск: БГУ, 2010. С. 77–84.
8. Грозин Б. Д., Костецкий Б. И. Износ в зубчатых передачах. *Вестн. машиностроения*. 1947. № 12. С. 27–33.
9. Осипян А. В. Экспериментальное исследование питтинговых разрушений в зубчатых передачах: Тр. НАТИ. 1945. Вып. 43. 215 с.
10. Пинегин С. В. Контактная прочность и сопротивление качению. М.: Машиностроение, 1969. 245 с.
11. Карпенко Г. В. Вплив водню на механічні властивості сталі. Київ: Вид-во АН УРСР, 1960. 71 с.
12. Похмурський В. І., Хома М. С. Корозійна втома металів і сплавів. Львів: Сполом, 2008. 304 с.
13. Гельд П. В., Рябов Р. А., Мохрачева Л. П. Водород и физические свойства металлов и сплавов. М.: Наука, 1985. 232 с.
14. Торская Е. В. Моделирование накопления контактно-усталостных повреждений в двухслойном полупространстве при неполном сцеплении слоев. *Механика твердого тела*. 2011. № 6. С. 116–124.
15. Кузін М. О. Аналіз контактної міцності неоднорідних металічних систем в умовах силової тертьової взаємодії. *Наук. записки [Українська академія друкарства, Львів]*. 2011. № 3 (36). С. 251–258.
16. Каплун П. В., Паршенко К. А. Підвищення зносостійкості підшипників кочення. Хмельницький: ХНУ, 2016. 237 с.
17. Ляшенко Б. А., Каплун П. В., Златопольский Ф. И. и др. Поверхностное упрочнение зубчатых колес. Кировоград: КОД, 2015. 184 с.
18. Пат. Україна № 106181. Спосіб випробувань на контактну витривалість при коченні з проковзуванням / П. В. Каплун, В. А. Гончар, А. В. Паршенко. Чинний від 25. 04. 2016.

Поступила 04. 09. 2017