

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ СІЛЬСЬКОГО
ГОСПОДАРСТВА ІМЕНІ ПЕТРА ВАСИЛЕНКА
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

МАЛЬЦЕВ ТАРАС ВІТАЛІЙОВИЧ

УДК 621.891

ДИСЕРТАЦІЯ
ПІДВИЩЕННЯ ТРИБОТЕХНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОРШНЕВИХ КІЛЕЦЬ
БАГАТОШАРОВИМ ЗМІЦНЕННЯМ НАНОСТРУКТУРНИМ ПОКРИТТЯМ

Спеціальність 05.02.04 – Тертя та зношування в машинах

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Т.В. Мальцев
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник:
доктор технічних наук, професор

Скобло Тамара Семенівна

Харків – 2021

АНОТАЦІЯ

Мальцев Т.В. Підвищення триботехнічних властивостей поршневих кілець багат шаровим зміцненням наноструктурним покриттям. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.04 – тертя та зношування в машинах. – Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка, Міністерство освіти і науки України, Харків, 2021.

В роботі представлені нові експериментальні та теоретичні дослідження, які спрямовані на підвищення триботехнічних властивостей поршневих кілець двигунів спеціальної техніки.

На основі аналізу літературних джерел узагальнено умови експлуатації та механізми зношування поршневих кілець, існуючі методи їх зміцнення, в тому числі і сучасні технології, що базуються на наноструктурних покриттях. Встановили можливість використання багат шарових нанопокриттів, які можуть дозволити істотно підвищити стійкість тонкостінних виробів, зокрема багат шарову іонно-плазмову композицію TiN/CrN. Для вирішення цієї проблеми доцільно встановити можливість і ступінь ефективності такого технологічного процесу, що пов'язано зі специфічним матеріалом поршневого кільця - сірого чавуну. Для цього вивчили літературні джерела по відомим технологіям зміцнення поршневих кілець, а також фактори, що впливають на їх зносостійкість.

Для зміцнення робочої поверхні (пояска) кільця наносили багат шарове іонно-плазмове покриття TiN/CrN на устаткуванні типу «Булат-6». Покриття наносили при різних співвідношеннях Ti/Cr, а саме: Ti/Cr=0,17, Ti/Cr=0,27 та Ti/Cr=0,40. Метою цього було встановлення оптимального співвідношення фаз покриття з точки зору забезпечення найвищої зносостійкості.

Осадження покриття на маслороз'ємні поршневі кільця здійснювали при ідентичних параметрах, а саме: струмі дуги $I_d = 100$ А і напрузі зсуву підкладки

Усм = -200 В. По черзі наносили 6-ть шарів CrN і 5-ть – TiN для кожного зі співвідношень, попередньо розпиливши підшар чистого Cr товщиною ~ 50 нм. При цьому, для співвідношення Ti/Cr=0,17 товщина шару TiN становила – 50 нм, а CrN – 240 нм. Для співвідношення Ti/Cr=0,27, товщина шару TiN становила – 90 нм, а CrN – 200 нм. Для співвідношення Ti/Cr=0,40, товщина шару TiN становила – 140 нм, а CrN – 170 нм. Загальна товщина багат шарового покриття при вищевказаних співвідношеннях досягала 1,7 мкм. Для зміцнення були використані кільця без покриття оловом.

Дослідження якості та властивостей проводили для вихідного і зміцненого стану. При цьому оцінювали рівень мікротвердості і мінливість структури поверхні тертя при випробуваннях на тертя та зношування. Рівень залишкових напружень після зміцнення оцінювали шляхом порівняння з вихідним станом. Вимірювання виявили, що при нанесенні зміцнюючого покриття змінюється не тільки рівень напружень на 3,2 - 17,24%, але і величина замку кільця, в середньому, до 3,1%, що не відповідає вимогам нормативно-технічної документації. На основі отриманих результатів розробили технологію їх зняття перед використанням поршневих кілець після зміцнення в експлуатації. Метод полягав у використанні природнього старіння деталей після зміцнення, при якому будуть досягнуті необхідні параметри коерцитивної сили і розміри замку, які відповідають вихідному стану.

Використовували методи досліджень, які полягали в оцінці та обґрунтуванні запропонованого технологічного процесу і матеріалів багат шарового іонно-плазмового наноструктурного зміцнення виробу. Вплив запропонованого методу зміцнення на рівень напружень оцінювали неруйнівним методом контролю за коерцитивною силою до- і після зміцнення. Оцінку показників зносостійкості проводили на основі стендових випробувань на тертя та зношування. При цьому, випробування були проведені при двох швидкостях ковзання: 1,0 і 1,3 м/с. Вони обрані для оцінки рівня зношування і

структурування поверхонь тертя при переході від пружної деформації (при 1,3 м/с) до пластичної (при 1,0 м/с) з урахуванням умов експлуатації поршневих кілець на двигуні. Крім того, в окремі періоди випробувань оцінювали ступінь зміни мікротвердості поверхні тертя. Випробуваннями встановлено, що поршневі кільця зі зміцнюючим наноструктурним багат шаровим покриттям при оптимальному співвідношенні $Ti/Cr=0,17$ забезпечує підвищення їх зносостійкості в 12 - 15 разів і одночасно знижує деформацію робочої поверхні в 4 рази.

Для визначення особливостей структурних змін проводили електронномікроскопічні дослідження і мікрорентгеноспектральний аналіз поверхні тертя і прилеглої до неї зони. Після випробувань при швидкості ковзання 1,3 м/с оптимальне співвідношення Ti/Cr змінилося до 0,36 при пройденому шляху тертя 468 км. При цьому, частка Ti на доріжці тертя знизилася з 14,5% до 0,8%, а Cr - з 83,77% до 2,2%. Після випробувань при швидкості ковзання 1,0 м/с відношення Ti/Cr склало – 0,28. При цьому частка Ti знизилася до 10,76%, а Cr – до 39,08%.

Для детального аналізу процесів, що відбуваються на поверхні тертя використовували вдосконалену методику оптико-математичного опису структурування з одночасним визначенням хімічного складу в різних зонах тертя, що дозволило оцінити мінливість стану системи. Удосконалена методика оптико-математичного аналізу була адаптована для визначення змін на робочих поверхнях поршневих кілець в умовах тертя ковзання і полягала в оцінці масиву зображень похилої зони і поверхні тертя, що відносяться до певних інтервалів абсолютних величин лапласіанів і дивергенцій. Їх фізична суть полягає в описі дифузійних потоків і щільності фрагмента зображення аналізованої поверхні, що дозволило виявити утворення зон стиснення і розтягнення при циклічних навантаженнях в умовах тертя ковзання. Випробування серійних і зміцнених поршневих кілець показали, що в зоні робочої поверхні і похилій, що примикає

до неї, формуються поперечні смуги (відносно напрямку руху спряженої деталі), які відповідають різним інтервалам зон стиснення і розтягнення (скидання енергії). Одночасно виявлено і більш слабкі поздовжні смуги, шириною і періодом розташування в 70 мкм на поверхні тертя серійного кільця, що є результатом підвищеної інтенсивності і спрямованої структуризації робочої поверхні.

У зміцнених кільцях проявляється підвищена щільність поперечних смуг і їх розмір не перевищує 20 мкм, а поздовжніх – не виявлено. При цьому температура поверхні тертя досягала 70°C. Структуризація поверхні відзначається і в прилеглий зоні, що можна пояснити ефектом Сен-Венана (дією локальних деформацій на кордоні з поверхнею тертя).

Положення, які характеризують наукову новизну дисертаційної роботи полягають у наступному.

Вперше:

– отримано залежності трибологічних характеристик різних співвідношень Ti/Cr багат шарового покриття TiN/CrN та експериментально обґрунтовано оптимальне співвідношення Ti/Cr, яке забезпечує високі триботехнічні показники поршневих кілець виготовлених з сірого чавуну;

– теоретично, з використанням оптико-математичного методу на основі опису дифузійних потоків (лапласіанів) та щільності фрагментів зображення (дивергенцій) поверхонь тертя виявлено відмінність у їх якості, яка суттєво змінює трибологічні показники при різних параметрах тертя та зношування відносно таких деталей без зміцнення і дозволяє корегувати властивості поверхні тертя поршневих кілець шляхом зміни частки зміцнюючих фаз.

Отримали подальший розвиток:

– комплексні дослідження виявлених змін, що відбуваються на поверхні тертя, які полягають в тому, що незалежно від типу поверхні тертя має місце значна циклічна пластична деформація, що створює зони стиснення та

розтягнення і вони відрізняються зміною хімічного складу, щільністю, розвитком пошкоджень, схоплень, можливими руйнуваннями особливо на деталях без зміцнення;

– комплексні дослідження впливу параметрів тертя та зношування поршневих кілець спеціальної техніки на структурні зміни.

Удосконалено:

– теоретично-розрахунковий підхід оптико-математичного аналізу, який адаптовано для опису структурних змін зон тертя з урахуванням умов експлуатації поршневого кільця.

Практична значимість дисертаційної роботи полягала у тому, що на підставі одержаних результатів розроблена нова комплексна технологія підвищення триботехнічних властивостей поршневих кілець для двигунів спеціальної техніки. Вона базувалась на комплексному підході до досліджень, розробках нових технологічних процесів виробництва, керування співвідношенням зміцнюючих фаз багат шарового наноструктурного покриття та неруйнівним контролем якості. Найбільш важливі розробки захищені патентами України (№ 110145, № 117673, № 120464, 130854).

Розрахунок економічної ефективності проводили на основі зниження деформації робочої кромки поршневого кільця. Показано, що з урахуванням використання 60 кілець в одному двигуні отримали, що ефективність досягає 14220 грн.

Ключові слова: поршневі кільця, багат шарове іонно-плазмове нанопокриття, випробування на тертя та зношування, оптико-математичний аналіз, напружений стан, структуризація поверхонь тертя, мікротвердість, мікрорентгеноспектральний аналіз

Список публікацій здобувача:

1. Мальцев Т.В. Методы повышения эксплуатационных свойств чугуновых поршневых колец и перспективы применения упрочняющих ионно-плазменных нанопокровов и тонких пленок. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві*. Харків, 2017. Вип. 183. С. 88-103.
2. Скобло Т.С., Сидашенко А.И., Сатановский Е.А., Олейник А.К., Мальцев Т.В. Особенности изнашивания маслосъемных поршневых колец с покрытием олова при стендовых испытаниях на трение и износ. *Физико-химическая механика материалов*. 2017. № 4. С. 71-77. (Scopus)
3. Мальцев Т.В. Комплексная оценка остаточных напряжений в поршневых кольцах. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2017. № 10. С. 80-87.
4. Skoblo T.S., Sidashenko A.I., Garkusha I.E., Taran A.V., Muratov R.M., Maltsev T.V. Influence of Increased Sliding Speed on The Structure and Properties of Piston Rings with Ion-Plasma Coating. *Problems of Atomic Science and Technology. Series: Plasma Physics*. 2018. № 6 (118). P. 304-307. (Scopus)
5. Skoblo T.S., Sidashenko A.I., Maltsev T.V., Romanchenko V.N. Assessment of the Properties of Hardened by Nanocoating Oil Scraper Piston Rings by an Optic-Mathematical Method. *Problems of Tribology*. 2019. 92 (2). P. 20-24
6. Скобло Т.С., Сидашенко А.И., Гаркуша И.Е. Таран В.С., Муратов Р.М., Мальцев Т.В. Оптико-математический анализ моделирования структуризации упрочнённых поверхностей поршневых колец при эксплуатации. *Металлофизика и новейшие технологии*. 2019. Том 41, Вып. 3. С. 349-362. (Scopus)
7. Скобло Т.С., Сидашенко А.И., Мальцев Т.В., Таран А.В., Муратов Р.М. Ионно-плазменное упрочнение поршневых колец. *Сварочное производство*. 2019. № 9. С.46-53.

8. Skoblo T.S., Sidashenko O.I., Garkusha I.E., Taran V.S., Muratov R.M., Satanovskiy E.A., Oleynik O.K., Maltsev T.V., Romanchenko V.M., Martynenko O.D. Structure and Properties of Piston Rings with Ion-Plasma Multilayer Nanohardening. *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології*. 2019. т. 17, № 4. Р. 661–678. (Scopus)

9. Скобло Т.С., Мальцев Т.В., Таран А.В., Таран В.С., Муратов Р.М., Сатановський Є.А., Романченко В.М. Нова технологія зміцнення поршневих кілець багатопшаровим наноструктурним покриттям. *Промисловість в фокусі*. 2020. № 8(91). С. 56-57.

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

1. Maltsev T., Yemelyanova Ye.S. Complex improving performance of thin parts by using multilayer thin films and nanostructured coatings. *Young Researches in The Global World : Vistas and Challenges: Book of abstracts of II Forum for young Researches*. Kharkiv, 2016. P. 203-204.

2. Скобло Т.С., Сидашенко А.И., Сатановский Е.А., Мальцев Т.В. Метод оценки напряженно-деформированного состояния поршневых колец упрочненных ионно-плазменным покрытием. *Фізичні та комп'ютерні технології* : Матеріали 22-ї міжнародної науково-практичної конференції. Харків, 2016. С. 241-244.

3. Maltsev T. Quality control method of piston rings that hardened by film coatings. *Welding and Related Technologies : Abstracts of IX International Conference of Young Scientists*. Kyiv, 2017. P. 236.

4. Skoblo T.S., Romanyuk C.P., Maltsev T.V. Application of nanotechnology in mechanical engineering. *Системи розроблення та постановлення продукції на виробництво. Індустрія 4.0. Сучасний напрямок автоматизації та обміну даними у виробничих технологіях* : Матеріали II Міжнародна науково-практична конференція. Суми, 2017. Р. 62.

5. Скобло Т.С., Романюк С.П., Мальцев Т.В. Использование оптико-математического метода для оценки структурной неоднородности деталей.

Энергосбережение и эффективность в технических системах : Материалы IV Международной научно–технической конференция студентов, молодых ученых и специалистов. Тамбов (РФ), 2017. С. 429-430.

6. Skoblo T.S., Sidashenko A.I., Garkusha I.E. Taran A.V., Muratov R.M., Maltsev T.V. Influence of Increased Sliding Speed on the Structure and Properties of Piston Rings with Ion-Plasma Coating. *School on Plasma Physics and Controlled Fusion* : Book of Abstracts of International Conference. Kharkiv, 2018. P. 180.

7. Мальцев Т.В. Багатошарове іонно-плазмове нанозміцнення поршневих кілець. Молодь і сільськогосподарська техніка у XXI сторіччі : Матеріали XVII-го міжнародного форуму молоді. Харків, 2021. С. 136.

Праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

1. Спосіб контролю якості поршневих кілець, зміцнених плівковими покриттями: пат 110145 Україна: МПК (2016.01), G01N27/00, G01N3/317. № у 2016 03524; заявл. 04.04.2016; опубл. 26.09.2016, Бюл. 18. 4 с.

2. Спосіб прогнозування довговічності ефективної товщини багатошарового зміцнюючого покриття поршневих кілець: пат. 117673 Україна: МПК (2017.01), F16J 9/00. № у 2016 11183; заявл. 07.11.2016; опубл. 10.07.2017, Бюл. 13. 4 с.

3. Спосіб підвищення експлуатаційної стійкості поршневих кілець, зміцнених багатошаровими нанопокриттями: пат. 120464 Україна: МПК (2017.01), C23C 4/10 (2016.01), G01N 3/56 (2006.01), B82Y 30/00. № у 2017 00018; заявл. 03.01.2017; опубл. 10.11.2017, Бюл. № 21. 4 с.

4. Спосіб прогнозування дифузії компонента основи поршневих кілець в іонно-плазмове покриття при різних параметрах тертя: пат. 130854 Україна: МПК (2018.01), G01N 3/56 (2006.01), G01N 13/00, F16J 9/00. № у 2018 07425; заявл. 02.07.2018; опубл. 26.12.2018, Бюл. № 24. 4 с.

ABSTRACT

Maltsev T.V. Improving the tribotechnical properties of piston rings by multilayer hardening with nanostructured coating. – On the rights of the manuscript.

The dissertation for the scientific degree of a candidate of technical sciences on a specialty 05.02.04 - Friction and wear in machines. – Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2021.

The dissertation presents new experimental and theoretical studies aimed at improving the tribotechnical properties of the piston rings of engines of special equipment.

Based on the analysis of literature sources, operating conditions and mechanisms of piston rings wear, the existing methods of hardening piston rings, including modern technologies based on nanostructured coatings, are generalized. The possibility of using multilayer nanocoatings, which can significantly increase the stability of thin-walled products, in particular a multilayer ion-plasma composition TiN/CrN, has been established. To solve this problem, it is advisable to establish the possibility and degree of efficiency of such a technological process, which is associated with a specific material of the piston ring – gray cast iron. To do this, we studied the literature on the known technologies for hardening the piston rings, as well as the factors influencing their operational stability.

To harden the working surface of the ring was applied a TiN/CrN multilayer ion-plasma coating on equipment type "Bulat-6". The coating was applied at different ratios of Ti/Cr, namely: $Ti/Cr = 0.17$, $Ti/Cr = 0.27$ and $Ti/Cr = 0.40$. The purpose of this was to establish the optimal ratio of the coating phases in terms of ensuring the highest wear resistance. The deposition of the coating on the oil scraper piston rings was carried out at identical parameters, namely: arc current $I = 100$ A and the bias voltage of the substrate $U = -200$ V. Alternately applied 6 layers of CrN and 5 - TiN for each of the ratios, pre-spraying a sublayer of pure Cr with a thickness of ~ 50 nm. In this case, for the ratio $Ti/Cr = 0.17$, the thickness of the TiN layer was - 50 nm, and CrN - 240 nm. For the ratio Ti/Cr

= 0.27, the thickness of the TiN layer was - 90 nm, and CrN - 200 nm. For the Ti/Cr ratio = 0.40, the thickness of the TiN layer was 140 nm and CrN was 170 nm. The total thickness of the multilayer coating at the above ratios reached 1.7 μm . Tin-free rings were used for hardening.

Studies of quality and properties were performed for the initial and hardened state. The level of microhardness and variability of the surface friction structure during tests for friction and wear were evaluated. The level of residual stresses after hardening was evaluated by comparison with the initial state. Measurements revealed that when applying a hardening coating changes not only the stress level by 3.2 – 17.24%, but also the size of the ring lock, on average, up to 3.1%, which does not meet the requirements of regulatory and technical documentation. Based on the obtained results, the technology of their hardening before the use of piston rings after hardening in operation was developed. The method consisted in the use of natural aging of parts after hardening, which will achieve the required parameters of the coercive force and the dimensions of the lock, which correspond to the initial state.

Research methods were used, which consisted in the evaluation and justification of the proposed technological process of hardening and materials of multilayer ion-plasma nanostructured hardening of the product. The influence of the proposed method of hardening on the stress level was evaluated by the non-destructive method of controlling the coercive force before and after hardening. Evaluation of wear resistance was performed on the basis of bench tests for friction and wear. In this case, the tests were performed at two sliding speeds: 1.0 and 1.3 m/s. They are selected to assess the level of wear and the processes of structure formation of friction surfaces during the transition from elastic deformation (at 1.3 m/s) to plastic (at 1.0 m/s) taking into account the piston rings operating conditions on the engine. In addition, in some test periods, the degree of change in the microhardness of the friction surface was evaluated. Tests have shown that piston rings with the hardening nanostructured multilayer coating at the optimal ratio

Ti/Cr=0.17 increases their operational stability by 12 – 15 times and at the same time reduces the deformation of the working surface by 4 times.

To determine the features of structural changes, electron microscopic studies and micro-X-ray spectral analysis of the friction surface and the adjacent area were performed. After testing at a sliding speed of 1.3 m/s, the Ti/Cr ratio changed in comparison with their initial ratio to 0.36 after the friction path of 468 km. At the same time, the share of Ti on the friction track decreased from 14.5% to 0.8%, and Cr – from 83.77% to 2.2%. After operation at a sliding speed of 1.0 m/s, the Ti/Cr ratio was 0.28. The share of Ti decreased to 10.76%, and Cr – to 39.08%.

For a detailed analysis of the processes occurring on the friction surface, an improved method of optical-mathematical description of structure formation was used with simultaneous determination of the chemical composition in different friction zones, which allowed to assess of system state variability. The improved technique of optical-mathematical analysis was adapted to determine changes in the working surfaces of the piston rings under sliding friction conditions and consisted in estimating an array of images of the inclined zone and the friction surface, which belong to certain intervals of absolute values of Laplacians and divergences. Their physical essence is to describe the diffusion fluxes and the density of the analyzed surface image fragment, which revealed the formation of compression and tension zones at the cyclic loads under conditions of sliding friction. Tests of serial and hardened piston rings showed that in the area of the working surface and adjacent to it inclined transverse bands are formed (relative to the motion of the conjugate part), which correspond to different intervals of zones of compression and rarefaction (energy discharge). At the same time, weaker longitudinal bands with a width and period location of 70 μm on the friction surface of the serial ring were detected, which is the result of increased intensity and directed structuring of the working surface.

The hardened rings shown the increased density of cross strips and their size does not exceed 20 microns, and longitudinal is not revealed. The friction surface temperature reached 70 °C. Surface structuring is also observed in the adjacent zone, which can be explained by the Saint-Venant effect (the action of local deformations on the boundary with the friction surface).

The provisions that characterize the scientific novelty of the dissertation are as follows.

For the first time:

- the dependences of different Ti/Cr ratios of the multilayer TiN/CrN coating are obtained and the optimal Ti/Cr ratio is experimentally substantiated, which provides high tribotechnical indicators of piston rings made of gray cast iron;

- theoretically, using the optical-mathematical method based on the description of diffusion fluxes (Laplacians) and the density of image fragments (divergences) of friction surfaces revealed a difference in their quality, which significantly changes the tribological characteristics at different parameters of friction and wear relative to such parts without hardening, and allows to adjust properties of the friction surface of the piston rings by changing the proportion of hardening phases.

Received further development:

- comprehensive studies of the revealed changes, that occur on the friction surface, which is that regardless of the type of friction surface there is a significant cyclic plastic deformation, which creates compression and tension zones and they differ in chemical composition, density with the development of damage, grips, possible destruction, especially on parts without hardening;

- comprehensive studies of the influence of the parameters of friction and wear of the special machines piston rings on structural changes.

Improved:

- theoretical and computational approach to optical-mathematical analysis, which is adapted to describe the structural changes of the friction zones taking into account the operating conditions of the piston ring.

The practical significance of the obtained results was that on the basis of the performed developments and the obtained results a new complex technology of increasing the tribotechnical properties of piston rings for engines of special equipment was developed. This was based on a comprehensive approach to research, development of new technological processes of production,

modified by multilayer nanostructured coatings and non-destructive quality control. The most important developments are protected by patents of Ukraine.

The calculation of economic efficiency was performed on the basis of reducing the deformation of the working edge. It is shown that taking into account the use of 60 rings in one engine, the efficiency reaches 14220 UAH.

Keywords: piston rings, multilayer ion-plasma nanocoating, friction and wear tests, optical-mathematical analysis, stress state, diffusion processes, surface structuring, microhardness, micro X-ray spectral analysis

List of applicant's publications:

1. Maltsev T.V. Methods for improving the performance properties of cast iron piston rings and prospects for the use of hardening ion-plasma nanocoatings and thin films. *Bulletin of the Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture. Resource-saving technologies, materials and equipment in repair production*. Kharkiv, 2017. Vol. 183. P. 88-103.
2. Skoblo T.S., Sidashenko A.I., Satanovskiy Ye.A., Oleynik A.K., Maltsev T.V. Features of wear of oil scraper piston rings with a tin coating during bench tests for friction and wear. *Physical and chemical mechanics of materials*. 2017. № 4. P. 71-77.
3. Maltsev T.V. Comprehensive assessment of residual stresses in piston rings. *Technical service of agro-industrial, forest and transport complexes*. 2017. № 10. P. 80-87.
4. Skoblo T.S., Sidashenko A.I., Garkusha I.E. Taran A.V., Muratov R.M., Maltsev T.V. Influence of Increased Sliding Speed on The Structure and Properties of Piston Rings with Ion-Plasma Coating. *Problems of Atomic Science and Technology. Series: Plasma Physics*. 2018. № 6 (118). P. 304-307.
5. Skoblo T.S., Sidashenko A.I., Maltsev T.V., Romanchenko V.N. Assessment of the Properties of Hardened by Nanocoating Oil Scraper Piston Rings by an Optic-Mathematical Method. *Problems of Tribology*. 2019. 92 (2). P. 20-24

6. Skoblo T.S., Sidashenko A.I., Garkusha I.E., Taran V.S., Muratov R.M., Maltsev T.V. Optic-mathematical analysis of modeling the structuring of hardened surfaces of piston rings during operation. *Metal physics and the latest technologies*. 2019. Vol 41, Is. 3. P. 349-362.
7. Skoblo T.S., Sidashenko A.I., Maltsev T.V., Taran A.V., Muratov R.M. Ion-plasma hardening of piston rings. *Welding production*. 2019. № 9. P.46-53.
8. Skoblo T.S., Sidashenko O.I., Garkusha I.E., Taran V.S., Muratov R.M., Satanovskiy E.A., Oleynik O.K., Maltsev T.V., Romanchenko V.M., Martynenko O.D. Structure and Properties of Piston Rings with Ion-Plasma Multilayer Nanohardening. *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології*. 2019. т. 17, № 4. P. 661–678.
9. Skoblo T.S., Maltsev T.V., Taran A.V., Taran V.S., Muratov R.M., Satanovskiy E.A., Romanchenko V.M. New technology of hardening piston rings with a multilayer nanostructured coating. *Industry in focus*. 2020. № 8(91). P. 56-57.

Works certifying the approbation of the dissertation materials:

1. Maltsev T., Yemelyanova Ye.S. Complex improving performance of thin parts by using multilayer thin films and nanostructured coatings. *Young Researches in The Global World : Vistas and Challenges: Book of abstracts of II Forum for young Researches*. Kharkiv, 2016. P. 203-204
2. Skoblo T.S., Sidashenko A.I., Satanovskiy Ye.A., Maltsev T.V. Method of assessing the stress-strain state of piston rings hardened by ion-plasma coating. *Physical and computer technologies: Proceedings of the 22nd International Scientific and Practical Conference*. Kharkiv, 2016. P. 241-244
3. Maltsev T. Quality control method of piston rings that hardened by film coatings. *Welding and Related Technologies : Abstracts of IX International Conference of Young Scientists*. Kyiv, 2017. P. 236.
4. Skoblo T.S., Romanyuk C.P., Maltsev T.V. Application of nanotechnology in mechanical engineering. *Systems of product development and production. Industry 4.0. Modern*

direction of automation and data exchange in production technologies : Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference. Sumy, 2017. P. 62.

5. Skoblo T.S., Romanyuk C.P., Maltsev T.V. Using the optic-mathematical method to assess the structural heterogeneity of parts. *Energy saving and efficiency in technical systems: Materials of the IV International Scientific and Technical Conference of Students, Young Scientists and Specialists*. Tambov, 2017. P. 429-430.

6. Skoblo T.S., Sidashenko A.I., Garkusha I.E. та інші. Influence of Increased Sliding Speed on the Structure and Properties of Piston Rings with Ion-Plasma Coating. *School on Plasma Physics and Controlled Fusion* : Book of Abstracts of International Conference. Kharkiv, 2018. P. 180.

7. Maltsev T.V. Multilayer ion-plasma nanohardening of piston rings. *Youth and agricultural machinery in the XXI century* : Proceedings of the XVII International Youth Forum. Kharkiv, 2021. P. 136.

Works that additionally reflect the scientific results of the dissertation:

1. The method of quality control of piston rings hardened with film coatings: pat. 110145 Ukraine: MPK (2016.01), G01N27/00, G01N3/317. № u 2016 03524; decl. 04.04.2016; publ. 26.09.2016, Bul. 18. 4 p.

2. Method of predicting durability of effective thickness of multilayer hardening coating of piston rings: pat. 117673 Ukraine: MPK (2017.01), F16J 9/00. № u 2016 11183; decl. 07.11.2016; publ. 10.07.2017, Bul. 13. 4 p.

3. Method of increasing operational stability of piston rings hardened with multilayer nanocoatings: pat. 120464 Ukraine: MPK (2017.01), C23C 4/10 (2016.01), G01N 3/56 (2006.01), B82Y 30/00. № u 2017 00018; decl. 03.01.2017; publ. 10.11.2017, Bul. № 21. 4 p.

4. Method of predicting diffusion of piston ring base component into ion-plasma coating at different friction parameters: pat. 130854 Ukraine: MPK (2018.01), G01N 3/56 (2006.01), G01N 13/00, F16J 9/00. № u 2018 07425; decl. 02.07.2018; publ. 26.12.2018, Bul. № 24. 4 p.

ЗМІСТ

	с.
ВСТУП	20
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ УМОВ РОБОТИ, МЕХАНІЗМІВ ЗНОШУВАННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЙ ЗМІЦНЕННЯ ПОРШНЕВИХ КІЛЕЦЬ ДВИГУНІВ	25
1.1 Аналіз умов роботи і механізмів зношування поршневих кілець двигунів	25
1.2 Аналіз широко використовуваних методів зміцнення поршневих кілець, особливості структуроутворення покриттів та зміни триботехнічних властивостей	27
1.3 Триботехнічні властивості іонно-плазмових і багатокомпонентних покриттів	33
1.4 Особливості структуроутворення і триботехнічні властивості багат шарових іонно-плазмових покриттів	39
1.5 Постановка мети і завдань досліджень	63
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИ І МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗНОСОСТІЙКОСТІ МАСЛОЗ'ЄМНИХ ПОРШНЕВИХ КІЛЕЦЬ ДВИГУНІВ	66
2.1 Методологічний підхід та етапи досліджень зносостійкості маслоз'ємних поршневих кілець	66
2.2 Метод зміцнення маслоз'ємних поршневих кілець двигунів	68
2.3 Методика визначення трибологічних характеристик та якості робочих поверхонь поршневих кілець	72
2.4 Математичне планування експерименту. Виявлення факторів впливу властивостей покриттів на мікротвердість та швидкість зношування	77
2.5 Оптико-математичний метод оцінки змін якості поверхні тертя поршневих кілець	79
Висновки до другого розділу	88
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТРИБОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРШНЕВИХ КІЛЕЦЬ,	

ЗМІЦНЕНИХ БАГАТОШАРОВОЮ НАНОЗМІЦНЮЮЧОЮ КОМПОЗИЦІЄЮ TiN/CrN	91
3.1 Результати вимірювання лінійних розмірів замків поршневих кілець та коерцитивної сили їх робочих зон після нанесення покриттів	91
3.2 Вплив мінімальної швидкості ковзання на зносостійкість зміцнених поршневих кілець	94
3.3 Вплив максимальної швидкості ковзання на зносостійкість зміцнених поршневих кілець	101
Висновки до третього розділу	108
РОЗДІЛ 4 ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПОРШНЕВИХ КІЛЕЦЬ, ЗМІЦНЕНИХ ЗА РІЗНИХ СПІВВІДНОШЕНЬ Ti/Cr	111
4.1 Вплив швидкості ковзання на швидкість зношування поршневих кілець	111
4.2 Хімічний склад поверхні тертя зміцнених поршневих кілець при різних швидкостях ковзання	117
4.3 Оцінка товщини зміцненого шару в системі «покриття-основа» поршневих кілець та її прогнозування при експлуатації	121
Висновки до четвертого розділу	125
РОЗДІЛ 5 РЕЗУЛЬТАТИ ОЦІНКИ ЯКОСТІ ПОВЕРХОНЬ ТЕРТЯ ПОРШНЕВИХ КІЛЕЦЬ ОПТИКО-МАТЕМАТИЧНИМ МЕТОДОМ ТА ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТЕХНОЛОГІЇ ЇХ ЗМІЦНЕННЯ	129
5.1 Обробка зображень поверхонь тертя поршневих кілець	129
5.2 Теоретичне обґрунтування особливостей зносостійкості маслоз'ємних поршневих кілець в умовах тертя ковзання	133
5.3 Теоретичне обґрунтування впливу параметрів тертя на стійкість структуроутворення у зміцненому шарі поршневих кілець	136
5.4 Оцінка економічної ефективності технології зміцнення багат шаровим іонно-плазмовим покриттям TiN/CrN маслоз'ємних поршневих кілець	154

Висновки до п'ятого розділу	157
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	163
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	167
ДОДАТКИ	186
ДОДАТОК А Перелік опублікованих робіт за темою дисертації	187
ДОДАТОК А Акт промислової апробації	190
ДОДАТОК А Нагороди	191
ДОДАТОК А Патенти	194
ДОДАТОК Б Результати оцінки зносостійкості та структуроутворення поршневих кілець оптико-математичним методом	198
ДОДАТОК В Результати розрахунків гістограм Бозе з урахуванням М-трійок	232

ВСТУП

Актуальність теми. Підвищення зносостійкості виробів, що працюють в умовах інтенсивного тертя та зношування є актуальним, зокрема для деталей циліндропоршневої групи двигунів внутрішнього згорання, в тому числі і для двигунів техніки спеціального призначення.

За даними досліджень відмов деталей циліндропоршневої групи таких двигунів виявлено, що після 400 000 км пробігу найбільшу кількість відмов (100%) припадає на маслоз'ємні поршневі кільця. При цьому причиною їх відмов є інтенсивне зношування робочої поверхні. Така тенденція обумовлена тонкостінною конструкцією виробу, виготовленого з крихкого матеріала – сірого чавуну і складними режимами експлуатації (низькі швидкості ковзання – до 1,3 м/с).

Зношування поршневих кілець є складним фізико-механічним процесом, і вимагає розробок спеціальних рішень для підвищення їх зносостійкості. Для цієї мети перспективним є нанесення на робочу поверхню спеціального зміцнюючого наноструктурного покриття. Аналізом численних досліджень встановлено, що нанесення наноструктурних покриттів з високим рівнем властивостей забезпечує технологія іонно-плазмового їх осадження. Така технологія забезпечує багаторазове підвищення рівня фізико-механічних і триботехнічних властивостей в порівнянні з гальванічним хромуванням, лазерним і плазмовим методами зміцнення поверхні. Окремо слід відзначити екологічність і низький рівень енерговитрат такого технологічного процесу відносно вищезазначених.

Запропонована технологія зміцнення повинна передбачати не тільки підвищення стійкості до зношування, а й запобігати підвищенню напружено-деформованого стану матеріала, забезпечувати потрібні властивості. Їх розробка потребує оцінки змін властивостей та контролю якості нових технологічних процесів при виробництві, які ефективно можливо використовувати. Це спеціальні методи неруйнівного контролю і, особливо, прогресивний оптико-математичний метод.

Останній зарекомендував себе як найбільш ефективний для локальної оцінки зміни структуроутворення досліджуваної поверхні з урахуванням впливу обраної технології зміцнення, а також умов експлуатації.

Метою роботи є підвищення якості та триботехнічних властивостей робочої поверхні чавунних маслостійких поршневих кілець двигунів техніки спеціального призначення з сірого чавуну нанесенням іонно-плазмового багатопшарового зміцнюючого покриття.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Проаналізувати виявлену інформацію за умовами роботи та механізмами зношування поршневих кілець, методами їх зміцнення і досягаємим властивостям.
2. Розробити методологічний підхід для проведення досліджень з використанням експериментальних, теоретичних підходів для оцінки особливостей структурних змін при терті та зношуванні маслостійких поршневих кілець.
3. Запропонувати та випробувати новий технологічний процес зміцнення багатопшаровою наноконпозицією робочої поверхні маслостійких поршневих кілець при використанні різних співвідношень зміцнюючих фаз.
4. На основі виконаного аналізу оцінити вплив запропонованого способу зміцнення на рівень напружено-деформованого стану поршневих кілець і розробити метод контролю і бракувальні норми за рівнем залишкових напружень, що формуються в матеріалі поршневих кілець при зміцненні, та спосіб їх зниження.
5. Провести стендові порівняльні випробування на терті та зношування зміцнених поршневих кілець з сірого чавуну і оцінити характер і швидкість їх зношування в порівнянні з серійними в умовах виробництва.
6. Запропонувати теоретичний підхід використання оптико-математичного аналізу для визначення характеру формування залишкових напружень і структуроутворення поверхонь тертя поршневих кілець.
7. Оцінити технологічну та економічну ефективність нової технології зміцнення поршневих кілець для двигуна техніки спеціального призначення.

Об'єктом досліджень є процеси тертя та зношування зміцненої робочої поверхні поршневих кілець.

Предметом досліджень є закономірності зміни трибологічних властивостей поршневих кілець з багатошаровим зміцненням наноструктурним покриттям.

Положення, які характеризують наукову новизну дисертаційної роботи полягають у наступному.

Вперше:

- отримано залежності трибологічних характеристик різних співвідношень Ti/Cr багатошарового покриття TiN/CrN та експериментально обґрунтовано оптимальне співвідношення Ti/Cr, яке забезпечує високі триботехнічні показники поршневих кілець виготовлених з сірого чавуну;

- теоретично, з використанням оптико-математичного методу на основі опису дифузійних потоків (лапласіанів) та щільності фрагментів зображення (дивергенцій) поверхонь тертя виявлено відмінність у їх якості, яка суттєво змінює трибологічні показники при різних параметрах тертя та зношування відносно таких деталей без зміцнення і дозволяє корегувати властивості поверхні тертя поршневих кілець шляхом зміни частки зміцнюючих фаз.

Отримали подальший розвиток:

- комплексні дослідження виявлених змін, що відбуваються на поверхні тертя, які полягають в тому, що незалежно від типу поверхні тертя має місце значна циклічна пластична деформація, що створює зони стиснення та розтягнення і вони відрізняються зміною хімічного складу, щільністю, розвитком пошкоджень, схоплень, можливими руйнуваннями особливо на деталях без зміцнення;

- комплексні дослідження впливу параметрів тертя та зношування поршневих кілець спеціальної техніки на структурні зміни.

Удосконалено:

- теоретично-розрахунковий підхід оптико-математичного аналізу, який адаптовано для опису структурних змін зон тертя з урахуванням умов експлуатації поршневого кільця.

Практична значимість дисертаційної роботи полягала у тому, що на підставі одержаних результатів розроблена нова комплексна технологія підвищення триботехнічних властивостей поршневих кілець для двигунів спеціальної техніки. Вона базувалась на комплексному підході до досліджень, розробках нових технологічних процесів виробництва, керування співвідношенням зміцнюючих фаз багатошарового наноструктурного покриття та неруйнівним контролем якості. Найбільш важливі розробки захищені патентами України (№ 110145, № 117673, № 120464, 130854).

Робота виконана на кафедрі технологічних систем ремонтного виробництва Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка.

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно та викладені у 20 публікаціях. У наукових роботах, що опубліковані у співавторстві, здобувачу належать: визначення напрямів розробок, аналіз умов роботи поршневих кілець [Додаток А – 1, 2, 8, 10, 13, 14], оцінка напружено-деформованого стану неруйнівним методом за коерцитивною силою [Додаток А – 2, 11, 12, 17], дослідження триботехнічних властивостей та змін якості поверхонь тертя [Додаток А – 3, 6, 7, 9, 15-20], зміни у структуроутворенні поверхні тертя поршневих кілець оптико-математичним методом [Додаток А – 4, 5].

Апробація результатів роботи. Основні положення та результати теоретичних і експериментальних досліджень дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися та отримали позитивні відгуки на міжнародних науково-практичних конференціях: II Forum for young Researches "Young Researches in The Global World: Vistas and Challenges", O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv (Харків, 20 жовтня, 2016 р.); VI науково-методична конференція «Современные проблемы и технологии обеспечения качества конструкционных материалов», Харківський національний автомобільно-дорожній університет (Харків, 22-23 вересня, 2016 р.); 22-га міжнародна науково-практична конференція «Физические и компьютерные технологии», Харківський національний економічний університет імені Семена

Кузнеця, (Харків, 7-9 грудня 2016 р.); IX International Conference of Young Scientists on Welding and Related Technologies (WRTYS), E.O. Paton Electric Welding Institute of The National Academy of Sciences of Ukraine, (Київ, 23–26 травня, 2017 р.); II Міжнародна науково-практична конференція «Системи розроблення та постановлення продукції на виробництво. Індустрія 4.0. Сучасний напрям автоматизації та обміну даними у виробничих технологіях», Сумський державний університет, (Суми, 22-26 травня, 2017 р.); IV Міжнародна науково–технічна конференція студентів, молодих вчених та спеціалістів «Энергосбережение и эффективность в технических системах», Тамбовський державний технічний університет, (м. Тамбов, 10-12 липня 2017 р.); XIV Міжнародний форум молоді «Молодь і сільськогосподарська техніка у XXI сторіччі», Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка (Харків, 5-6 квітня 2018 р.); International Conference-School on Plasma Physics and Controlled Fusion, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна (Харків, 10-13 вересня, 2018 р.); XVII Міжнародний форум молоді «Молодь і сільськогосподарська техніка у XXI сторіччі», Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка (Харків, 25-26 березня 2021).

Публікації. Основні результати роботи опубліковані в 9 наукових працях, у тому числі: 6 статей у фахових виданнях України (з них 4 включені до бази Scopus); 2 статті одноосібно; 1 публікація у закордонному виданні; 7 у збірниках доповідей наукових конференцій, отримано 4 патенти на винахід.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації складає 237 сторінок, у тому числі 3 додатки. Обсяг основного тексту дисертації становить 185 сторінки, 74 рисунки, 33 таблиці. Список використаних джерел нараховує 167 найменувань.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ УМОВ РОБОТИ, МЕХАНІЗМІВ ЗНОШУВАННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЙ ЗМІЦНЕННЯ ПОРШНЕВИХ КІЛЕЦЬ ДВИГУНІВ

Перш ніж приступити до розробки технологічного процесу зміцнення маслоз'ємних поршневих кілець двигуна спеціальної техніки проаналізували умови роботи і механізми зношування поршневих кілець, використовуваних матеріалів, технологічних процесів зміцнення аналогічних деталей, які можуть забезпечити стабільність їх якості та високу зносостійкість при експлуатації.

1.1. Аналіз умов роботи і механізмів зношування поршневих кілець двигунів

Маслоз'ємні поршневі кільця призначені для видалення надлишка моторної оливи з поверхні циліндра. Окрім видалення зайвої оливи, вони залишають найтонший її шар, для мінімізації сили тертя між поршнем і циліндром. Такі вироби працюють при терті ковзанні у зворотно-постувальному русі в різних режимах мащення.

Як відомо, на триботехнічні властивості поршневих кілець впливають широкий спектр чинників, зокрема: питомий тиск у зоні тертя, температура у трибосистемі, когезійна міцність поверхневого шару, співвідношення адгезії між покриттям і основним металом кільця та покриттям і поверхнею спряженої деталі, напружений стан виробу, параметри шорсткості, конструкція і матеріал виготовлення кільця, матеріал покриття [1].

За даними проведених досліджень відмов деталей циліндропоршневої групи двигунів техніки спеціального призначення виявлено, що після 400 000 км пробігу найбільша кількість відмов (100%) характерна для маслоз'ємних поршневих кілець (рис. 1.1). При цьому причиною їх відмов є інтенсивне зношування робочої поверхні. Така тенденція обумовлена тонкостінною конструкцією виробу, виготовленого з крихкого

матеріала – сірого чавуну і складними режимами експлуатації (низька швидкість ковзання поршневої групи – до 1,3 м/с).

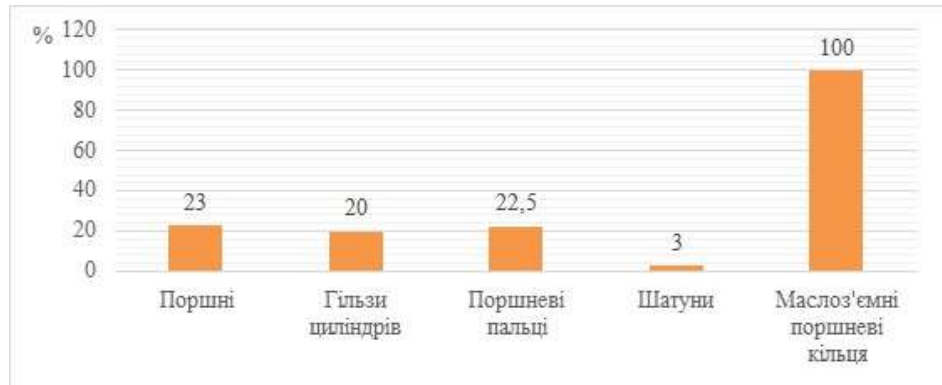


Рис. 1.1 – Відсоток відмов деталей циліндропоршневої групи двигунів техніки спеціального призначення

Зношування маслоз'ємних поршневих кілець при експлуатації призводить до суттєвого підвищення димності вихлопів, збільшенні нагаровідкладення в випускному тракті двигуна і перевитраті моторної оливи. Це створює необхідність проводити позаплановий ремонт двигуна для заміни зношених кілець, що потребує додаткових витрат.

Відомо, що на поршневі кільця двигунів внутрішнього згоряння діють різні механізми зношування, зокрема: ерозійне зношування газовим потоком, втомне зношування в умовах циклічних навантажень, абразивне зношування твердими частинками і продуктами зносу, а також окислювальне зношування [2]. Враховуюючи, що поршневі кільця працюють в умовах тертя ковзання, до вищенаведеного переліку механізмів зношування слід додати також знос в умовах схоплювання першого і другого роду [3].

Окрім того, автором досліджень [3] встановлено, що при відносно низьких швидкостях ковзання (до 1 м/с) в середовищі оливи МС-20 та в умовах сухого тертя при різних навантаженнях домінує окисний механізм зношування. Він супроводжується розвитком пластичної деформації у тонких шарах поверхонь тертя, утворенням вторинних захисних структур та помірним зносом. При збільшенні швидкості ковзання

понад 1 м/с виникає і розвивається процес схоплювання другого роду, який викликає процес інтенсивного зношування поверхонь тертя. Слід зазначити, що для досліджень в умовах мащення оливою МС-20 та в умовах сухого тертя були використані сталеві зразки з різним рівнем твердості.

Враховуючи вищевикладене, для забезпечення високих триботехнічних властивостей поршневих кілець виникає необхідність розглянути відомі методи та матеріали зміцнення робочої поверхні таких виробів з урахуванням умов їх експлуатації. Окрім того, для забезпечення високих експлуатаційних характеристик роботи двигуна протягом тривалого часу експлуатації, поршневі кільця повинні забезпечувати низький коефіцієнт тертя та високу зносостійкість [4].

1.2 Аналіз широко використовуваних методів зміцнення поршневих кілець, особливості структуроутворення покриттів та зміни триботехнічних властивостей

В роботі [5] застосовували іонно-плазмове і лазерне зміцнення робочих поверхонь для обробки поршневих кілець з високоміцного чавуну ВЧ50-1,5 для дизеля 6ЧН 25 34. В якості зміцнюючого матеріалу, який наносили напиленням на установці «Булат-3Т», був обраний молібден.

Порівняльні випробування на зносостійкість проводили на зразках поршневих кілець:

- з хромовим покриттям;
- зміцнених лазерним променем;
- напилених молібденом.

Результати проведених випробувань показали, що:

- найбільший знос характерний для хромованих поршневих кілець;
- найменший знос відповідає поршневим кільцям з молібденовим покриттям;
- знос пари тертя з молібденовим покриттям зразка поршневого кільця в 2,2-2,5 рази менше, ніж у пар, де поршневі кільця піддавали хромуванню;

– знос пари тертя при лазерному зміцненні в 1,6-1,8 рази менше, ніж – хромованого при плазмовому нанесенні.

Слід врахувати, що структура вихідного матеріалу аналізованих поршневих кілець відрізняється більш високим рівнем зносостійкості, ніж звичайний сірий чавун, що в сукупності з технологією зміцнення покриттям молібденом забезпечує підвищення терміну їх служби, навіть у порівнянні з традиційним гальванічним хромуванням і лазерним зміцненням. Це свідчить про те, що істотний внесок в ступінь зміцнення вносить вихідний матеріал деталі, що також підтверджує і аналіз досліджень [6-11].

В роботі [12] визначено характер тертя і оцінена зміна мікротвердості композитних іонно-плазмових покриттів відносно до роботи поршневих кілець тепловозних дизельних двигунів, а також техніко-економічні показники, двигунів що випускаються.

Результати випробувань по визначенню коефіцієнтів тертя $f_{тр}$ наведені у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Результати випробувань покриттів на трибологічні характеристики

Покриття	Значення коефіцієнтів тертя при навантаженні P, кН						
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4
TiN	0,025	0,033	0,040	0,051	0,085	0,097	0,086
TiAlN	0,020	0,023	0,028	0,034	0,040	0,057	0,086
MoN + Mo	0,020	0,23	0,032	0,038	0,049	0,060	0,065
MoCuN	0,020	0,025	0,030	0,036	0,044	0,050	0,080
Хромоване кільце	0,120	0,105	0,093	0,92	0,096	задиру- утворення	-

Аналіз отриманих результатів свідчить про те, що використання для поршневих кілець таких композитних покриттів забезпечує більш високі показники задиростійкості і характеристики тертя сполучення «гільза - поршневе кільце» в порівнянні з електролітичним хромом.

Середні значення коефіцієнтів тертя ($f_{тр}$) в діапазоні загальних навантажень 0,2 - 1,0 кН (таблиця 1.2), характерних для умов роботи компресійних поршневих кілець показують, що покриття на основі TiAlN, MoN + Mo та MoCuN мають близькі показники коефіцієнтів тертя в діапазоні 0,029 - 0,032, що більше ніж в три рази ніж при хромуванні. Покриття TiN знижує коефіцієнт тертя ~ в два рази в порівнянні з хромуванням.

Таблиця 1.2 – Середні значення коефіцієнтів тертя $f_{тр}$ в діапазоні загальних навантажень 0,2 - 1,0 кН та мікротвердість досліджених покриттів

Матеріал покриття	$f_{тр}$	Мікротвердість, Н-50	
		вихідна	доріжок тертя
TiN	0,054	2515	3334
TiAlN	0,029	1503	1720
MoN + Mo	0,032	1507	2335
MoCuN	0,031	2022	2212
Хромуване кільце	0,101	1057	755

Як показано і в роботі [5], гальванічне хромування не забезпечує істотного підвищення рівня властивостей деталей, що труться, а також поступається прогресивним іонно-плазмовим технологіям, про що свідчить зниження мікротвердості і істотна деградація зміцненого шару, яка спостерігається в процесі тертя.

Аналогічні результати отримані і в роботах [13, 14]. Для проведення досліджень [13] використовували кільця виробництва ВАТ «КЗПК», ВАТ «ЯМЗ» і ВАТ «РУМО». При лазерній обробці, їх виготовляли з високоміцного чавуну, а поверхню зміцнювали гартуванням. Після обробки на робочій поверхні формується білий чавун, який в порівнянні з сірим має значно меншу твердість і зносостійкість.

Експериментально авторами було виявлено, що для лазерного гартування компресійних кілець і отримання необхідних фізико-механічних властивостей переважно застосовували високоміцні чавуни з кулястим графітом, що має такий

хімічний склад%: 3,0 ... 3,2 C, 0,8 ... 0,95Mn, 0,2 ... 0,3Cr, > 0,8 Ni, 1,75 ... 2,2Si, <0,5P, <0,09 S.

На додаток до роботи [13], були виконані дослідження цими ж авторами по лазерному загартуванню [14, 15], в ході яких встановлено, що мікротвердість при такій обробці чавунів деталей циліндропоршневої групи зростає більш ніж в 4 рази в порівнянні з початковою. Показано, що зміна мікротвердості по глибині зони лазерного впливу безпосередньо залежить від потужності випромінювання і швидкості переміщення променя, відносно оброблюваної поверхні.

Зносостійкість поршневих кілець зі зміцненням лазерною обробкою досліджували в порівнянні з хромованими кільцями суднових дизелів 6 ЧРН 36/45 на випробувальному стенді при зворотно-поступальному русі. Навантаження на контактуючі поверхні зразків становило 1 кН, час припрацювання - 3 год., сумарний час випробувань відповідав 25, 50, 100 год.

За результатами досліджень встановлено, що лазерна обробка поршневих кілець не тільки підвищує зносостійкість, в тому числі і в порівнянні з хромованим кільцем, а й знижує знос серійних втулок циліндра. Використання такої технології для сірого чавуну не забезпечує стабільного зміцнення через більш низьку збіжну температуру, відповідну чавуну, з відмінною часткою графіту через спадкові властивості вихідного матеріалу.

Одним із суттєвих недоліків лазерного зміцнення – це значні втрати електроенергії внаслідок відбивання лазерного променя від поверхні (низький ККД). Також слід врахувати, що лазерна обробка є складним технологічним процесом для зміцнення тонкостінних робочих поверхонь виробів зважаючи на високий рівень локального нагріву, в тому числі деталей, виготовлених із сірого чавуну, таких як маслоз'ємні поршневі кільця двигуна спеціальної техніки.

Аналогічний недолік має і метод газотермічного нанесення молібденового покриття на робочу поверхню поршневого кільця з високоміцного чавуну, який розглядається в роботі [16]. Крім того, в даному дослідженні не наведено розміри і форма

поперечного перерізу кільця, а також не представлені результати випробувань на тертя і зношування.

В роботі [17] виконані дослідження процесу електроіскрового зміцнення металевих поверхонь із застосуванням електродів зі сплавів Ni-Cr-Al, Fe-Cr-Al і Fe-Ni-Si-Cr₃C₂, призначених для відновлення зношених деталей з конструкційних сталей.

В якості зносостійких покриттів для ремонту газових компресорів високого тиску використовували жаростійкі евтектичні сплави Ni-Cr-Al. На зношеній поверхні поршневих кілець з сірого чавуну СЧ 32-18, які відпрацювали 9000 год., були нанесені електроіскрові покриття товщиною 50-60 мкм, і після додаткової механічної обробки були введені в експлуатацію. Випробування показали, що ресурс роботи відновлених поршневих кілець з електроіскровими покриттями становить 13000 год., що майже в 1,5 рази перевищує ресурс роботи – нових. Слід зазначити, що в роботі відсутня інформація про типорозміри кілець і умови їх експлуатації. Очевидно, що застосування електроіскрового зміцнення для маслоз'ємних поршневих кілець двигуна спеціальної техніки недоцільно, через те що вказані кільця відрізняються параметрами експлуатації, а також орієнтації такої технології зміцнення на відновлювальний ремонт. До того ж, в роботі не міститься інформації про характер сформованої перехідної зони і рівня якості в зоні зчеплення покриття з підкладкою.

Для поліпшення якості у період припрацювання і підвищення зносостійкості поршневих кілець запропонована технологія тришарового зміцнення поверхні, яка включає карбонітрацію, іонну імплантацію нітриду титану з подальшим сульфідкуванням в електролітній плазмі [18]. Комбіноване зміцнення автори цієї роботи проводили для маслоз'ємних поршневих кілець зі сталі 20X13. Карбонітрацію здійснювали розкладанням карбаміду в розчині солей при температурах 540...580°C в період однієї години. Глибина карбонітридного шару становила 12...15 мкм при забезпеченні твердості 1158...1513HV. Отримані на поверхні нітридні фази навіть при відсутності змащення не виявляють схильності до схоплювання. Для усунення викривлення маслоз'ємного поршневого кільця внаслідок температурного впливу при карбонітрації, а також

дифузійного насичення поверхні вуглецем і азотом здійснюють алмазне притирання в гільзі зі зняттям карбонітридного шару товщиною 3...4 мкм. Подальше нанесення покриття здійснювали іонно-плазмовим зміцненням з формуванням нітридів титану TiN_4 товщиною 5...7 мкм на поверхню карбонітридного шару. Іони титану високої енергії розігрівають поверхню до $600^{\circ}C$ і проникають на глибину 1...2 мкм. Після цього для поліпшення припрацювання поршневих кілець і підвищення адгезії покриття з основою виконували сульфідкування в електролітній плазмі. Час обробки становив 20...40 с. В результаті формувався пористий шар Fe_2S товщиною 8...10 мкм і твердістю 915...1158 HV.

Запропоноване комбіноване зміцнення для обробки маслоз'ємних поршневих кілець зі сталі 20X13 не застосовується для кілець з сірого чавуну, в тому числі, через високотемпературні процеси карбонітрації і іонної імплантації, з огляду на можливе накопичення високих залишкових напружень і деформації тонкостінного виробу, а також розвитку процесів графітизації.

Робота [19], присвячена розробці прогресивних технологій нанесення газотермічних захисних покриттів на поршневі кільця дизельних двигунів, а також дана оцінка можливості їх застосування замість гальванічного хромування. В результаті зміцнення газотермічним напиленням хромового покриття ПХ1М і ВХ2К було досягнуто підвищення зносостійкості кілець при сухому і граничному терті в парі з чавунною підкладкою. Однак, проведені натурні випробування в умовах експлуатації показали зниження зносостійкості газотермічного нанесення хромового покриття щодо гальванічного та, на думку авторів є наслідком ефекту Ребіндера і шаржування. Дані способи зміцнення непридатні для маслоз'ємних поршневих кілець двигуна спеціальної техніки через наявність тонкостінної робочої поверхні. Крім того, наведені в роботі типи двигунів (Д-245, СМД-63) відрізняються від двигунів спеціальної техніки за умовами і параметрами експлуатації.

З розглянутих вище робіт можливо зробити висновок, що традиційні та виявлені нові технології хромування, а також лазерна обробка поверхонь, що працюють в умовах

тертя не забезпечать високого рівня споживчих властивостей, у порівнянні з іонно-плазмовими методами осадження плівок і нанопокриттів. Тому, розробка таких технологій є пріоритетним напрямом для зміцнення поршневих кілець двигунів спеціальної техніки.

1.3 Триботехнічні властивості іонно-плазмових і багатокомпонентних покриттів

В роботі [20] наведені результати досліджень триботехнічних характеристик багатокомпонентних (Ti-Cu-N, Ti-Al-N) і багатошарових (TiN + α -Ti, TiN + TiC, TiN + БрАЖ9-4) покриттів порівняльно з одношаровим TiN. Дослідження показали, що для покриттів, що включають м'які компоненти Cu і Al виявлений ефект виборчого перенесення на контртіло, що сприяє зниженню коефіцієнта тертя, підвищення зносостійкості і збільшення критичного навантаження задироутворення. Таке явище зафіксовано також для багатошарових покриттів.

Багатокомпонентні покриття Ti-Cu-N з вмістом Cu до 2 ÷ 6% мас., і Ti-Al-N з вмістом Al до 10 ÷ 15% мас. забезпечили зниження зносу в 2,5 рази і підвищення критичного навантаження задироутворення на 20 ÷ 30% в порівнянні з TiN.

Багатошарові покриття TiN + α -Ti, TiN + БрАЖ9-4, майже в 1,5 - 1,9 рази зменшують знос і збільшують критичне навантаження задироутворення на 10 ÷ 30% в порівнянні з TiN

Оскільки покриття наносили, з урахуванням відповідних параметрів осадження, на зразки азотованої сталі 38X2МЮА, такі результати не можуть бути повністю перенесені і використані на підкладці з сірого чавуну. Крім того, в роботі не представлено цільове використання таких зміцнюючих покриттів і, відповідно параметрів експлуатації для конкретних деталей.

Робота [21] присвячена вивченню процесів формування нітридних покриттів шляхом розпилення систем на основі двох елементів Al + Ti і Ti + Cr методом вакуумно-дугового осадження, а також дослідженню їх фізико-механічних властивостей.

Матеріали, в якості випаровуємих, для зміцнення використовувалися суцільнолітні катоди на основі Al + Ti і Ti + Cr, отримані методом вакуумно-дугового переплаву. Хімічний склад матеріалу катодів, який випаровувався, наступний: для Al+Ti – 50 ат. % Al, 50 ат. % Ti і для Ti+Cr – 63 ат. % Ti, 37 ат. % Cr. Як робочий газ використовувався молекулярний азот. Покрытия (Ti, Al)N та (Ti, Cr)N наносили на поверхню зразків зі сталі (зразки $15 \times 15 \times 2,5$ мм) на устаткуванні Булат 6. Параметри осадження наведені в таблиці 1.3. Товщина всіх покриттів в експериментах становила 2,0 – 3,0 мкм.

Таблиця 1.3 – Фізико-технологічні параметри осадження покриттів (Ti, Al)N, (Ti, Cr)N

Покриття	Ід, А	$U_{\text{пр}}, \text{В}$	$P, \text{Торр}$	Примітки
(Ti, Al)N	90	150	3×10^{-3}	Без імпульсів
(Ti, Cr)N	90	150	3×10^{-3}	Без імпульсів
(Ti, Cr)N	90	150	3×10^{-3}	з імпульсами $f = 7,0 \text{ кГц}$, $U_{\text{пу}} = 800 \text{ В}$, $\nu = 10 \text{ мкс}$

Дослідження топографії поверхні покриттів, отриманих методом вакуумно-дуговим осадження за допомогою скануючого растрового мікроскопа показали наявність крапельної складової для всіх систем (Ti, Al)N та (Ti, Cr)N (рис. 1.2).

Елементний склад отриманих покриттів наведено в таблиці 1.4.

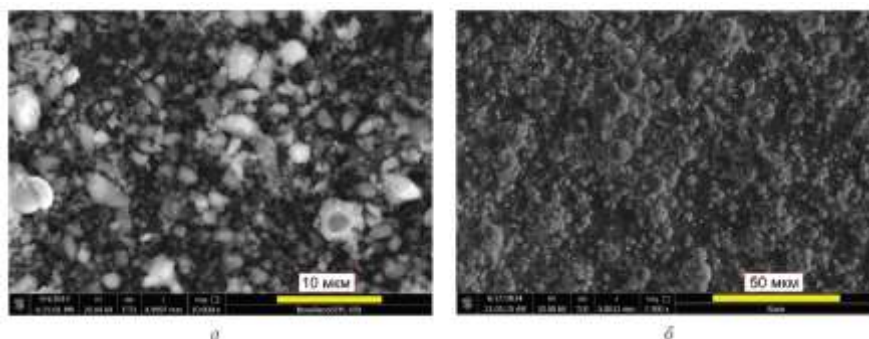


Рис. 1.2 – Топографія поверхні покриттів, отриманих при парціальному тиску азоту $P = 3 \times 10^{-3} \text{ Торр}$, $U_{\text{см}} = -150 \text{ В}$: а – система (Ti, Al)N; б – система (Ti, Cr)N [20]

Таблиця 1.4 – Хімічний склад покриттів систем (Ti, Al)N і (Ti, Cr)N

Склад покриття	N, ат. %	Al, ат. %	Ti, ат. %	Cr, ат. %	O, ат. %	R _a , мкм
(Ti, Al)N	35,38	30,22	33,9	-	0,5	1,87
(Ti, Cr)N	39,43	-	43,79	16,78	-	1,19

Рентгенодифрактометричні методи досліджень (рис. 1.3) виявили, що матеріал покриття двофазний та (Ti, Cr)N має кубічну гратку і титан – гексагональну (рис. 1.2). Середній розмір кристалітів титану складає 15 нм, а нітриду (Ti, Cr)N – близько 7,5 нм. При імпульсному впливі відбувається тільки зміна текстури з переважним зростанням в площині – (200), що характерно для більшої енергетичної стимуляції процесу зростання з мінімізацією поверхневої енергії. Для покриттів (Ti, Al)N (див. Рис. 1.3, б) зйомку проводили у випромінюванні Fe-K α , на відміну від – (Ti, Cr) N де використовували випромінювання Cu-K α . Отримані покриття мають кубічну модифікацію нітриду алюмінію зі структурним типом NaCl, текстурою (111) і середнім розміром кристалітів 15 нм.

Результати досліджень твердості і модуля пружності покриттів (Ti, Al) N показали, що середнє значення нанотвердості складало $H = 30,6$ ГПа, модуля пружності $E = 370,2$ ГПа.

Середні значення (по десяти вимірах) нанотвердості покриттів (Ti, Cr) N складають: для зразків, вихідних $HV_{0,1} = 27,6$ ГПа, а при обробці імпульсами $HV_{0,1} = 34,5$ ГПа. Значення коефіцієнта тертя μ і зносостійкості ν покриттів (Ti, Al)N і (Ti, Cr)N, отримані при випробуваннях, наведені на рис. 1.4 і в таблиці 1.5. Фотографії доріжок і профілограм тертя, контртіло, а також хімічний склад доріжок наведені на рис. 1.4 і в таблиці 1.5, 1.6 відповідно.

Результати досліджень фрикційних характеристик при сухому терті покриттів з контртілом з Al₂O₃ свідчить про те, що у всіх випадках при випробуванні покриттів (Ti, Cr)N відбувається адгезійне зношування,

обумовлене переносом матеріалу з однієї поверхні на іншу. У разі покриття (Ti, Al)N діє механізм абразивного зношування (див. Рис. 1.5 а), це пов'язано з процесом формування покриттів – наявністю великих крапель в середині і на їх поверхні.

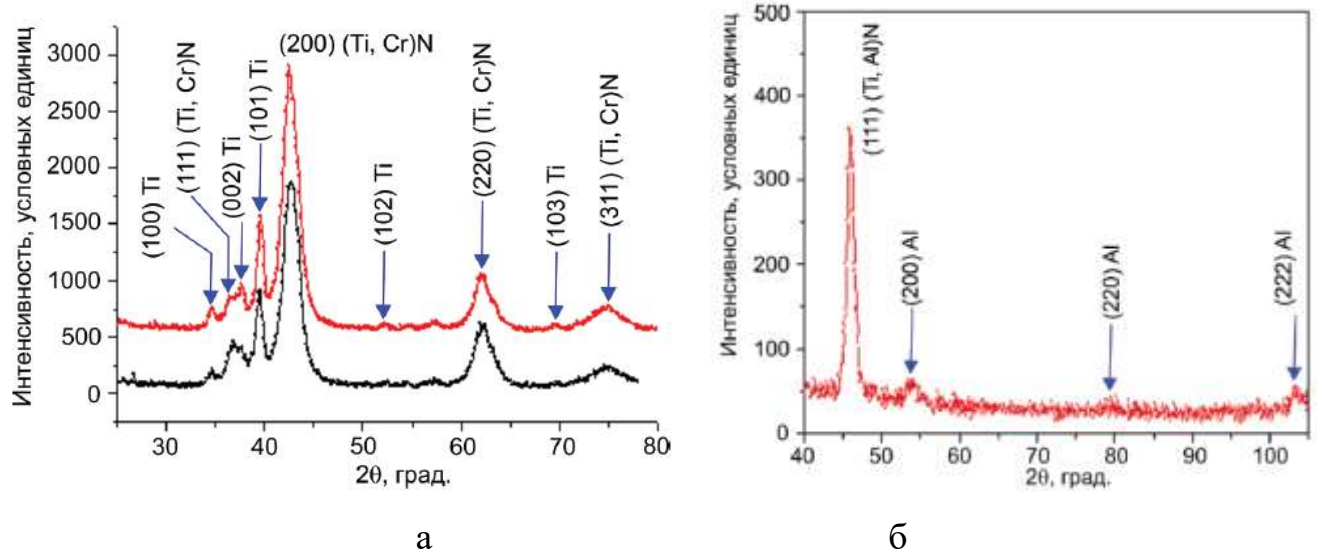


Рис. 1.3 – Ділянка рентгенограм покриттів на основі (Ti, Cr)N (а) та (Ti, Al)N (б) [20]

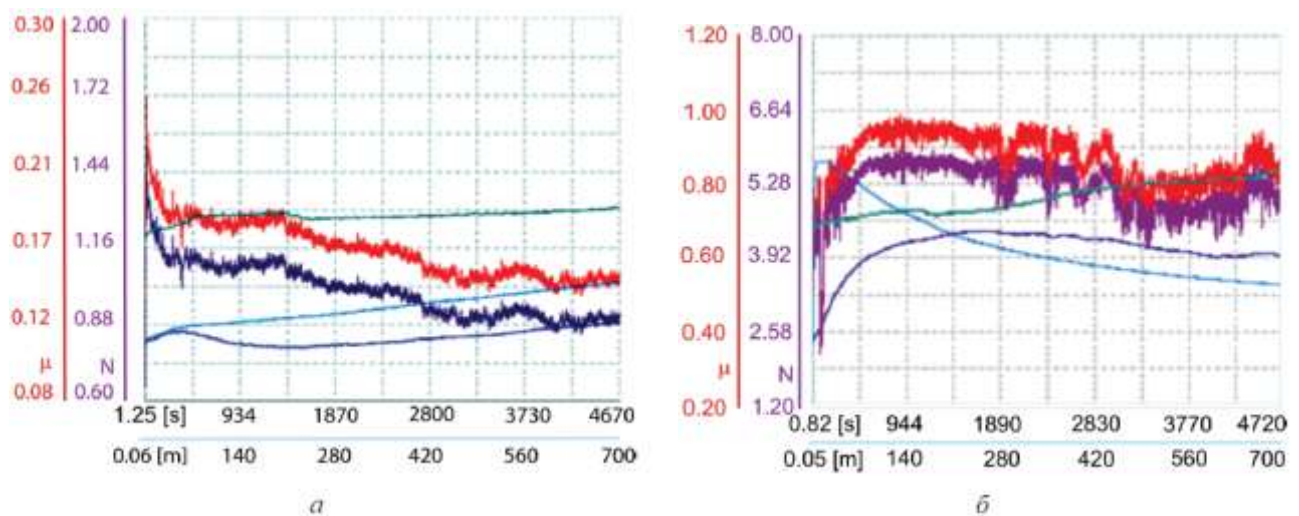


Рис. 1.4 – Результати триботехнічних випробувань зразків з покриттями на Ст. 45:

а – (Ti, Cr)N; б – (Ti, Al)N [20]

Таблиця 1.5 – Триботехнічні характеристики покриттів (Ti, Al)N і (Ti, Cr)N

Покриття	Коефіцієнт тертя, μ		Інтенсивність зносу, $\nu \times 10^{-6}, \text{мм}^3 \times \text{Н}^{-1} \times \text{м}^{-1}$		R_a , мкм
	Початковий	При випробуваннях	Контртіло (Al_2O_3)	Покриття	
(Ti, Al)N	0,49	0,867	3,33	28,5	0,44
(Ti, Cr)N	0,11	0,167	1,10	6,82	0,31

Слід врахувати, що в роботі не обумовлена роль використаної підкладки, що ускладнює прогнозування ступеню підвищення фізико-механічних властивостей відносно сірого чавуну для поршневих кілець.

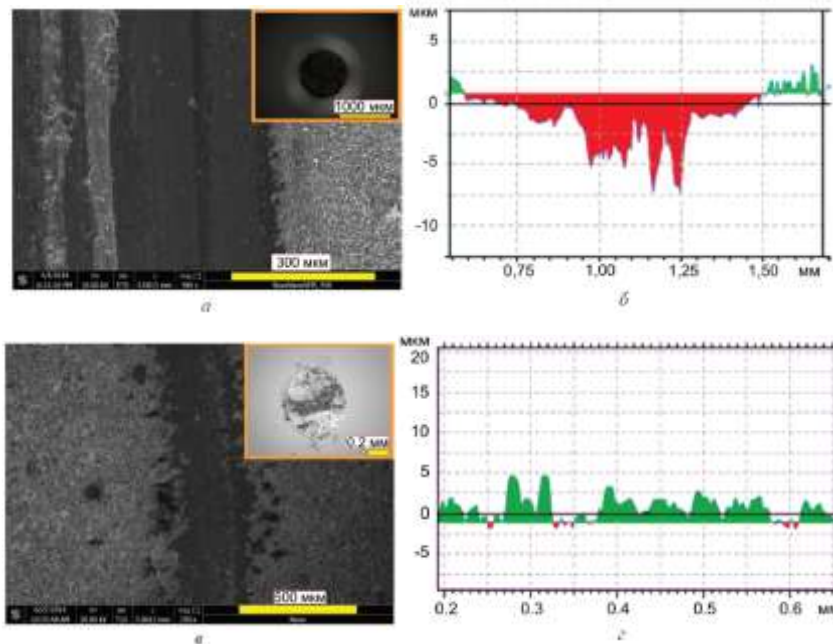


Рис. 1.5 – Зображення доріжок тертя і профілограм їх покриттів і контртіла *а, б* — (Ti, Al)N; *в, г* — (Ti, Cr)N [20]

Таблиця 1.6 – Елементний склад доріжок тертя покриттів

Склад покриття	N, ат. %	O, ат. %	Al, ат. %	Ti, ат. %	Cr, ат. %	Fe, ат. %
(Ti, Cr)N	26,46	32,95	0,94	28,35	11,13	-
(Ti, Al)N	17,24	56,77	12,24	9,29	-	4,47

В роботі [21] проведено дослідження зносостійкості пакувальних ножів з високолегованої сталі марки X205Cr12 (сталь типу X12), яку використовували для тонких ножів в машинах типу MC1DT-T (MC Automations, Італія) у кондитерському виробництві для подрібнення горіхів. Наноструктурні покриття ZrN, отримані фізичним осадженням з газової фази (PVD) з застосуванням ВЧ-розряду. Максимальна нанотвердість покриття ZrN досягала 32,05 ГПа, що в 3,4 рази більше, ніж твердість вихідної матриці інструменту, і на 57,65% вище, відносно карбідної фази основного металу. Застосування покриттів дозволило стабілізувати робочий поверхневий шар при деформації і запобігти подрібненню і руйнуванню карбідної фази. Завдяки покриттю ZrN було досягнуто підвищення зносостійкості в виробничих умовах в 3 рази.

При пошуку покриттів варто враховувати вплив і принципово інший матеріал основи ножів, які мають і відмінне конструктивне виконання, а також працюють в умовах, що відрізняються від маслоз'ємних поршневих кілець двигунів спеціальної техніки. Крім того, в роботі немає інформації про методику і навантаження при випробуваннях на тертя і зношування таких деталей.

Окрім того, було проаналізовано і інші роботи, присвячені дослідженням одношарових та багатокомпонентних іонно-плазмових покриттів на основі титану [23, 25-28, 30, 33, 34, 38, 40-46, 51, 52, 54-56, 59-65, 67-75, 78, 79, 81-89, 91, 92, 94], та інших елементів, таких як: хром, молібден, алюміній, цирконій [23, 27, 29, 31, 33, 35-40, 43-54, 57, 58, 62-67, 71, 73, 76, 77, 80-81, 86, 87, 89, 90, 92, 93]. Ці роботи не обумовлюють забезпечення зносостійкості при використанні сірого чавуну в якості основи для осадження покриття.

З вище представленого аналізу робіт цього розділу можливо припустити, що одношарові структури при нанесенні на підкладку з сірого чавуну, не матимуть високої адгезійної міцності, враховуючи грубозернисту структуру такого матеріалу, наявність великої частки графіту. Для підвищення цього показника необхідно застосування попередньої обробки поверхні, як наприклад, показано в роботах [18, 63] при технології тришарового зміцнення поверхні. Для спрощення технологічного процесу і підвищення

рівня властивостей поверхні поршневих кілець буде доцільно використовувати багат шарову структуру іонно-плазмового методу осадження покриттів.

1.4 Особливості структуроутворення і триботехнічні властивості багат шарових іонно-плазмових покриттів

Проведені дослідження [64] були спрямовані на оцінку трьох типів багат шарових покриттів на основі Ti та Al, осаджених з парової фази:

1 – TiN + TiAlSiN нанокомпозитний шар + TiN – містить Ti - 22,3%, Al - 14,6%, Si - 2,9% (мікротвердість 2600 HV, товщина покриття 6,15 мкм);

2 – TiN + TiAlN наношар + AlTiN – містить Ti - 22,3%, Al - 18,6%, верхній шар - Al - 26,2% і Ti - 13,2% (твердість 2908 HV, товщина покриття 6,6 мкм);

3 – TiN + AlTiN наношар + TiN – містить Al - 21,8% і Ti - 17,3% (мікротвердість 3087 HV, загальна товщина покриття 8,75 мкм).

Їх наносили на фрезу, якою виконували обробку матеріалу С45, (аналог Ст. 45), в результаті чого після стендових випробувань довговічність осаджених покриттів склала: 1 - 52,5 хв., 2 - 68,2 хв., 3 - 74,3 хв. Високу зносостійкість багат шарового покриття TiN/(Ti, Al)N підтверджують і дослідження [95].

Такі технології багат шарового нанозміцнення забезпечують підвищення стійкості, однак як і в попередніх випадках, ключову роль в застосуванні тих чи інших матеріалів, композицій та методів зміцнення, залежать від конфігурації і умов експлуатації зміцнюємої деталі і її матеріалу.

Аналогічний вплив факторів відзначають і в дослідженнях [96 – 98], в яких виконана оцінка осаженої багат шарової структури TiN/ZrN, навіть при відносно високій його вихідній зносостійкості (рис. 1.6, 1.7).

Схожі дослідження представлені і в роботі [99]. Так, на ріжучий інструмент наносили багат шарове, багаткомпонентне покриття Ti-NbN-Al₂O₃, яке забезпечило

зниження швидкості зношування інструменту під час його використання для чистової обробки загартованої сталі ХВГ (рис. 1.8).

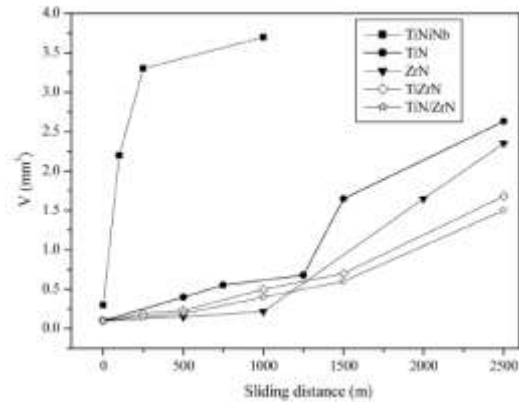


Рис. 1.6 – Рівень об'ємного зносу покриття TiN/ZrN на різних етапах шляху тертя [96]

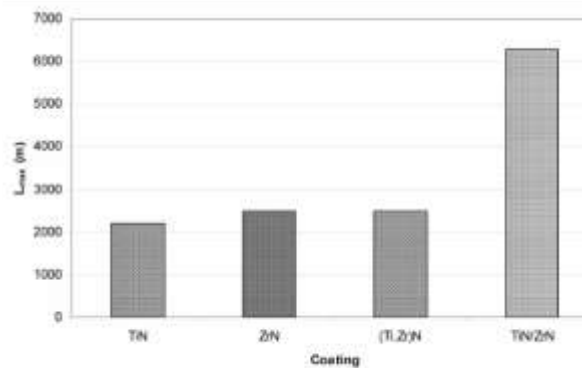


Рис. 1.7 – Максимальний шлях тертя покриття TiN/ZrN [96]

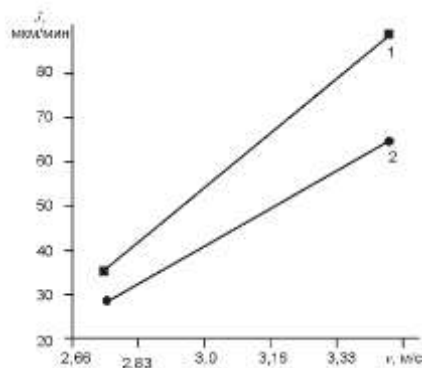


Рис. 1.8 – Вплив швидкості різання на зношування інструментів, без покриття (1) і з покриттям (2): сталь ХВГ (55 HRC) з параметрами; $t = 0,25$ мм; $S = 0,09$ мм/об [99]

В результаті такого багат шарового зміцнення інструменту було забезпечено підвищення його стійкості в 2 рази відносно початкового варіанту. Однак, як і в перерахованих вище роботах, така комбінація матеріалів покриття і підкладки, в сукупності з відмінними умовами експлуатації виробів, не відображають реальної застосовності для зміцнення поршневих кілець.

Робота [100] посвячена підвищенню триботехнічних властивостей деталей, виготовлених з низьковуглецевої нержавіючої сталі марки 316L SS. Для цього двошарове покриття системи TiN/CrN наносили методом магнетронного розпилення відповідних мішеней на підкладку.

Покриття насичували при температурі 300°C в атмосфері азоту, тиску 3,5 Па і його потоку 10 см³/хв. Нанесене на поверхню покриття вивчали за допомогою скануючого електронного мікроскопа SEM і дифракційного аналізатора X-RD. Загальна товщина покриття досягала 4 мкм. Триботехнічні властивості досліджували при випробуванні на тертя та зношування. Для цього використовували тріботестер «Pin-on-Disc» в умовах сухого ковзання.

Рентгенівська дифрактограми цього покриття на підкладці представлена на рис. 1.9. Вона характеризується піковими значеннями CrN при 37,5° і TiN 36,6° відповідно.

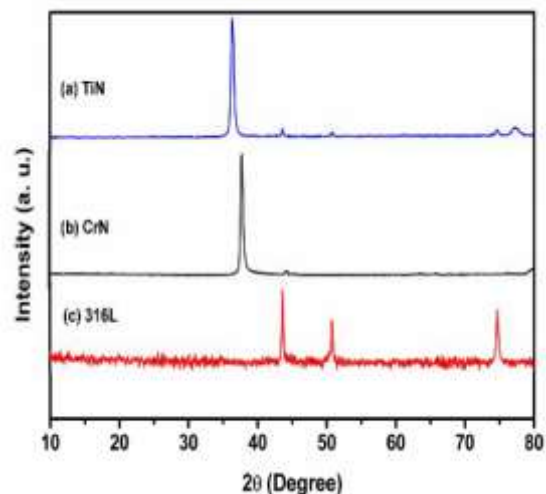


Рис. 1.9 – Дифрактограми рентгенівських променів покриттів TiN (а), CrN (б) і вихідної сталі 316LSS(с) [100]

На рис. 1.10 представлений поперечний переріз зразка з покриттям TiN/CrN. На зображенні видно рівномірний розподіл складу, одночасно виявлено наявність його в середині западин на поверхні.

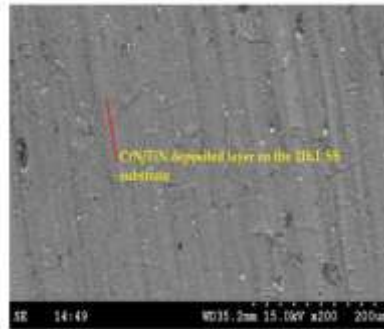


Рис. 1.10 – Поверхня покриття TiN/CrN, нанесеного на підкладку сталі 316LSS, (x200) [100]

На рис. 1.11 а, б показана інтенсивність зношування, що відповідає певному часу ковзання. Слід зазначити, що найбільший знос і коефіцієнт тертя характерні для зразків з нержавіючої сталі без покриття. Найбільші їх значення (відповідають) 250 с випробувань, що пов'язано з недостатнім мащенням.

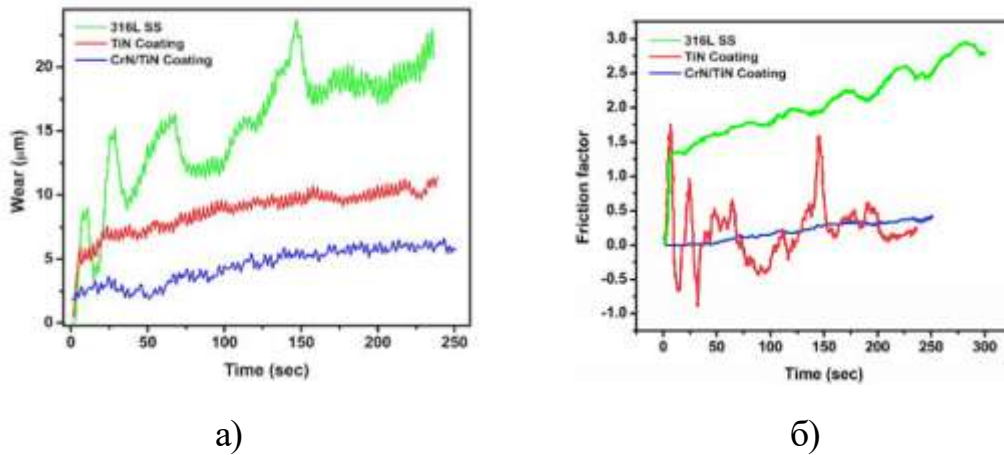


Рис. 1.11 – Результати випробувань зразків на знос (а), коефіцієнт тертя покриттів (б) [100]

Одношарове покриття TiN знижує швидкість зносу, а максимальний рівний 9 мкм зафіксований на 230 с. випробувань. Одношарове покриття TiN забезпечує підвищену

твердість і одночасно знижує коефіцієнт тертя. У разі подвійного шару TiN/CrN швидкість зносу і коефіцієнт тертя значно зменшуються в порівнянні з вихідною сталлю 316 L SS і покриттям TiN.

У дослідженнях [101] виконана порівняльна оцінка багатошарових покриттів TiN/CrN, AlN/CrN, TiAlN/CrN для зміцнення штампового інструменту при обробці сплавів міді.

Яскраві ділянки поперечного перерізу фотографій структури покриття TiAlN/CrN з різними періодами понадрешіток, показані на рис. 1.12. Покриття зі щільною столбчастою структурою, розміри якої становлять 5 ~ 50 нм і шари CrN і TiAlN та мають змінні напрями росту показані як яскраві та темні відповідно. Шари TiAlN виглядають темніше, ніж – CrN. Аналіз знімків структури шарів TiAlN і CrN показав, що вони ростуть епітаксіально, а період понадрешітки (λ) такого багатошарового покриття зменшився зі збільшенням швидкості обертання зразка при нанесенні покриття. Виміряна товщина одного шару системи TiAlN/CrN складала 13,5 нм, 6,1 нм, 2.5 нм при швидкості обертання 2, 5 і 8 хв⁻¹, відповідно. Результати визначення нанотвердості і модуля пружності в залежності від періоду понадрешітки для багатошарового покриття TiAlN/CrN представлені на рис. 1.13. Максимальна твердість досягає 37 ГПа і відповідала з покриттям $\lambda = 6,1$ нм, а пружність складала – 375 ГПа. Досягнута твердість була значно більша, на відміну від покриттів TiAlN і CrN і становила 30ГПа і 25ГПа відповідно. Таке підвищення є досить сумнівним, однак кілька моделей пояснюють дане зміцнення формуванням понадрешітки. Найбільш типова модель заснована на обмеженні рухливості дислокацій усередині і між шарами в покритті. Пояснюється це також різницею в зміні енергії руху дислокації між двома шарами, які мають різницю в пружності при зсуві двох відмінних матеріалів, і тим самим, створюються бар'єри для їх переміщення через границі.

Енергія, необхідна для переміщення дислокації через такі зони і залежить від товщини шарів. Вузька або різка межа вимагає більшої енергії, ніж розмита. Таким чином, простежується пік підвищення твердості, коли існує різниця в модулі пружності між двома матеріалами шарів і різка межа між ними.

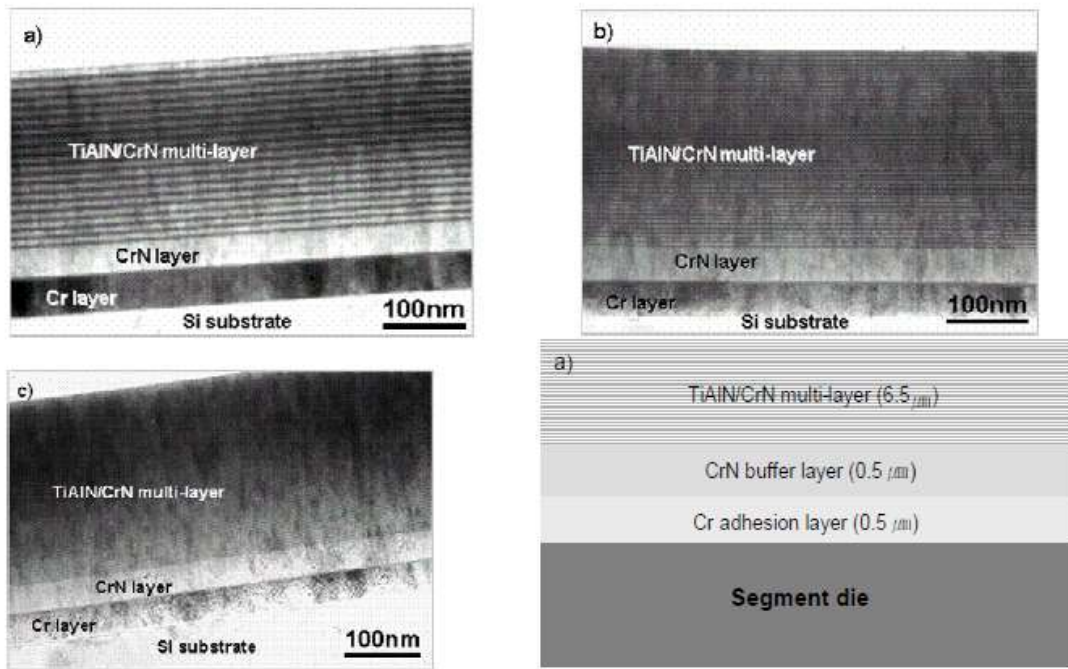


Рис. 1.12 – Зображення поперечного перерізу шарів TiAlN/CrN з різними періодами понадрешітки, відповідним певним швидкостям обертання при нанесенні покриттів: а) 13,5 нм при 2 хв^{-1} ; б) 8,5 нм при 4 хв^{-1} ; в) 2,5 нм при 8 хв^{-1} ; д) схема поперечного перерізу покриття [101]

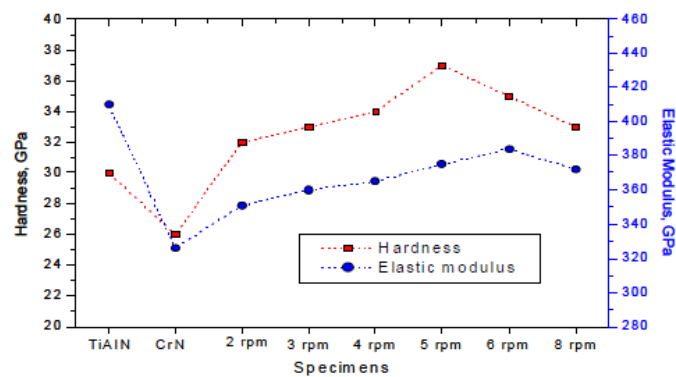


Рис. 1.13 – Показники нанотвердості і модуля пружності в залежності від швидкості обертання виробів, зміцнених покриттями TiAlN/CrN [101]

На підставі результатів наноіндентування було розраховано опір пластичної деформації (H^3/E^2), що свідчить про стійкість проти стирання, максимальне значення якого складало 0,36 для багатошарового покриття TiAlN/CrN з $\lambda = 6,1 \text{ нм}$, і це був ймовірно

кращий результат, на думку авторів, який можна було очікувати від цього покриття. Спостережуване також підтверджує, що існує певний період формування понадрешітки, який сприяє максимальному ефекту зміцнення.

Виконано порівняння між твердістю, модулем пружності і опором пластичної деформації покриттів TiN/CrN, AlN/CrN і TiAlN/CrN, результати якого узагальнені в таблиці 1.7. Висока твердість і модуль пружності характерні для покриття TiN/CrN. Високий опір пластичної деформації мали і покриття – AlN/CrN.

Таблиця 1.7 – Показники пластичної деформації оцінені по H^3/E^2

Досліджений параметр	Варіант покриття		
	AlN/CrN	TiN/CrN	TiAlN/CrN
Нанотвердість, ГПа	37	42	37,5
Модуль пружності, ГПа	327	450	375
Супротив пластичній деформації H^3/E^2 , ГПа	0,48	0,36	0,37

В роботі [102] оцінена можливість підвищення триботехнічних властивостей і корозійної стійкості деталей з інструментальної сталі марки AISI H13 зміцненням багат шаровим покриттям системи CrN/TiN.

На рис. 1.14, а і 1.14, б представлені рентгенівські дифрактограми моношарів CrN і TiN, інтенсивні піки яких відповідають стехіометричному складу покриття і мають високу ступінь кристалічності. Фази CrN і TiN показують переважну орієнтацію в площині (111). Крім того, TiN має інтенсивний пік в площині (220). Це показує, що такі покриття орієнтовані переважно в напрямі (111), що відповідає найвищим значенням твердості і модуля Юнга. Піки на цій дифрактограмі зміщені в бік більш високих кутів дифракції через стискаючі напруження, викликаних інтенсивним бомбардуванням іонами Ar. Аналогічним чином, дифракційні піки Cr і Ti спостерігалися при кутах $43,9^\circ$ і $76,1^\circ$ відповідно, які узгоджені з нанесеним моношаром і товщиною близько 300 нм. Інфрачервоні спектри

Фур'є були отримані на одношарових покриттях TiN і CrN з орієнтацією (100), що наносили на кремнійову підкладку. Ці спектри були отримані в режимі пропускання, коли підкладка не була чутливою до інфрачервоного світла.

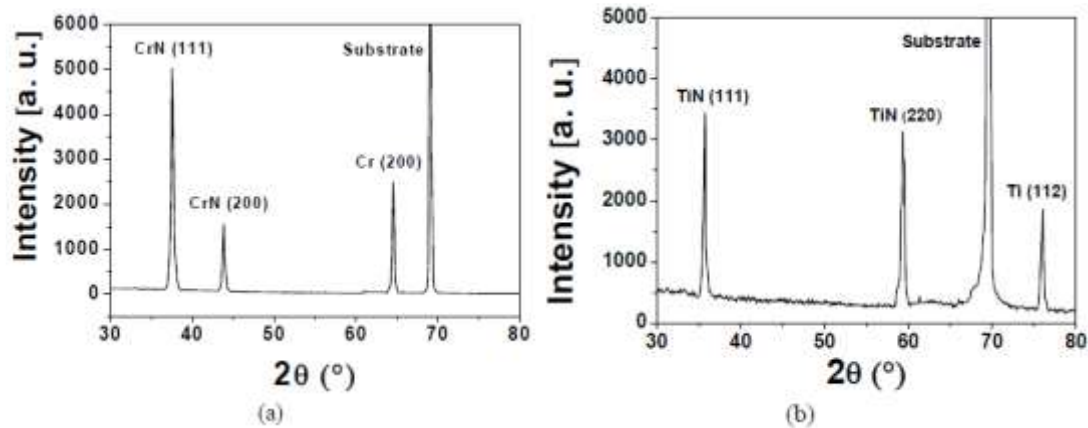


Рис. 1.14 – Рентгенограми одношарових покриттів: а) CrN, б) TiN [102]

На рис. 1.15 представлені залежності шорсткості і розміра зерна покриттів від кількості бішарів, які були оцінені методом атомно-силової мікроскопії. Як видно, шорсткість і розмір зерен зменшується від 362 нм і 85 нм при наявності 10 бішарів покриття системи CrN/TiN, до 116 нм і 79 нм при 100 бішарів, відповідно. Це пов'язано зі зменшенням періоду понадрешітки, який зменшується з числом шарів від 400 до 40 нм. Попередній факт поряд зі збільшенням числа бішарів підвищує і твердість, яка змінюється від 5 ГПа для зразка без покриття до 29 ГПа, з покриттям CrN/TiN зі 100 біслоями (рис. 1.16).

Рис. 1.17 ілюструє результати абразивного зносу, отримані під час випробувань зразків. Всі такі багатошарові покриття показали низькі значення швидкості абразивного зносу з істотним його зниженням при зменшенні періоду понадрешітки, від $0,005 \times 10^{-15} \text{ м}^3/\text{Нм}$ до $0,0095 \times 10^{-15} \text{ м}^3/\text{Нм}$. Одношарові покриття CrN і TiN показали швидкість абразивного зносу в 40 разів вище ніж – багатошарові. Вихідна сталь AISI H13 без покриття показала найвищу швидкість абразивного зносу, в 200 разів більшу, ніж багатошарове. Значення швидкості зносу досліджуваної системи покриття нижче, ніж для Cr/CrN і Cr/CrC [103-105].

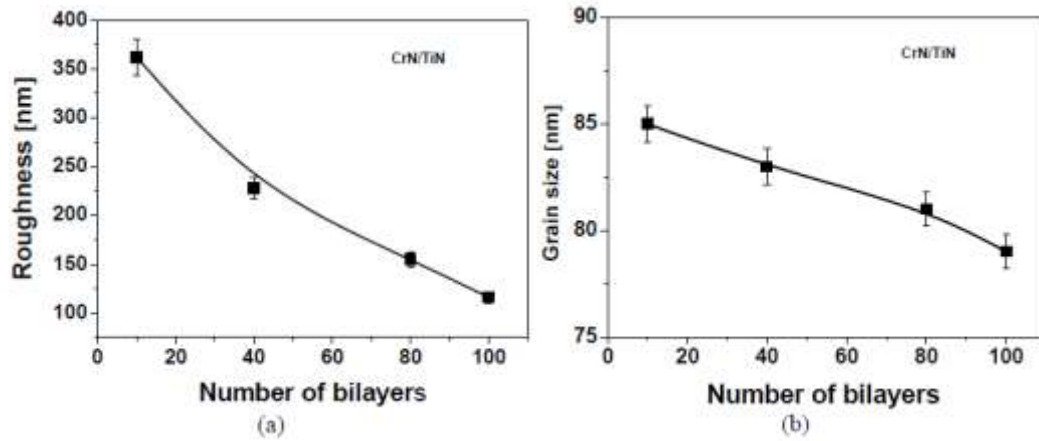


Рис. 1.15 – Шорсткість (а) і розмір зерна (б) покриття CrN/TiN в залежності від числа подвійних шарів [102]

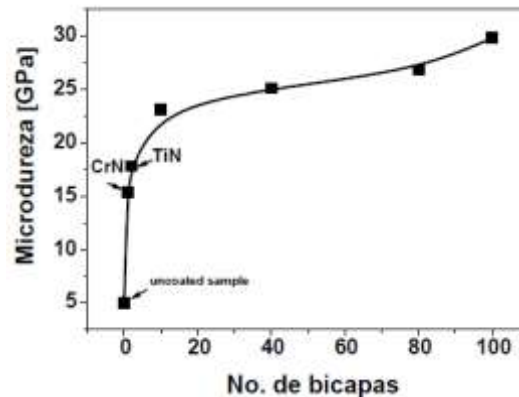


Рис. 1.16 – Твердість системи покриття, в залежності від кількості подвійних шарів [102]

Відомо, що при нанометровому періоді понадрешітки, пластична деформація плівки відбувається по межах зерен, а не через переміщення дислокацій. Цей процес вимагає більш високу енергію і тому сприяє збільшенню твердості і модуля Юнга покриття. Інші фактори, які сприяють блокуванню руху дислокацій, а також зростанню і поширенню нано- і мікротріщин є кілька перехідних зон між поодинокими шарами, які призводять до додаткового збільшення твердості покриття і зносостійкості.

Дослідження щодо застосування багат шарових композицій CrN і TiN не висвітлюють параметри і технологічні особливості їх формування, проте слід зазначити,

що вони можуть бути ефективними для зміцнення і поршневих кілець, оскільки ряд технологічних процесів їх виробництва використовують хромування. Відомі дослідження не розглядають і роль підкладки в зміцненні деталей, що є одним з найважливіших чинників у виборі оптимальних параметрів такого процесу.

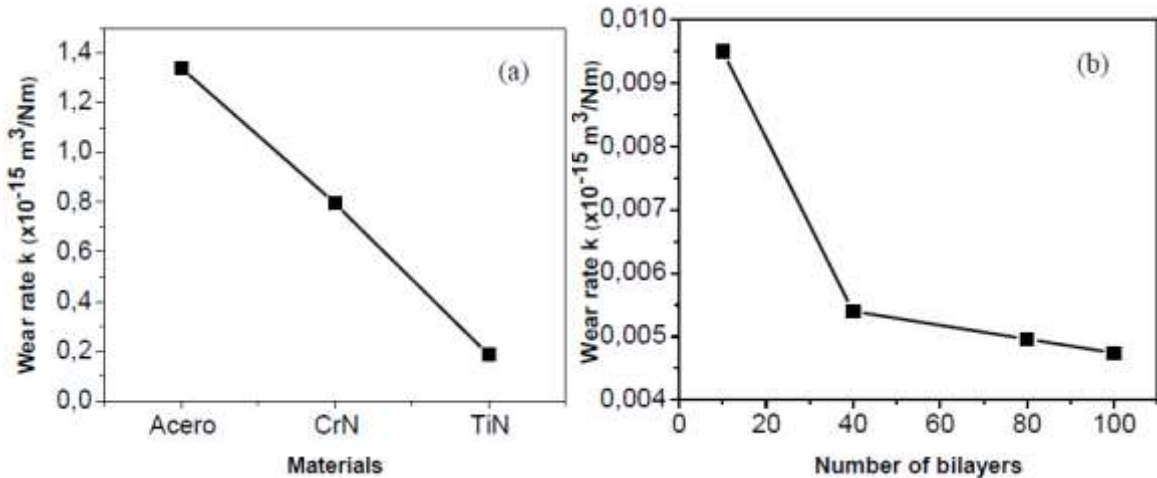


Рис. 1.17 – Зміна швидкості зносу в залежності від типу матеріала (а) і кількості подвійних шарів (б) [102]

В роботі [106] представлені результати досліджень багатошарових покриттів TiN/MoN методом вакуумно-дугового осадження. Досліджено вплив технологічних параметрів осадження на формування їх структури, фізико-механічних властивостей і триботехнічних характеристик.

Для отримання покриттів використовували вакуумну установку, оснащену ВЧ-генератором, потужністю 10 кВт. Для випаровування використовували титан ВТ1-00, молібден МЧВП. Покриття осаджували на поліровані зразки сталі 9Х13МЗДЗБ2. Для очищення плазми від макрочастинок використовували спеціальну конструкцію діафрагми, на яку подавали змінну ВЧ-напругу ($U_{\text{ВЧ}} = 1000 \text{ В}$). В якості реакційного використовували газоподібний азот. Морфологію поверхні покриттів вивчали за допомогою растрового і електронного мікроскопів. Елементний склад покриттів визначали методом рентгеноспектрального мікроаналізу, а фазовий склад - рентгенодифрактометричним з використанням Си-К випромінювання. Мікротвердість

вимірювали мікротвердоміром ПМТ-3. Випробування на зносостійкість проводили за схемою «площина-циліндр» на машині тертя МІ-1М при швидкості ковзання 1,0 м/с і навантаженням 50 Н протягом однієї години. В якості контртіла використовували поліровані диски діаметром 40 мм зі сталі X12M (57-58 HRC). Величину об'ємного зносу покриттів розраховували шляхом профілографування доріжок тертя. Величину зносу контртіла W визначали методом зважування до і після випробувань.

Покриття наносили пошарово, поверхня конденсації переміщала в зону випарників, які були розташовані під кутом 180° один до одного, при наступних параметрах обробки: $P_N = 0.3$ Па; $U_{cm} = 100-300$ В; $I_d(Ti) = 90$ А; $I_d(Mo) = 180$ А; $L = 470$ мм; $T_k = 300-650^\circ\text{C}$. Параметри обирали на основі розрахунку швидкостей осадження, що забезпечують формування багатошарової структури загальною товщиною покриття – до 1,5 мкм і співвідношенням перетину шарів на основі TiN і Mo – 2:1. Це забезпечило високі фізико-механічні, триботехнічні і експлуатаційні характеристики покриттів. Розрахункова товщина покриття TiN становила $\sim 30 \dots 40$ нм, Mo $\sim 15 \dots 20$ нм. Перерозподіл співвідношення вмісту фаз в покриттях є результатом переважного синтезу TiN в порівнянні з MoN внаслідок великої спорідненості титану з азотом, ніж з Mo. Вільна енергія утворення TiN в 4,8 рази вище, ніж у MoN.

Вивчення морфології поверхні отриманих покриттів свідчить про те, що застосування змінної ВЧ-напруги, яка подається на діафрагму, забезпечує відсутність макрокапель на поверхні покриття (рис. 1.18, а). Збільшення потенціалу зміщення, що подається на підкладку, зокрема, для Mo (150-350 В), призводить, до травлення поверхні, за рахунок підвищеної активності процесів взаємодії заряджених частинок з твердим тілом (рис. 1.18, б).

Характерною особливістю дифрактограм, отриманих TiN/Mo покриттів, є наявність дифузного шару під малими кутами відображення, не ідентифікованих фаз при $U_{cm} = 200$ В (таблиця 1.8).

Розмиття дифракційних максимумів, що становлять покриття фаз і їх відносно малі інтенсивності, свідчать про високу ступінь спотворень кристалічної ґратки і незначною за

величиною області когерентного розсіювання (о.к.р.). Покриття, отримані при $U_{cm} = -100$ В, включають в себе TiN, MoN, з текстурою (111) в площині конденсації. При вмісті в покритті 16% Мо, мікротвердість складала 28 ГПа.

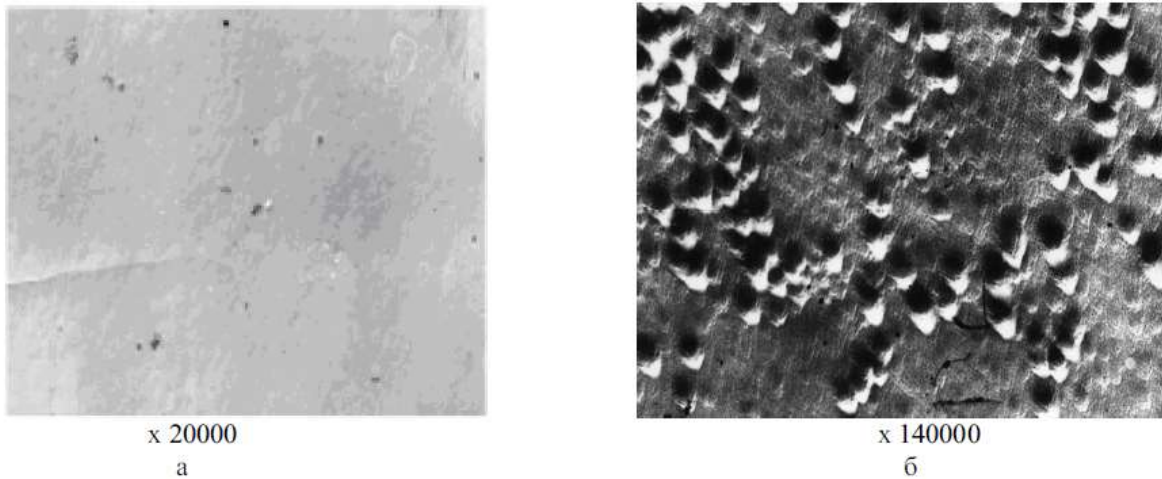


Рис. 1.18 – Морфологія поверхні покриття: а) TiN ($U_{cm} = 150$ В), б) MoN ($U_{cm} = 300$ В) [106]

Таблиця 1.8 – Фазовий склад TiN/Мо покриттів, їх мікротвердість, потенціал зсуву, період решітки

U_{cm} , В	T_k	H, ГПа	σ , ГПа	Утворюючі фази	Текстура фаз	Å, нм	P_N , ГПа
100	300	28	-2,9	TiN _{x<1} , TiMoMo _x N(100)	TiN _{1-x} (111)	0,4244	0,3
200	550	32	-2,7	Ti _x Mo _{1-x} N(111), (200)гало	Ti _x Mo _{1-x} N (200)	0,4238	0,3
300	650	24	-2,2	TiN _{x<1} (111)	Ti _x Mo _{1-x} N (200)	0,4233	0,3

У покриттях, отриманих при осадженні ($U_{cm} = -200$ В, $T_k \sim 500...550^\circ\text{C}$), характерною особливістю є наявність дифузного гало під малими кутами відображення рентгенівських променів і на його тлі малоінтенсивних (сильно розмитих) дифракційних максимумів. Це свідчить про наявність нанокристалічної структури з високим рівнем

мікроутворень в покритті. Мабуть, це пов'язано зі зменшенням співвідношення утворюємих фаз Mo_2N , TiMo і $\text{Ti}_x\text{Mo}_{1-x}\text{N}$, а також з появою нерівноважних твердих розчинів та появою не ідентифікованих фаз. При цьому, не спостерігаються дифракційні максимуми нітридів молібдену. Збільшення мікротвердості, мабуть, обумовлено радіаційно-термічними процесами, що призводять до ущільнення покриття. Надалі збільшення напруги, а значить і температури осадження, сприяє зниженню мікротвердості одержуваних покриттів до $H \sim 24$ ГПа. Загальний вміст Мо в покриттях із збільшенням до $U_{\text{см}} = 300$ В зменшується від 16% до 6,1%. Одночасно зростає інтенсивність дифракційних максимумів TiN_x , знижується рівень інтенсивності некогерентного розсіювання рентгенівських променів, відзначаються спотворення кристалічної решітки, що, мабуть, і є наслідком більш рівноважних умов формування структури таких покриттів. Істотне значення в зміні структурно-фазового стану мають місце радіаційно-термічно активовані процеси, що призводять до розпаду нерівноважних твердих розчинів, метастабільних фаз, а також формуванню з'єднань $\text{Ti}_x\text{Mo}_{1-x}\text{N}$ на основі Мо в нітриді Ti на кордоні розділу шарів. При цьому заміщення частини атомів Ti в решітці TiN на – Мо відповідає перерозподілу іонно-ковалентно-металевих зв'язків, які відповідають нітриду перехідних металів, обумовлюючи їх ослаблення відповідно до закономірності, що спостерігається при переході від нітридів IV групи до нітриду – VI періодичної системи елементів. Відомо, що при заданих умовах осадження забезпечується формування стехіометричного складу шарів нітридів TiN, а їх мікротвердість практично не залежить від $U_{\text{см}}$, та становить 22 ... 24 ГПа. У той же час, для монофазних покриттів Mo_2N_{ix} склад, структурний стан залежить не тільки від P_N , але і від $U_{\text{см}}$. Це є одним з основних факторів, що визначають фазовий склад, його зміни в шаруватих Ti-Mo-N покриттях.

Автори [106] розглянули можливість застосування наноструктурних покриттів в вузлах тертя. Для цього були оцінені триботехнічні характеристики отриманих покриттів в порівнянні з TiN. У таблиці 1.9 наведені результати триботехнічних випробувань наноструктурних багат шарових покриттів TiN/Mo в порівнянні з одношаровим TiN. Як

видно з наведених результатів, покриття TiN/Mo, забезпечує високий опір критичним навантаженням задирутворенню в порівнянні з TiN.

Таблиця 1.9 – Триботехнічні характеристики покриттів TiN/Mo та TiN (товщина покриттів 1,5 мкм)

Основна фаза	Число шарів	$R_a, \mu\text{мкм}$	$W_{\text{п}}, 10^{-3}, \text{м}^3$	$W_{\text{к}}, \text{Г}$	$f_{\text{ср}}$	$P_{\text{кр}}, \text{Н}$
TiN/Mo	Багатошар. ($U_{\text{см}}=200 \text{ В}$)	0,3	1,0	0,1	0,09	610
TiN	Одношар.	0,25	1,0	2,1	0,17	550

Відомо, що зменшення шарів до нанорозмірних величин забезпечує підвищення механічних характеристик покриттів внаслідок збільшення міцності і пружних властивостей матеріалів. По даним авторів [107], межі розділів між шарами служать бар'єрами поширення мікротріщин, що виникають під впливом навантаження в процесі тертя. Завдяки цьому руйнування локалізується в межах окремих шарів, що і забезпечує підвищення триботехнічних показників таких покриттів на виробках і їх триботехнічні властивості.

Стендові випробування шліцьового з'єднання ресора-вал з покриттями TiN/Mo проводили протягом 40 год. на спеціальному стенді ЛТ-6 [106]. Таке покриття з наношаровою структурою, нанесеної на шліци сталі 40ХН2МА при заданих умовах випробувань, істотно знижують знос і забезпечують підвищення їх ресурс в 3-4 рази в порівнянні з вихідним станом.

В роботі [108] виконано аналіз підвищення адгезії, зносо- і корозійної стійкості PVD покриттів, осаджених на азотовану підкладку сплаву Co-Cr-Mo. Аналізували вплив подвійних покриттів (плазмове азотування + подальший процес осадження) і одинарних (без плазмового азотування) на зміцнення з використанням двох різних PVD покриттів: одношарового CrN і багатошарового (TiN/CrN). Структурні і механічні властивості подвійних і одинарних покриттів і сплаву Co-Cr-Mo з азотованою

поверхнею, були оцінені за допомогою скануючої електронної та атомно-силової мікроскопії, а також вимірами нанотвердості, визначенням рівня адгезії методом дряпання (scratch test), випробувань на знос за схемою «кулька-диск». Одночасно визначали потенціодинамічну поляризацію. В якості індентора був використаний алмазний стилус з кульовим наконечником, радіусом 200 мкм. При довжині дряпання 10 мм навантаження поступово збільшувалося від 0 до 100 Н зі швидкістю 10 Н/мм. При випробуваннях були нанесені по три подряпини для кожного зразка після чого підраховували середнє значення критичного навантаження. Після випробування, критичне навантаження в зоні де відбулося руйнування, визначали доріжки подряпин за допомогою оптичного мікроскопа. Сила тертя і сигнали акустичної емісії фіксувалися під час випробувань, а потім виконувалося порівняння з результатами спостережень мікроскопічних оцінок подряпин. Стійкість до подряпин нітрідного шару покриття та підкладки кількісно підраховували з урахуванням критичних навантажень, відповідних режимам руйнувань. Їх визначали наступним чином: перша тріщина (LC_0), відповідала початку видалення матеріалу (LC_1), а потім формували перший прорив або втрату адгезії (LC_2) і повне видалення матеріалу (LC_3).

Випробування на тертя і знос були проведені з використанням схеми «кулька-диск» в умовах змащення. Кожен зразок випробували з використанням в якості контртіла кульки діаметром 10 мм з оксиду алюмінію при наступних параметрах: навантаження 40 Н, швидкість ковзання 219 хв^{-1} , радіус слідів зносу 6 мм, загальна кількість обертів 100000, яке відповідає відстані ковзання 3770 м. Вихідний зразок Со-Сг-Мо був випробуваний для порівняння. Під час випробувань на знос використовували мастильний розчин Рінгера (8,6 г/л NaCl, 0,3 г/л KCl і 0,33 г/л CaCl₂, з неіонізованою водою). Коефіцієнт тертя безперервно реєстрували протягом кожного випробування. Знос на зразках контролювали за допомогою дослідження структури на електронному мікроскопі.

У таблиці 1.10 наведені параметри попереднього азотування і подальшого осадження захисних покриттів.

Таблиця 1.10 – Параметри попереднього азотування і подальшого осадження захисних покриттів

1-й етап	Параметри азотування					
	температура, °C	реакційні гази			потенціал азотування	час, хв.
	520	10% N ₂ + 90% H ₂			2,5	420
2-й етап	параметри осадження PVD покриттів					
	покриття	реакційні гази	робочий тиск, МПа	температура, °C	напруга зсуву, U, В	час, хв.
	Багатошарове (TiN/CrN)×3	N ₂	1,2x10 ⁻⁶ (для TiN)	400	-200	30
			3,5x10 ⁻⁶ (для CrN)			
Одношарове CrN	N ₂	3,5x10 ⁻⁶	400	-200	120	

Зображення поперечних перерізів всіх досліджених варіантів поверхонь представлені на рис. 1.19. Мікрофотографія азотованого зразка сплаву Co-Cr-Mo представлена на рис. 1.19, а. Після азотування, товщина зміцненого шару на поверхні сплаву Co-Cr-Mo склала 3,5 мкм. На рис. 1.19, б представлено зображення в поперечному перерізі покриття CrN без азотованого підшару з товщиною 3,25 мкм. Мікрофотографія поперечного перерізу покриття CrN з азотованого підшару приведена на рис. 1.19, с. Товщина цих шарів склала 3,25 і 3,5 мкм, відповідно.

Мікрофотографії багатошарового покриття (TiN/CrN)×3 без азотованого підшару наведені на рис. 1.19, d. Це покриття складається з трьох шарів TiN розділених трьома – CrN з товщиною 1 і 0,25 мкм, відповідно, в результаті чого загальна товщина покриття склала 3,75 мкм. Рис. 1.19, e відображає багатошарове покриття (TiN/CrN)×3 з азотованим підшаром. Основні параметри і властивості згаданих вище шарів покриттів порівнювали з вихідним зразком Co-Cr-Mo і наведені в таблиці 1.11. Як видно з цієї таблиці, азотування підвищило твердість вихідних зразків і сплаву Co-Cr-Mo. PVD покриття CrN і (TiN/CrN)×3 з попереднім азотуванням, практично не змінюють показники твердості і модуль Юнга.

Таблиця 1.11 – Параметри і властивості різних варіантів покриттів зразків зі сплаву Co-Cr-Mo

Аналізуємий зразок		Товщи-на, мкм	Шорсткість, $R_{a\text{мкм}}$	Твер-дість, ГПа	Модуль пружності, ГПа
Co-Cr-Mo вихідний		-	0,010	8,31	267
Co-Cr-Mo азотований		3,5	0,020	12,62	231
Подвійне покриття CrN	Азотований шар	0,100	19,64	286	-
	CrN	3,25	0,100	19,40	283
Подвійне багатшарове покриття (TiN/CrN)×3	Азотований шар	0,165	26,23	400	-
	(TiN/CrN)×3	3,75	0,165	26,62	384

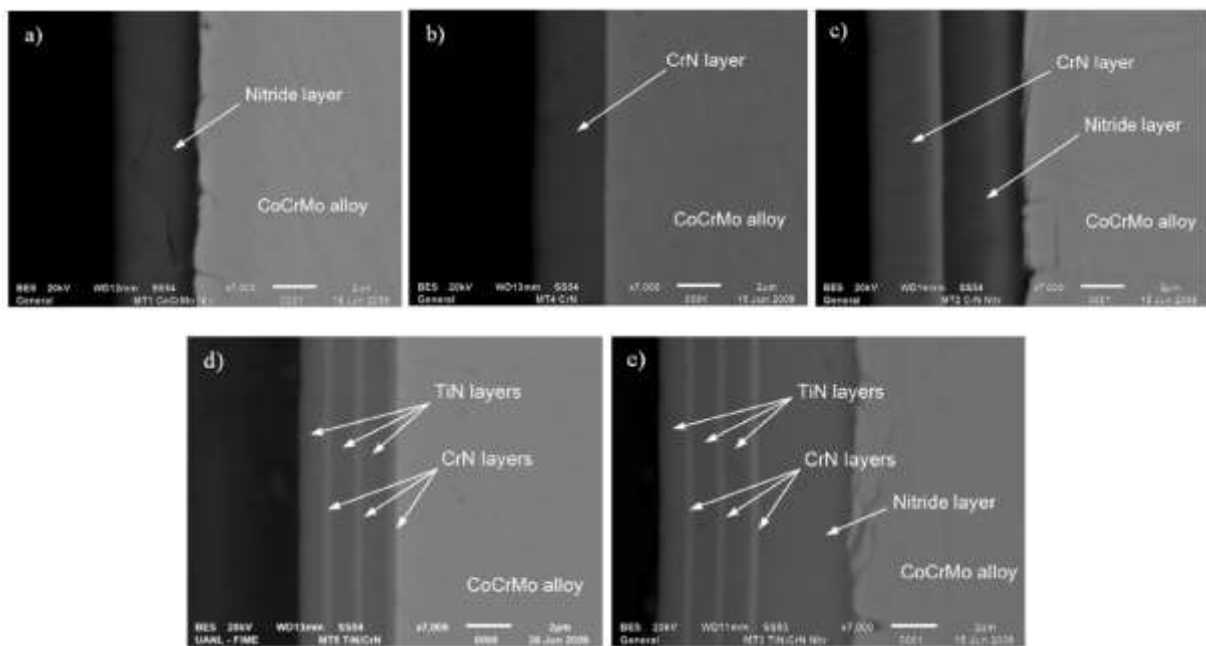


Рис. 1.19 – Мікрофотографії поперечних перерізів зразків: сплав Co-Cr-Mo з азотованою поверхнею (а); CrN без азотованого шару (б); CrN з азотованим підшаром (с); без азотованого та багатшарове покриття (TiN/CrN)×3 (д); покриття (TiN/CrN)×3 з азотованим підшаром (е) [108]

Стійкість зразків до подряпин була визначена кількісно при критичних навантаженнях, середні значення яких відповідали різним видам руйнування і вони наведені в таблиці 1.12.

Таблиця 1.12 – Критичні навантаження різних варіантів обробки поверхні Co-Cr-Mo при визначенні адгезії

Аналізуємий зразок	Критичні навантаження			
	перша тріщина L_{C0} , N	початок видалення матеріалу, L_{C1} , N	втрата адгезії, L_{C2} , N	повне видалення матеріалу, L_{C3} , N
Co-Cr-Mo азотований	3,85	32,00	50,17	54,00
Подвійне покриття CrN	7,14	30,82	69,84	72,00
CrN	5,50	22,48	57,40	60,00
Подвійне багат шарове покриття (TiN/CrN)×3	9,40	32,27	-	68,30
Багат шарове покриття (TiN/CrN)×3	7,96	12,90	55,00	58,50

Подвійні покриття (CrN і багат шарові (TiN/CrN)×3) витримали більш високі критичні навантаження, ніж їх аналоги без азотованого підшару. Азотований підшар з використанням PVD покриттів збільшує критичний опір дії навантаження. Найбільш високе критичне навантаження була досягнуто при покритті CrN з азотованим підшаром ($L_{C3} = 72$ N).

Середні результати об'ємного зносу після триботехнічних випробувань представлені на рис. 1.20. Подвійні і одинарні багат шарові (TiN/CrN)×3 покриття показали більш високу зносостійкість. Максимальний об'ємний знос характерний для варіанту попередньо азотованого зразка Co-Cr-Mo. Під час випробувань, найбільш високі

значення коефіцієнтів тертя досягнуті для подвійних покриттів (TiN/CrN) \times 3 і CrN: 0,4 і 0,325, відповідно. Для інших зразків значення коефіцієнта тертя коливалися в діапазоні від 0,2 до 0,3.

Морфологія поверхні слідів зносу всіх зразків показана на рис. 1.21. Мікрофотографії зношених поверхонь вказують на те, що основними механізмами зносу були абразивний і адгезійний.

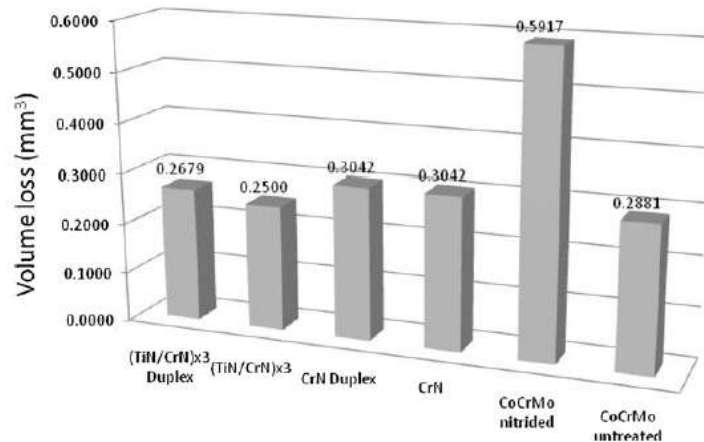


Рис. 1.20 – Середні результати об'ємного зносу після триботехнічних випробувань [108]

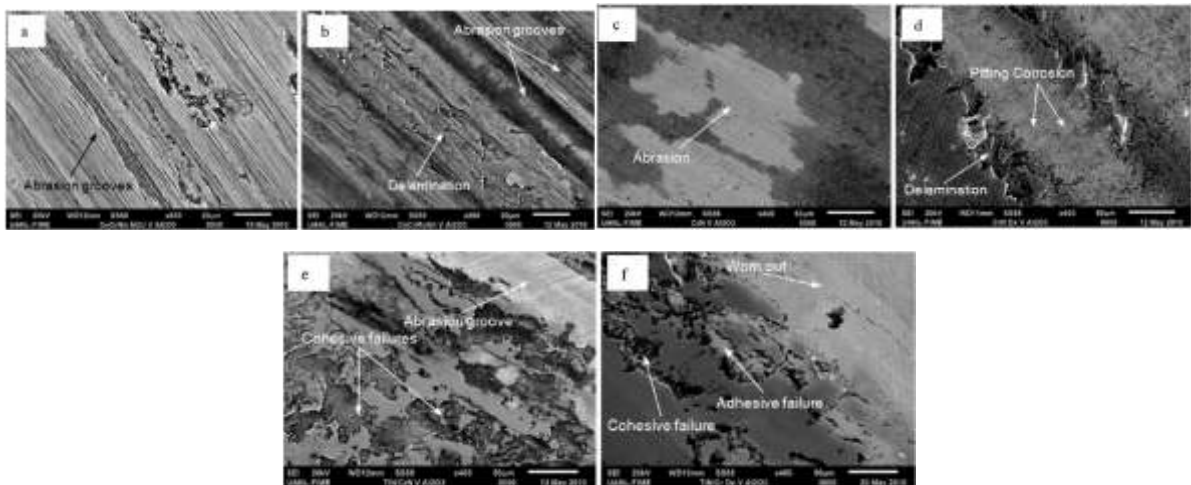


Рис. 1.21 – Мікрофотографії слідів зносу: вихідний сплав Co-Cr-Mo (a); попередньо азотована поверхня зразка Co-Cr-Mo (б); CrN покриття без азотованого підшару (c); з азотованим підшаром покриття CrN (d); багатшарове покриття (TiN/CrN) \times 3 без азотованого підшару (e); багатшарове покриття (TiN/CrN) \times 3 з азотованим підшаром (f) [108]

З даних досліджень видно, що істотну роль на зносостійкість покриттів мають матеріал і спосіб зміцнення підкладки, що і є особливо важливим для зміцнення поршневих кілець з сірого чавуну, які працюють в умовах циклічних навантажень.

В роботі [109] представлені дослідження структури, механічних властивостей і термічної стабільності нанометрового багат шарового покриття системи CrN/TiN.

На рис. 1.22 показана типова дифрактограма покриття CrN/TiN, осадженого при оптимізованій швидкості потоку N₂ від 3 l см³/хв і напругах зсуву підкладки -80 В.

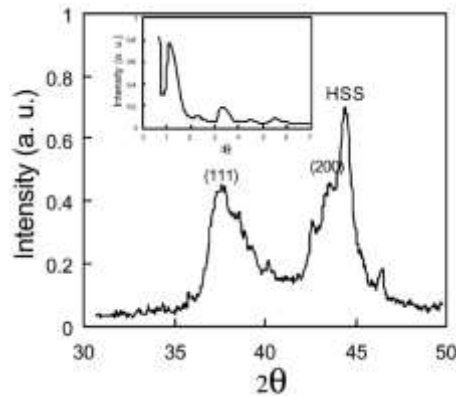


Рис. 1.22 – Рентгенівські спектри понадрешітки покриття CrN/TiN осадженого при напрузі зсуву підкладки -80 В. Вставка показує рентгенограми при низьких кутах покриття, що свідчать про яскраво-виражену перехідну зону і структуру понадрешітки [109]

Кубічна фаза CrN/TiN з переважною орієнтацією (111) і (200) характеризується високою щільністю і дрібнозернистою структурою. Підвищення напружень зсуву підкладки призвело до збільшення інтенсивності піків (200) відносно (111), та це вказує на інтенсивне іонне бомбардування, яке сприяє зростанню на осаджуваній поверхні. Твердість поверхні разом з напругою підкладки також підвищується, однак покриття стає більш крихким, в результаті чого спостерігається зниження адгезії і когезійної міцності при тесті на дряпання (Scratch Test). З іншого боку, коли напруга підкладки знижується до -60 В, то в покритті починає переважати орієнтація (111) і воно стає більш пластичним.

Вставка на рис. 1.22 показує рентгенограми при малокутових випромінюваннях покриття CrN/TiN. П'ять піків, які представлені на цьому рисунку, вказують на

дрібнозернисту структуру понадрешітки і площинність перехідної зони. За середнім значенням піків, визначена товщина покриття, яка становила 7-8 нм. В цьому випадку досягалася найбільш висока твердість. Підвищення напруги підкладки при постійній товщині покриття змінює піки рентгенограми понадрешітки, що вказує на перемішування іонів і взаємну дифузію між сусідніми шарами, яка погіршує структури понадрешітки і механічні властивості.

На рис. 1.23 показано, що нанотвердість покриття і ступінь адгезії після тесту на дряпання, залежать від напруги підкладки.

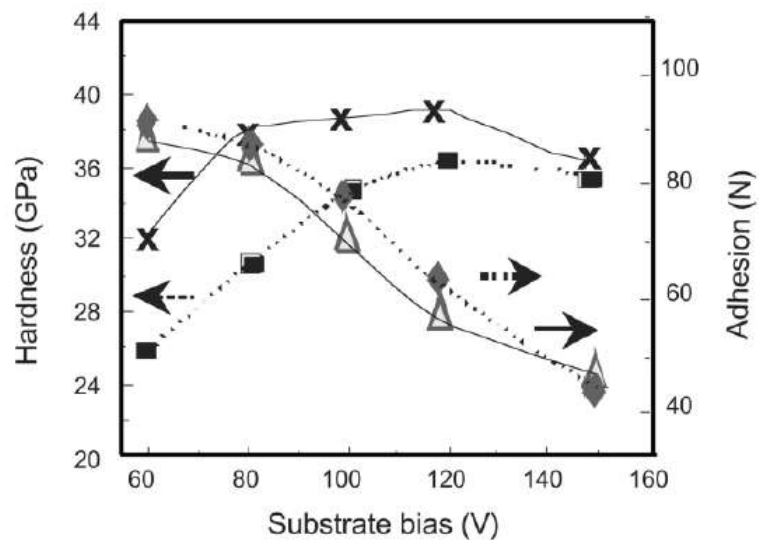


Рис. 1.23 – Нанотвердість і адгезія понадрешітки покриття CrN/TiN в залежності від напруги підкладки. Точки на суцільній лінії є зразки з товщиною покриття 7,5 нм, а пунктирною – відповідають – 13 нм [109]

Підвищення напруги підкладки призводить до незначного зростання твердості, але й одночасно до зниження адгезії через крихкість покриття. Максимальна твердість, що дорівнює 40 ГПа характерна для зразка, напиляного при напругах зсуву -120 В і товщині покриття 7,5 нм. При напругах зсуву -80 В понадрешітки CrN/TiN показала максимальну твердість з товщиною покриття 7-9 нм. Підвищення товщини до 13 нм призводить до істотного зниження твердості і незначної зміни критичного навантаження при тесті на дряпання в низькому діапазоні напруги підкладки (60-120 В). При високих напруженнях (-

150 В) обидва типи покриттів сприяли зниженню твердості, однак зразок з меншою товщиною цей процес інтенсифікує. На думку авторів, такий ефект пояснюється інтенсивним іонним бомбардуванням під час осадження покриття, через що структура понадрешітки погіршується або навіть зникає через взаємну дифузію матеріалів сусідніх шарів.

На рис. 1.24 показано вплив відпалу на твердість багатошарового покриття CrN/TiN в порівнянні з одношаровим.

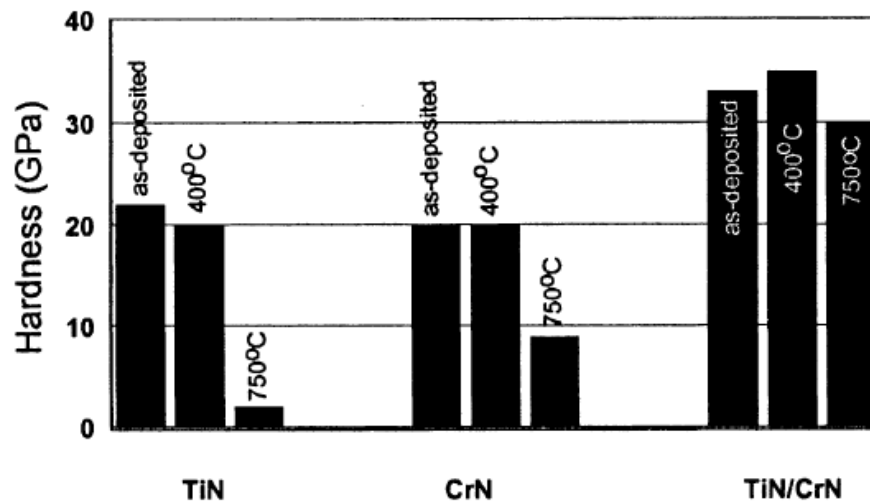


Рис. 1.24 – Вплив відпалу на твердість багатошарового покриття CrN/TiN в порівнянні з одношаровими TiN та CrN [109]

При температурі відпалу 400°C, покриття на основі TiN показало зниження твердості, яке вказує на окислення покриття при цій температурі. Покриття CrN не показало жодних істотних змін у твердості. Покриття CrN/TiN відрізняється незначним збільшенням твердості, що можливо пояснюється досконалою структурою понадрешітки. Після відпалу при температурі 750°C покриття TiN і CrN майже повністю окислилося, що призвело до різкого падіння твердості. Багатошарове покриття CrN/TiN відрізняється більш високою термостійкістю і незначним падінням твердості. Досить висока жароміцність покриття CrN/TiN підтверджується і в роботах [110, 111].

Особливий інтерес представляє робота [112], в якій виконані порівняльні випробування на тертя і знос різноманітних за складом покриттів, в тому числі і багат шарового іонно-плазмового CrN/TiN, відносно поршневих кілець. Випробування на тертя і знос проведені на випробувальному устаткуванні при лінійному коливальному русі ковзання в умовах мащення. Величину навантаження використовували постійною – 300 Н. Зразки виготовляли з деталей поршневого кільця і гільзи циліндра. Вихідні параметри покриттів, обраних для порівняльного аналізу в якості зміцнюючих, представлені в таблиці 1.13.

Таблиця 1.13 – Вихідні параметри порівняльних покриттів

Процес нанесення покриття	Склад покриття поршневого кільця	Товщина покриття, мкм	Твердість, HV	Шорсткість, мкм
Високошвидкісне газополум'яне напилення	Nano-75Cr ₃ C ₂ -25NiCr Розмір порошку –10 мкм	150	801	0,11
Високошвидкісне газополум'яне напилення	WC CoCr//CrC-NiCr Розмір порошку - 30+10 мкм	190	1039	0,33
Високошвидкісне газополум'яне напилення	75Cr ₃ C ₂ -25NiCr Розмір порошку -45 +20 мкм	130	798	0,23
Електролітичне осадження	NiPCO+Si ₃ N ₄	15	1057	0,24
Іонно-плазмове напилення	CrN/TiN	8,5	1965	0,17
Електроосадження	Cr	145	1136	1,2

Результати оцінки параметрів якості та випробувань покриттів на зношування, наведених в таблиці 1.13 і 1.14.

Як видно з таблиці 1.14, найменший знос як кільця, так і гільзи, характерний для іонно-плазмового покриття CrN/TiN. Такому покриттю характерний і більш низький коефіцієнт тертя.

У даній роботі були представлені результати і випробувань зміцнених кілець на двигуні протягом 100 год. Результати цих випробувань представлені на рис. 1.25.

Таблиця 1.14 – Результати випробувань зміцнюючих покриттів зразків поршневого кільця

Процес нанесення покриття	Склад покриття поршневого кільця	Коефіцієнт тертя	Ваговий знос зразків гільзи, мг	Ваговий знос зразків кілець, мг
Високошвидкісне газополум'яне напилення	Nano-75Cr ₃ C ₂ -25NiCr Розмір порошку -10 мкм	0,15	0,3	0,1
Високошвидкісне газополум'яне напилення	WC CoCr//CrC-NiCr Розмір порошку - 30+10 мкм	0,21	10	0,0
Високошвидкісне газополум'яне напилення	75Cr ₃ C ₂ -25NiCr Розмір порошку -45 +20 мкм	0,15	0,4	0,2
електролітичне осадження	NiPCO+Si ₃ N ₄	0,15	0,5	0,1
Іонно-плазмове напилення	CrN/TiN	0,16	-	0,0
Електроосадження	Cr	0,16	0,3	0,2

Як видно з рис. 1.25, найменший знос зафіксований у поршковому кільці, зміцненого багат шаровим покриттям CrN/TiN.

Однак слід зазначити, що в цій роботі не представлено інформації щодо матеріалу виготовлення поршневих кілець і їх типорозміру. Крім того, представлені результати

відносяться до зміцнення автомобільних компресійних кілець, які працюють при високих швидкостях ковзання і питомих тисках на стінку циліндра, ніж маслоз'ємні.

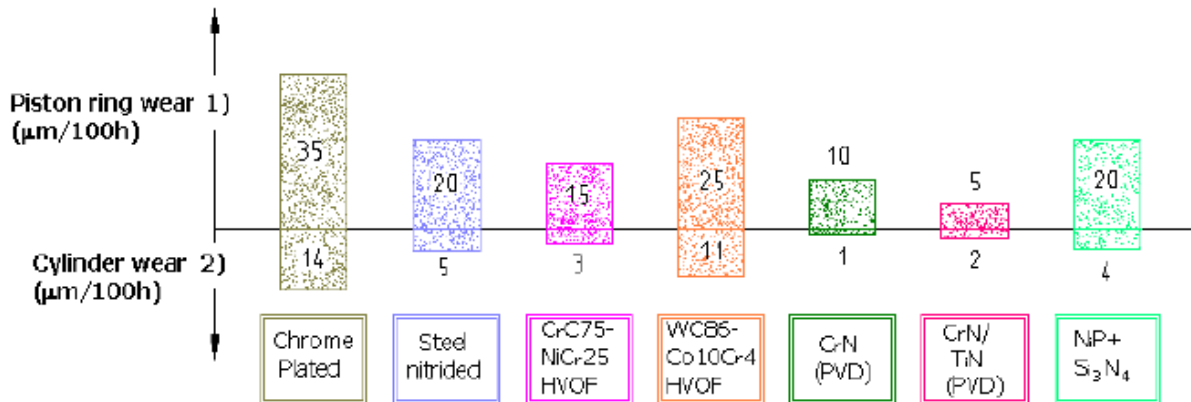


Рис. 1.25 – Результати випробувань поршневих кілець на двигуні, зміцнених різними технологіями [112]

Додатково було проаналізовано структуроутворення та триботехнічні властивості і інші іонно-плазмові покриття з багатошаровою структурою [113-150]. Було встановлено що розглянуті багатошарові композиції, з урахуванням матеріалу підкладки, забезпечують підвищення триботехнічних властивостей поверхні, порівняно з розглянутими вище одношаровими. Проте, розглянуті дослідження не містять інформації щодо забезпечення зносостійкості виробів з сірого чавуну в якості матеріалу для основи.

1.5 Постановка мети і завдань досліджень

В розділі проаналізовано результати досліджень виявлених розробок по найбільш ефективним методам зміцнення деталей, що працюють в сполученнях. Найбільш ефективними є іонно-плазмові нанопокриття, що забезпечують підвищення рівня споживчих властивостей, які осаджені на робочу поверхню нітрида – та карбідоутворюючих компонентів. Покриття на основі титану [23, 25-28, 30, 33, 34, 38, 40-46, 51, 52, 54-56, 59-65, 67-75, 78, 79, 81-89, 91, 92, 94] і ряд інших – одношарових покриттів

[23, 27, 29, 31, 33, 35-40, 43-54, 57, 58, 62-67, 71, 73, 76, 77, 80-83, 86, 87, 89, 90, 92, 93], за своїми можливостями багато в чому вичерпали себе, і вони не можуть забезпечити значного поліпшення триботехнічних характеристик. Слід також зазначити, що в більшості випадків такі покриття не є універсальними і потребують цільового дослідження можливості застосування, для забезпечення максимальної ефективності [63, 76, 87, 99, 112, 120, 121]. Крім того, одношарові покриття в ряді випадків не забезпечують високої тріщиностійкості, що супроводжується підвищеною схильністю до руйнування зміцненого шару [69, 75, 86, 112, 135]. Важливим також є і матеріал підкладки, який має істотний внесок в особливості структуроутворення покриття як в процесі технологічного процесу виготовлення деталей, так і у період експлуатації. Слід також зазначити, що нанокompозитні покриття забезпечують більш високі властивості, ніж покриття, які характеризуються мікророзмірністю структури [66-69, 73, 75, 79, 85, 86, 88, 92, 100, 123, 125, 128, 130, 133, 141, 143-145, 147, 148, 150].

Тому становить інтерес розглянути можливість використання багатшарових покриттів з різнорідних матеріалів для забезпечення більш високих триботехнічних характеристик, зокрема триботехнічних, які можуть знайти широке застосування в машинобудівній галузі. Так, вище розглянуті багатшарові покриття, зокрема системи CrN/TiN, демонструють широкий спектр споживчих властивостей: високі показники твердості і стабільність при експлуатації, стабільну зносостійкість, відносно низький коефіцієнт тертя, достатню адгезію між покриттям і підкладкою, корозійну стійкість, жароміцність, тріщиностійкість і ін. [71, 96, 97, 103-105, 126]. Тому, таке покриття можна вважати досить універсальним для широкого діапазону застосувань, а також і для зміцнення поршневих кілець двигунів внутрішнього згорання, які схильні до інтенсивних навантажень і зносу під час роботи. Можна сформулювати такі мету і завдання досліджень дисертаційної роботи:

Мета роботи: підвищення якості та триботехнічних властивостей робочої поверхні чавунних маслоз'ємних поршневих кілець двигунів техніки спеціального

призначення з сірого чавуну нанесенням іонно-плазмового багат шарового зміцнюючого покриття.

Завдання роботи:

1. Проаналізувати виявлену інформацію за умовами роботи та механізмами зношування поршневих кілець, методами їх зміцнення і досягаємим властивостям.

2. Розробити методологічний підхід для проведення досліджень з використанням експериментальних, теоретичних підходів для оцінки особливостей структурних змін при терті та зношуванні маслоз'ємних поршневих кілець.

3. Запропонувати та випробувати новий технологічний процес зміцнення багат шаровою наноконпозицією робочої поверхні маслоз'ємних поршневих кілець при використанні різних співвідношень зміцнюючих фаз.

4. На основі виконаного аналізу оцінити вплив запропонованого способу зміцнення на рівень напружено-деформованого стану поршневих кілець і розробити метод контролю і бракувальні норми за рівнем залишкових напружень, що формуються в матеріалі поршневих кільцях при зміцненні, та спосіб їх зниження.

5. Провести стендові порівняльні випробування на тертя та зношування зміцнених поршневих кілець з сірого чавуну і оцінити характер і швидкість їх зношування в порівнянні з серійними в умовах виробництва.

6. Запропонувати теоретичний підхід використання оптико-математичного аналізу для визначення характеру формування залишкових напружень і структуроутворення поверхонь тертя поршневих кілець.

7. Оцінити технологічну та економічну ефективність нової технології зміцнення поршневих кілець для двигуна техніки спеціального призначення.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИ І МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗНОСОСТІЙКОСТІ МАСЛОЗ'ЄМНИХ ПОРШНЕВИХ КІЛЕЦЬ ДВИГУНІВ

У розділі узагальнені методи проведення досліджень. Розглянуто теоретичні та експериментальні підходи до проведення досліджень, а також наведені нові методики, використані в роботі.

2.1. Методологічний підхід та етапи досліджень зносостійкості маслоз'ємних поршневих кілець

Статистичним аналізом зносостійкості поршневих кілець поточного виробництва було встановлено, що найчастіше їх виготовляють з сірого і високоміцного чавунів та виявлено методи їх зміцнення. Це хромування, в тому числі з лазерною або плазмовою обробками [5, 12-16, 18, 143]. Було показано, що таке поєднання двох технологічних процесів хоча і є ефективним для підвищення зносостійкості, проте складним, оскільки потрібне використання двох різних технологій, у тому числі одна вимагає спеціального екологічного захисту.

З огляду на це, запропонували новий технологічний процес зміцнення поршневих кілець нанесенням багат шарових наноструктурних покриттів. Виходячи з наявного досвіду фахівців [100-102, 108-110], запропонували в якості багат шарової композиції використовувати хромовий і титановий електроди, які відрізняються різними збіжними температурами при експлуатації виробів. З урахуванням цього, необхідно було визначити оптимальне співвідношення Ti/Cr, яке б забезпечило високий рівень трибологічних характеристик.

Особливо важливим було встановити можливість використання такого покриття для зміцнення виробу з сірого чавуну зі значною часткою графіту.

На першому етапі виконано аналіз особливостей структуроутворення при нанесенні зміцнюючих наноструктурних покриттів одно- і багатошарових різних композицій та вплив на споживчі властивості зміцнених виробів. Потім, порівняльно вивчили вплив технологічних параметрів нового способу зміцнення виробів при різних співвідношеннях фаз з вихідним станом. Для аналізу використовували сучасні методи і розробляли нові підходи для отримання інформації про якість та структурні зміни, зносостійкості робочої поверхні поршневих кілець.

Послідовність і напрямок по реалізації завдань і мети досліджень представлені діаграмою Ісікава на рис. 2.1.

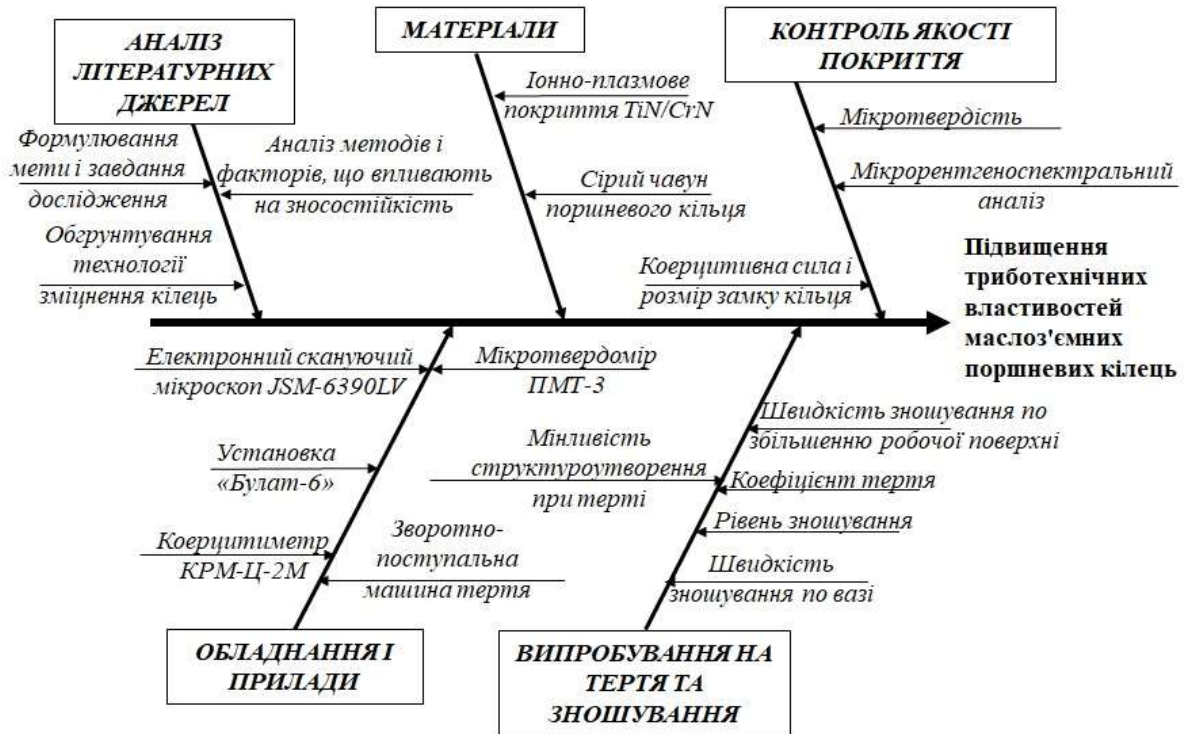


Рис. 2.1 Етапи досліджень в дисертаційній роботі і послідовність їх реалізації

На основі аналізу літературних джерел, новітніх досягнень в галузі тертя та зношування та методів нанесення зносостійких покриттів, в тому числі і наноструктурних, запропонований метод і матеріал їх нанесення – іонно-плазмове

багатошарове осадження TiN/CrN. Традиційні методи гальванічного хромування, плазмового і лазерного зміцнення є недостатньо ефективними через наявність в матеріалі кільця високої частки пластинчастого графіту, що може вплинути на формування крихкої складової в поверхневому шарі кільця – цементиту. Це може ставити під сумнів стабільність роботи такого виробу. З огляду на цей фактор, була розглянута можливість зміцнення наноструктурних покриттів з використанням прогресивних іонно-плазмових методів. Доцільним є використання багатошарових покриттів з різномірних матеріалів та нанесенням попередньо підшару з Cr для забезпечення більш високої якості зчеплення з основою і необхідних експлуатаційних характеристик, зокрема триботехнічних, які можуть знайти широке застосування в машинобудівній галузі. У літературі відсутня інформація про ефективність такого покриття стосовно до виробів з сірого чавуну, що працюють в умовах тертя та зношування.

2.2. Метод зміцнення маслос'ємних поршневих кілець двигунів

Виконані комплексні дослідження були спрямовані на підвищення зносостійкості маслос'ємних поршневих кілець двигунів спеціальної техніки. Загальний вигляд кілець наведено на рис. 2.2., а на рис. 2.3 – ескіз поперечного перерізу. На ескізі відображена робоча поверхня (поясок), який має висоту 0,2 мм з верхнім граничним відхиленням +0,3 мм. Дана поверхня призначена для знімання масла зі стінок циліндра в картер двигуна і запобігання його попадання в камеру згоряння. Діаметр такого кільця, наведеного на рис. 2.2, і складає 207 мм, а величина замку у вільному стані знаходиться в межах 26 - 32 мм. На рис. 2.2, б представлені маслос'ємні поршневі кільця двигуна спеціальної техніки. Діаметр таких кілець становить 120 мм, з аналогічним розміром робочої кромки 0,2 мм. Лінійний розмір замку знаходиться в діапазоні 19 – 24 мм.

Хімічний склад металу маслос'ємних поршневих кілець, згідно Д100.04.ДТ61, представлений в табл. 2.1.

Табл. 2.1 – Хімічний склад маслоз'ємних поршневих кілець

C, %	Si, %	Mn, %	P, %	Cr, %	Ni, %	S, %	Ti, %	Fe, %
2,6-3,1	1,4-1,9	1,0-1,5	0,3-0,5	0,3	0,6	0,1	0,04-0,12	решта



а

б

Рис. 2.2 Загальний вигляд маслоз'ємних поршневих кілець двигунів спеціальної техніки

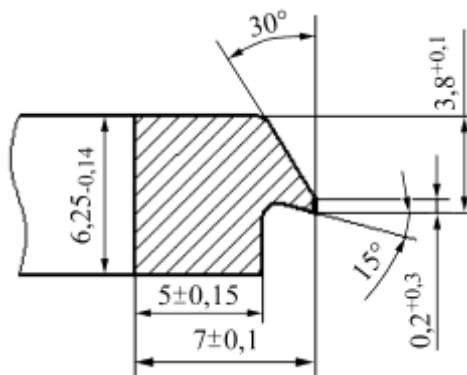


Рис. 2.3 Ескіз маслоз'ємного поршневого кільця (див. Рис. 2.2, а) двигуна спеціальної техніки

Експлуатація таких двигунів супроводжується істотним розвитком димності вихлопу, нагаровідкладення у випускному тракті, і перевитрати моторної оливи, внаслідок інтенсивного зносу їх маслоз'ємних поршневих кілець.

Поршневі кільця двигунів техніки спеціального призначення за серійною технологією в даний час виготовляють з сірого чавуну з завершальною операцією гальванічного нанесення покриття оловом. Таку операцію застосовують для прискореного припрацювання виробу на початковому етапі експлуатації.

Для зміцнення робочої поверхні (пояска) кільця наносили багатошарове іонно-плазмове покриття TiN/CrN на устаткуванні типу «Булат-6» (рис. 2.4). Покриття наносили при різних співвідношеннях Ti/Cr, а саме: Ti/Cr=0,17, Ti/Cr=0,27 та Ti/Cr=0,40. Метою цього було встановлення оптимального співвідношення фаз покриття з точки зору забезпечення найвищої зносостійкості.

Осадження покриття здійснювали при ідентичних параметрах, а саме: струмі дуги $I_d = 100 \text{ A}$ і напрузі зсуву підкладки $U_{см} = -200 \text{ В}$. По черзі наносили 6-ть шарів CrN і 5-ть – TiN для кожного зі співвідношень, попередньо розпиливши підшар чистого Cr товщиною $\sim 50 \text{ нм}$. При цьому, для співвідношення Ti/Cr=0,17 товщина шару TiN становила – 50 нм, а CrN – 240 нм. Для співвідношення Ti/Cr=0,27, товщина шару TiN становила – 90 нм, а CrN – 200 нм. Для співвідношення Ti/Cr=0,40, товщина шару TiN становила – 140 нм, а CrN – 170 нм. Загальна товщина багатошарового покриття при вищевказаних співвідношеннях досягала 1,7 мкм. Для зміцнення були використані кільця без покриття оловом.



Рис. 2.4 Загальний вигляд устаткування «Булат-6»

Як було виявлено з інформації літературних джерел, багат шарова композиція здатна забезпечити високу зносостійкість і, в тому числі, стійкість до циклічного навантаження при зворотно-поступальному русі, яке характерно при роботі такого виробу в двигуні.

Перед осадженням багат шарової композиції виконали вимірювання величини замку кільця, а також оцінили структурний стан такої деталі по коерцитивній силі в трьох зонах (рис. 2.5). Для цього використовували коерцитиметр моделі КРМ-Ц-2М, який забезпечує контроль виробів по цьому параметру в діапазоні від 1,0 до 60,0 А/см (рис. 2.6).

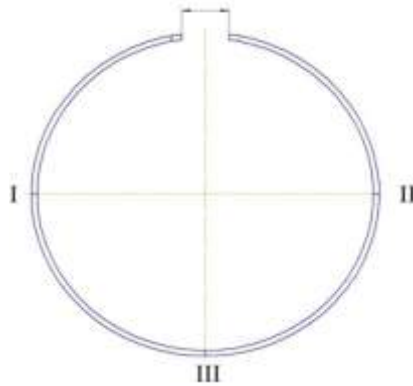


Рис. 2.5 Зони вимірювань коерцитивної сили і лінійного розміру замку поршневого кільця



Рис. 2.6 Коерцитиметр моделі КРМ-Ц-2М

Після нанесення покриття композицією TiN/CrN (при трьох співвідношеннях Ti/Cr) стан кільця визначали, згідно мінливості його напруженого

стану по коерцитивній силі. Аналогічні вимірювання проводили і на серійних кільцях.

2.3. Методика визначення трибологічних характеристик та якості робочих поверхонь поршневих кілець

Для визначення зносостійкості проведені стендові випробування на машині тертя (рис. 2.7, 2.8) зі зворотно-поступальним рухом при різних швидкостях ковзання – від 0,7 до 1,6 м/с. Такі швидкості були обрані, виходячи з оцінки рівня зношування та умов експлуатації двигуна. Найбільш детально досліджували механізми зношування поверхонь тертя при переході від пружної деформації при швидкості ковзання 1,3 м/с до пластичної – при 1,0 м/с. При цих випробуваннях проводили порівняльний аналіз зношування серійних поршневих кілець і зміцнених різним співвідношенням Ti/Cr.

Така машина тертя мала по 4 камери в яких встановлювали по одному зразку гільзи циліндра і по два зразки поршневого кільця, комплектуючи їх таким чином в одну трибосистему (див. Рис. 2.8 та 2.9). При цьому, дві трибосистеми, які з'єднані послідовно (див. Рис. 2.8), випробовувались при одній швидкості ковзання. Інші дві – при іншій швидкості. Запуск машини здійснювався електродвигуном (Рис. 2.8, поз. 8). Через ремінний привід, обертальний рух передавався на колінчастий вал (Рис. 2.8, поз. 6), який трансформував його у зворотно-поступальний, і через шарнір (Рис. 2.8, поз. 5) він передавався безпосередньо на рухомий зразок трибосистеми – гільза циліндра.

Випробування проводили у середовищі моторної оливи M14-B₂ з крапельною її подачею (2 краплі у хвилину) у зону тертя (див. Рис. 2.8 та 2.9 поз. 2). Питомий тиск при терті було задано 0,8 МПа, при тому що середній питомий тиск такого кільця від власних сил пружності складає 0,06 МПа. Розрахунок середнього питомого тиску проводився відповідно до [151]. Такий тиск було обрано

з метою скорочення часу випробувань за рахунок інтенсифікації процесів зношування.

Загальний час випробувань склав 100 год. З них:

- перший етап - припрацювання – 3 год.;
- другий етап основних випробувань – 25 год.;
- третій етап основних випробувань – 72 год.

Загальна довжина пройденого шляху тертя зі швидкістю ковзання 1 м/с склала 360 км, а при швидкості 1,3 м/с – 468 км.

Оцінку рівня зносу оцінювали за втратою ваги як поршневих кілець, так і гільз циліндрів на аналітичних вагах WA-200 (Рис. 2.10). Окрім цього, був виконаний аналіз швидкості зношування поршневих кілець за результатами зносу відносно до загального часу випробувань.

Похибку вимірювання зносу оцінювали статистичним методом шляхом зважування по 10 пар зміцнених варіантів (при $Ti/Cr=0,17$, $Ti/Cr=0,27$ та $Ti/Cr=0,40$) та серійних поршневих кілець після випробувань при швидкостях ковзання 1,0 та 1,3 м/с. Після чого було оцінено сумарне значення отриманого зносу для кожної з 10 пар зразків кожного варіанту. На основі цього оцінено середній знос при відповідній швидкості ковзання та варіанту кільця. На основі такого аналізу найбільше відхилення зносу поршневих кілець від середнього рівня (для кожного варіанту), за результатами основних випробувань (див. Розділ 3), не перевищувало 5 %.

Для розрахунку коефіцієнта тертя кожного варіанту поршневого кільця було проведено випробування на машині тертя СМТ-1 за схемою «диск-колодка» (Рис. 2.11) у середовищі моторної оливи M14-B₂ з крапельною її подачею у зону тертя. В якості зразків для диску було використано матеріал виготовлення гільзи циліндру за Д100.01.001 ДТ, а колодка – зразок серійного кільця та з відповідним співвідношенням зміцнюючих елементів покриття. При цьому, питома навантаження на зразок, швидкості ковзання та пройдений шлях тертя відповідали

основним випробуванням. Під час випробувань фіксували момент тертя. Після чого було підраховано коефіцієнт тертя для кожного варіанту за формулою (2.1):

$$f = \frac{M_{mp}}{P \cdot r_p}, \quad (2.1)$$

де M_{mp} - момент тертя, Н·м;

P - сила нормального тиску, що притискає кільце до гільзи, Н;

r_p - радіус диска, м;

До і після випробувань також оцінювали рівень мікротвердості на приладі моделі ПМТ-3 (рис. 2.12). Після випробувань була виконана локальна оцінка мінливості структури і хімічного складу робочих поверхонь серійних кілець, і зміцненим оптимальним співвідношенням елементів іонно-плазмового покриття з використанням електронної мікроскопії та мікрорентгеноспектрального аналізу зі скануючим електронним мікроскопом JSM-6390LV (рис. 2.13). Вимірювання вмісту хімічних елементів проводились у спеціальній робочій камері. Прискорююча напруга сканування поверхні складала 15 kV, а локальність аналізу – 2 мкм.



Рис. 2.7 Машина тертя зі зворотно-поступальним рухом

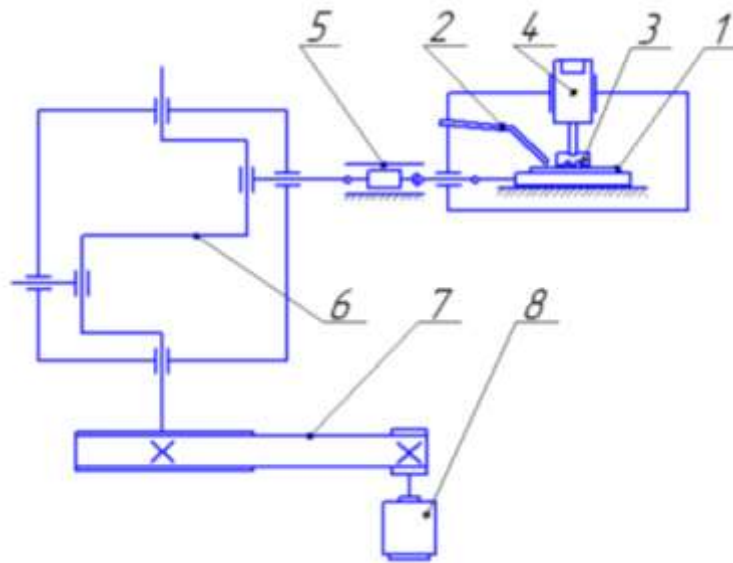


Рис. 2.8 Кінематична схема машини тертя зі зворотно-поступальним рухом: 1 - зразок гільзи; 2 – патрубок крапельної подачі оливи; 3 – зразки маслоз’ємних поршневих кілець; 4 – вантаж; 5 – шарнір; 6 – колінчастий вал; 7 – привід; 8 – електродивгун

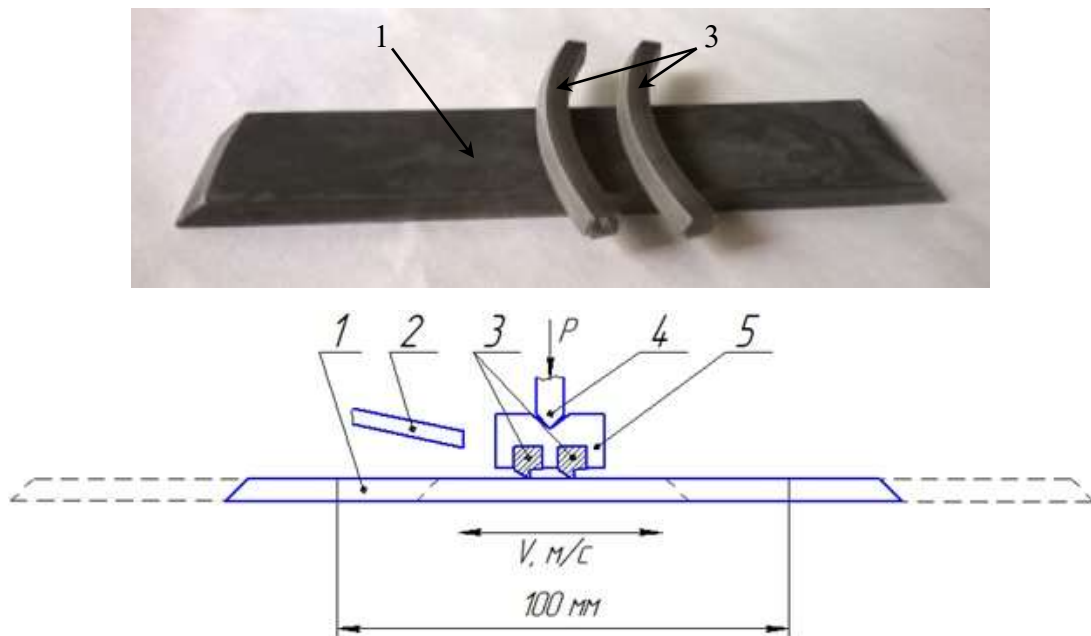


Рис. 2.9 Схема випробувань поршневих кілець: 1 – зразок гільзи; 2 – патрубок крапельної подачі оливи; 3 – зразки маслоз’ємних поршневих кілець; 4 – навантаження; 5 – кільцеутримувач



Рис. 2.10 Загальний вид вагів WA-200

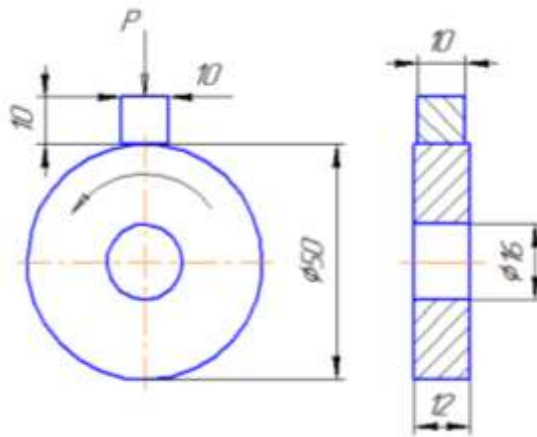


Рис. 2.11 Схема випробувань для визначення коефіцієнту тертя



Рис. 2.12 Мікротвердомір ПМТ-3



Рис. 2.13 Скануючий електронний мікроскоп JSM-6390LV

2.4. Математичне планування експерименту. Виявлення факторів впливу властивостей покриттів на мікротвердість та швидкість зношування

З метою виявлення факторів, що можуть впливати на показники зносостійкості поршневих кілець було використано метод планування експерименту з побудовою лінійних рівнянь регресії з чотирма значеннями змінних факторів (план експерименту – 2^2). Для оцінки рівня впливу факторів (x_1 та x_2) на розглядаємий параметр (відгук – y) було побудовано рівняння регресії, які наведені у табл. 2.1 та 2.2 і враховували:

- вплив концентрації в покритті Ti (x_1) та Cr (x_2) на рівень його мікротвердості (y_1);
- вплив концентрації в покритті Ti (x_1) та Cr (x_2) на швидкість його зношування (y_2).

Такі змінні фактори обрані, тому що концентрацію компонентів можливо надійно регулювати часом їх нанесення у багат шаровому покритті з оцінкою їх співвідношення, а відгуки властивостей – оцінювали показниками, які дозволяють пояснити характер та рівень змін при експлуатації поршневих кілець.

Для оцінки впливу концентрації основних елементів зміцнюючого покриття на його мікротвердість, було обрано діапазон їх значень, який відповідав умовам забезпечення високого рівня зносостійкості. Після кодування цих факторів та розрахунків, були отримані рівняння (2.2 – 2.3).

Табл. 2.2 Рівні значень змінних факторів Ti (x_1) та Cr (x_2)

Рівень значення	Змінні фактори	
	x_1 (концентрація Ti, %)	x_2 (концентрація Cr, %)
Верхній рівень	60	90
Нульовий рівень	30,25	46
Нижній рівень	0,5	2

Табл. 2.3 Закодовані фактори x_1 і x_2 для оцінки їх впливу на мікротвердість y_1 та швидкість зношування y_2

№ з/п	x_1	x_2	y_1 (мікротвердість, ГПа)	y_2 (швидкість зношування мг/год)
1	60 (+1)	90 (+1)	65	1,0
2	0,5 (-1)	2 (-1)	45	0,1
3	60 (+1)	2 (-1)	60	0,7
4	0,5 (-1)	90 (+1)	50	0,3

$$y_1 = 55 + 15x_1 + 5x_2 + 0x_1 \cdot x_2 \quad (2.2)$$

З отриманого рівняння (2.1) встановлено, що найбільший вплив на забезпечення високого рівня мікротвердості покриття має фактор x_1 , тобто концентрація титану впливає у три рази більше, що відповідає його фізико-механічним властивостям.

Для оцінки впливу концентрації основних елементів зміцнюючого покриття на його швидкість зношування, було обрано той самий діапазон факторів і їх значень, який відповідав умовам забезпечення високого рівня зносостійкості (див.

Табл. 2.1). Після кодування цих факторів (Табл. 2.2) та розрахунків, було отримано рівняння (2.2).

$$y_2 = 0,525 + 0,65x_1 + 0,25x_2 + 0,05x_1 \cdot x_2 \quad (2.3)$$

З отриманого рівняння (2.2) видно, що найбільший вплив на забезпечення високої швидкості зношування покриття має фактор x_1 , тобто також концентрація титану. З огляду на високий рівень впливу цього фактору на мікротвердість, такий результат свідчить і про вплив на схильність такої фази покриття до розвитку деградації та руйнування під час тертя та зношування.

Розрахунки показали, що для забезпечення високої зносостійкості покриття необхідно корегувати в ньому концентрацію Ti із забезпеченням оптимального співвідношення Ti/Cr.

2.5. Оптико-математичний метод оцінки змін якості поверхні тертя поршневих кілець

Після стендових випробувань на зношування була проведена оптико-математична оцінка вихідних і поверхонь тертя з визначенням змін при терті в точках контакту у напрямку руху.

Розробки проведені на основі базової методики з використанням рівнянь гідродинаміки Нав'є-Стокса відповідно до раніше проведених досліджень [152 – 161]. Ці дослідження базувались на аналізі змін структуроутворення та властивостей при оцінці металографічних зображень досліджуємих зон, зокрема, високохромованих чавунів та ріжучого інструменту. В представлених дослідженнях цей метод дозволяв, зокрема, оцінити дифузійні процеси, анізотропію властивостей та міру нестиснення аналізуємих структур.

Для досліджень змін при терті поршневих кілець використовували якісний і кількісний опис оптико-математичним методом. Такий метод полягав в апроксимації електронних фотографій металу похилої поверхні (прилеглої до зони

тертя) і безпосередньо зони тертя кілець. При цьому аналізували серійне кільце і з іонно-плазмовим покриттям з оптимальним співвідношенням Ti/Cr, яке забезпечує найвищу зносостійкість. Результати цих розробок не суперечать результатам проведених досліджень, зокрема, авторами Ауліним В.В. та ін. [162].

Поверхні тертя, а також похилої зони маслоз'ємних поршневих кілець, аналізували, зокрема при певних інтервалах нейтральності абсолютних величин лапласіанів і дивергенцій. Їх фізична суть полягає в описі дифузійних потоків і міри нестиснення досліджуємих зон тертя. При цьому, аналізували конкретні, заздалегідь задані інтервали нейтральності абсолютних величин лапласіанів і дивергенцій, які дозволяють оцінити мінливість поверхонь тертя в залежності від обраної технології зміцнення та умов тертя металу поршневих кілець, описати формуємі дифузійні потоки і міру нестиснення аналізуємих зон тертя. Встановлено, що такий підхід дозволяє комплексно оцінити вплив різних чинників, зокрема на структуроутворення поверхні матеріалу, а також на рівень твердості, мікротвердості [152, 153].

Для реалізації оптико-математичного методу використовували наступний пакет програм:

- Microsoft Excel – для створення алгоритму розрахунку, здійснення і представлення результатів обчислень у вигляді таблиць.

- Microsoft Visual Basic, що представляє собою інтегровану середу розробки програмного забезпечення за допомогою якої, створювали алгоритми розрахунку та здійснювали обчислення характеристик кольору кожного пікселя аналізуємої фотографії від 0 до 255. При цьому 0 – це найтемніший піксель, а 255 – найсвітліший. Наступним кроком, програма забезпечувала формування масиву апроксимованих зображень у заданому інтервалі.

Для здійснення аналізу поверхонь тертя в залежності від швидкості ковзання виконано розрахунок інтервалів відносної нейтральності абсолютної величини

лапласіанів і дивергенції за п'ятиточковою різницевою схемою скануванням поверхні представленою на Рис. 2.14.

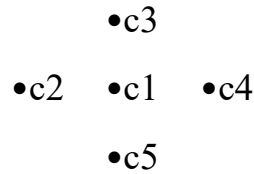


Рис. 2.14 – П'ятиточкова різницева схема

Для оцінки стану поверхонь за точками тертя використовували оператори дивергенції (2.4) і Лапласа (2.5), де «с» – показник умовного кольору аналізуемого відповідним оператором пікселя зображення, «х,у» – координати пікселя відповідно до схеми на Рис. 2.14. При цьому вираз (2.5) є другою похідною від виразу (2.4).

$$Dv = \frac{\partial c}{\partial x} + \frac{\partial c}{\partial y} \quad (2.4)$$

$$Lp = \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \quad (2.5)$$

На першому етапі виконали розрахунок значень операторів лапласіана і дивергенції за формулами (2.4) і (2.5), які відповідають кожній точці (пікселю) п'ятиточкової різницевої схеми з номерами від «с1» до «с5» відповідного оператора (див. Рис. 2.14). При цьому, точка «с1» представляє собою заданий центральний піксель навколо якого апроксимувались і сусідні – «с2», «с3», «с4», «с5». Зображення розбивали на зони (комірки) з заданою кількістю пікселів (m×n). Кожен піксель задавали як середню точку, яка знаходилась в заданій аналізуемій комірці розміром 2x2 пікселі. Значення лапласіана і дивергенції, які відповідають заданій комірці, розраховували за формулами:

$$l = c2 + c3 + c4 + c5 - 4 \cdot c1 \quad (2.6)$$

$$div = c2 + c3 - 2 \cdot c1 \quad (2.7)$$

Слід зауважити, що результат, як по оператору лапласа, так і по дивергенції може бути менше, більше або дорівнювати нулю. Проте алгебраїчна сума вищевказаних операторів по всій фотографії наближується до нуля. Річ у тім, що сума лапсасіанів і дивергенції рівні нулю за винятком граничних значень (граничні пікселі, які розташовуються по контуру фотографії). Доказ при цьому, зокрема для дивергенції, наступний:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (c_{ij-1} - 2c_{ij} + c_{i-1j}) &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [(c_{ij-1} - c_{ij}) + (c_{i-1j} - c_{ij})] = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (c_{ij-1} - c_{ij}) + \\ \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m (c_{i-1j} - c_{ij}) &= \sum_{i=1}^m (c_{i1} - c_{in}) + \sum_{j=1}^n (c_{1j} - c_{mj}) \end{aligned} \quad (2.8)$$

Тут головне, що $a_1 - a_2 + a_2 - a_3 + \dots - a_{n-1} + a_{n-1} - a_n = a_1 - a_n$. Тому, якщо взяти відношення абсолютних величин написаних вище сум до абсолютних величин сум дивергенції по всій фотографії, то вони будуть на порядок менші останніх. Це тому, що кількість граничних точок на порядок менша кількості точок на фотографії: $2 \cdot (m+n) / (m \cdot n) \cdot a$. В цьому випадку « a » можна прийняти порядка 1, оскільки відношення середнього значення оператора по граничним точкам дорівнює середньому значенню по всій фотографії. Для перевірки цього твердження, « a » можна ввести в ще одну умову. Тобто, якщо « a » на порядок менше $2 \cdot (m+n)$, то суми дивергенцій наближується до нуля. Аналогічно і для лапсасіанів.

На підставі вищенаведеного доказу (2.8) та зробленого до нього зауваження можна конструювати цілий клас формул для сусідніх кольорів центрального пікселя. Тоді сума їх значень, як для дивергенції та і для лапсасіану буде дорівнювати нулю за винятком граничних точок. Поділивши такі формули на суму абсолютних величин, ми можемо назвати їх нейтральностями. Розрахунок нейтральностей абсолютних величин лапсасіанів і дивергенції, для комірки заданого розміру 2×2 пікселі, проводився за виразами (2.9) та (2.10) відповідно.

Показник « l » означає, що нейтральність відноситься до розрахованого за виразом (2.6) лапласіану, а « div » – до дивергенції (2.7).

$$N_l = \frac{|l_1 + l_2 + l_3 + l_4|}{|l_1| + |l_2| + |l_3| + |l_4|} \quad (2.9)$$

$$N_{div} = \frac{|div_1 + div_2 + div_3 + div_4|}{|div_1| + |div_2| + |div_3| + |div_4|} \quad (2.10)$$

Після апроксимації електроних фотографій металу похилої поверхні кільця (прилеглої до зони тертя) і безпосередньо зони тертя, програма сформувала масив зображень, що відносяться до певних інтервалів абсолютних величин нейтральності. Фізична суть нейтральності абсолютних величин дивергенції полягає в описі міри нестиснення (щільність фрагмента зображення). Нейтральності абсолютних величин лапласіанів описують дифузійні потоки. Проведені дослідження з використанням оптико-математичного методу дозволяють оцінити зміни, що відбуваються на поверхні тертя поршневих кілець з урахуванням певної швидкості ковзання, і встановити зв'язок з результатами випробувань.

У верхньому лівому кутку наведені фотографії поверхонь кільця (Рис. 5.2 - 5.3, Додаток Б, рис. 1 та рис. 2), які оцифровуються, а решта, відносяться до наступних інтервалів гістограм:

– у верхньому рядку зліва направо – зображення точок нейтральності абсолютної величини лапласіанів - 0-1/9, 1/9-2/9, 2/9-3/9, 3/9-4/9;

– у другому ряду зверху – продовження зображень, що відносяться до нейтральності абсолютної величини лапласіанів наступних інтервалів - 4/9-5/9, 5/9-6/9, 7/9-8/9, 8/9-1;

– в третьому ряду зліва направо зображення точок структури, пов'язані з інтервалами гістограм нейтральності абсолютних величин дивергенції - 0-1/9, 1/9-2/9, 2/9-3/9, 3/9-4/9 (в лівому кутку третього ряду зверху – порожнє місце);

– в четвертому ряду зверху продовження зображень, що відносяться до нейтральності абсолютних величин дивергенції наступних інтервалів - 4/9-5/9, 5/9-6/9, 7/9-8/9, 8/9-1.

Обрані вище інтервали пояснюються тим, що на екрані програми можна розмістити гістограму, яка складається лише з 19 інтервалів. Тобто шаг інтервалів буде дорівнювати 1/19. У чисельнику «1», тому що за формулами (2.6) та (2.7) числа можуть бути в межах від 0 до 1. Тоді перший інтервал гістограми від 0 до 1/19, другий – від 1/19 до 2/19 і так наступні.

Для кожного варіанта кільця зі сформованого масиву зображень, програма розрахувала гістограми абсолютних величин нейтральності похилої поверхні і зони тертя, які відображені у стовпцях відповідно до вище представленого порядку інтервалів (Додаток Б, табл. 1).

Також, виконано аналітичний опис двухперіодичності виявлених зон стиснення і розтягнення (скидання енергії) поверхонь тертя серійних поршневих кілець і, зміцнених багат шаровим іонно-плазмовим покриттям TiN/CrN після стендових випробувань при різних швидкостях ковзання (1,0 і 1,3 м/с). Оцінку також проводили по електронікроскопічним фотографіям поверхні тертя.

Для проведення розрахунків використовували енергетичні параметри і оцінювали періоди середніх значень негативних, нульових і позитивних лапласіанів по стовпцям і рядкам фотографій вихідної поверхні і зони тертя серійних (Рис. 5.2, Додаток Б, Рис. 1) і порівняльно зміцнених кілець (Рис. 5.3 Додаток Б, Рис. 1) відповідно.

Алгоритм розрахунку реалізований у вигляді підпрограми Visual Basic. Сама програма засилає в підпрограму відповідні значення. На кожній фотографії підпрограма визначає значення періодів кожного її пікселя по стовпцях і рядках. Цикл по пробним періодам був підрахований в діапазоні від 2 до 200 пікселів, за наступними вихідними даними:

– S_{aj} – масив середніх значень;

- s_{1j} – середня частка негативних лапласіанів за стовпцями або рядками;
- s_{2j} – середня частка нульових лапласіанів за стовпцями або рядками;
- s_{3j} – середня частка позитивних лапласіанів за стовпцями або рядками.

При цьому, індекси в алгоритмі вживаються в такому значенні:

q – номер ознаки (1 негативний, 2 нульовий, 3 позитивний);

i – номер групи одного і того ж пробного періоду;

j – номер всередині однієї і тієї ж групи одного і того ж пробного періоду;

t – пробний період в пікселях.

Кількість періодів дорівнювало цілій частині від кількості пікселів виділених на період. Потім виконано обчислення сумарного алгебраїчного відхилення від середнього значення часткою негативних, нульових і позитивних лапласіанів всередині пробного періоду за формулою (2.11).

$$a_q = \frac{\sum_{j=1}^t s_{qj}}{t} \quad (2.11)$$

Обчислення середнього значення часткою негативних, нульових і позитивних лапласіанів всередині пробного періоду виконано за формулою (2.12).

$$b_q = \sum_{j=1}^t (s_{qj} - a_q) \quad (2.12)$$

Після чого, використовували абсолютну величину відхилення від середнього значення за формулою (2.13).

$$b_q = |b_q| \quad (2.13)$$

Сумарне значення функціоналу всередині пробного періоду знаходили з виразу (2.14), а з нього - здійснювали накопичення функціоналу за формулою (2.15).

$$c_i = b_1 + b_2 + b_3 \quad (2.14)$$

$$f = f + c_i \quad (2.15)$$

За результатами підрахунку циклу створено масив функціоналів пробних періодів. Сортування створеного масиву виконано по спадаючій показників функціоналу для виявлення найбільш значущих змін.

Розраховані періоди представлені в Додатку Б (табл. 3 – 6), де перший стовпець – це період в пікселях, а другий – відповідний йому функціонал.

Окрім того виконано розрахунок М-трійок з метою виявлення залежностей від технології зміцнення та умов випробувань на тертя та зношування. М-трійка – це така залежність, всі елементи якої дорівнюють нулю. Її особливість полягає в тому, що вона не може бути подібна до жодної ненульовій залежності (М-трійки). Схема розташування особливих точок (пікселів) М-трійки представлена на рис. 2.15.

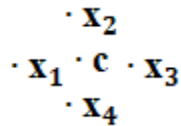


Рис. 2.15 – Схема розташування особливих точок (пікселів) М-трійки

Позначення особливих точок М-трійки представлені у виразах (2.16) та (2.17).

$$x_1 + x_2 = a \quad (2.16)$$

$$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 = b \quad (2.17)$$

За визначенням М-трійки:

$$s = 2 \cdot a - b \quad (2.18)$$

$$s = (a - 2 \cdot c) \cdot (b - 4 \cdot c) \quad (2.19)$$

$$t = 8 \cdot c - 2 \cdot a - b \quad (2.20)$$

тобто, для особливих точок М-трійок виконуються умови:

$$2 \cdot a - b = 0 \quad (2.21)$$

$$(a - 2 \cdot c) \cdot (b - 4 \cdot c) = 0 \quad (2.22)$$

$$8 \cdot c - 2 \cdot a - b = 0 \quad (2.23)$$

або:

$$b = 2 \cdot a \quad (2.24)$$

$$(a - 2 \cdot c) \cdot (2 \cdot a - 4 \cdot c) = 0 \quad (2.25)$$

$$8 \cdot c - 2 \cdot a - 2 \cdot a = 0 \quad (2.26)$$

або:

$$(a - 2 \cdot c) \cdot (2 \cdot a - 4 \cdot c) = 0 \quad (2.27)$$

$$8 \cdot c - 4 \cdot a = 0 \quad (2.28)$$

звідси:

$$a = 2 \cdot c \quad (2.29)$$

$$b = 4 \cdot c \quad (2.30)$$

Перевірка:

$$s = 4 \cdot c - 4 \cdot c = 0 \quad (2.31)$$

$$m = (2 \cdot c - 2 \cdot c) \cdot (4 \cdot c - 4 \cdot c) \quad (2.32)$$

$$t = 8 \cdot c - 4 \cdot c - 4 \cdot c = 0 \quad (2.33)$$

Підставивши вираз (2.16) у (2.29) отримаємо:

$$x_1 + x_2 = 2 \cdot c \quad (2.34)$$

а вираз (2.17) у (2.30) отримаємо:

$$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 = 4 \cdot c \quad (2.35)$$

звідси:

$$x_3 + x_4 = 2 \cdot c \quad (2.36)$$

З цих рівностей видно, що для особливих трійок, не обов'язково щоб $x_1 = x_2 = x_3 = x_4$. Але якщо, зокрема, $x_1 = x_2 = x_3 = x_4 = c$, то це особлива М-трійка.

Розглянемо ще один окремий випадок. Нехай $x_1 = x_2$, а $x_3 = x_4$. Тоді:

$$a = 2 \cdot x_1, \text{ а } 2 \cdot x_3 = 2 \cdot c \text{ (або } x_3 = c) \quad (2.37)$$

$$\begin{aligned} & (2 \cdot x_1 - 2 \cdot c) \cdot (2 \cdot x_1 + 2 \cdot c - 4 \cdot c) = \\ & (2 \cdot x_1 - 2 \cdot c) \cdot (2 \cdot x_1 - 2 \cdot c) = 4 \cdot (x_1 - c) \cdot 2 \end{aligned} \quad (2.38)$$

Тобто, якщо c не дорівнює x_1 , то не отримаємо нульову М-трійку. Слідуючи за викладеній вище методикою обчислення особливих М-трійок, можна визначити, що якщо $x_1 = x_2 = x_3 = x_4 = c$, то 7-й рядок, в якій всі 5 кольорів однакові, буде особливою М-трійкою (Додаток В, табл. 1 - 3). Якщо для першого рядка, наприклад $c = 7$, $x_1 = 2$, $x_2 = 12$, $x_3 = 8$, $x_4 = 6$, то це теж М-трійка, незважаючи на наявність 5-ти різних кольорів.

Результати розрахунків М-трійок представлені в табл. 1 - 3 Додатку В і влаштовані таким чином. Вони мають 6 стовпців: 1-й і 2-й відносяться до загальної фотографії кільця, 3-й і 4-й - до її вихідної поверхні, 5-й і 6-й - до зони тертя. Безпосередньо сама гістограма займає 7 рядків по числу описаних вище випадків.

Додатково було виконано розрахунок та оцінку таких характеристик, як кольору, середньоквадратичного відхилення, узагальненого градієнта, 3-го лапласіану (третьої похідної від лапласіана), 4-го лапласіану (четвертої похідної від лапласіана), лапласіану під кутом 90° та відсотка потужності дисипації. Розрахунок цих залежностей виконано відповідно до методик, які викладені у [160, 161]. Метою цього було встановлення залежностей якості поверхонь тертя поршневих кілець відповідно до умов тертя з урахуванням запропонованої технології зміцнення.

Висновки до другого розділу

1. На основі аналізу літературних джерел узагальнено існуючі методи та підходи до зміцнення поршневих кілець, в тому числі і сучасні технології, що базуються на наноструктурних покриттях. Встановлено можливість використання багат шарових покриттів, які можуть дозволити істотно підвищити стійкість тонкостінних виробів. Для цього розглянули літературні джерела по використуванню технологій зміцнення поршневих кілець, а також фактори, що впливають на їх зносостійкість.

2. Для досліджень було використано метод планування експерименту з побудовою лінійних рівнянь регресії з чотирма рівнями значень змінних факторів (план експерименту – 2^2). Побудовано два рівняння регресії. За результатами їх аналізу

встановлено, що на мікротвердість та швидкість зношування багат шарового іонно-плазмового покриття найбільший вплив, наряду з іншими факторами, має концентрація Ti. Тому, визначали оптимальне співвідношення зміцнюючих елементів покриття для забезпечення високої зносостійкості.

3. Зміцнююче покриття TiN/CrN наносили на устаткуванні «Булат-6» зі співвідношеннями Ti/Cr=0,17, Ti/Cr=0,27 та Ti/Cr=0,40. Зміцнювали поршневі кільця, виготовлені з сірого чавуну. Відповідно технічним вимогам до матеріалу їх виготовляли по Д100.04.ДТ61 для двигунів техніки спеціального призначення. Такі поршневі кільця мали наступний хімічний склад, %: C = 2,6-3,1; Si = 1,4-1,9; Mn = 1,0-1,5; P = 0,3-0,5; Cr ≤ 0,3; Ni ≤ 0,6; S ≤ 0,1; Ti = 0,04-0,12; Fe - інше. При серійній технології виготовлення таких кілець, передбачено нанесення на їх робочу зону покриття оловом для прискореного припрацювання. Іонно-плазмове зміцнення виключало використання покриття оловом. Процес осадження покриття здійснювали при струмі дуги $I_d = 100$ А і напрузі зсуву підкладки $U_{см} = -200$ В. По черзі наносили 6-ть шарів CrN і 5-ть – TiN, попередньо розпиливши підшар на метал поршневого кільця чистого Cr товщиною ~50 нм. При цьому товщина 1-го шару TiN становила 50 нм, а CrN – 240 нм при співвідношенні Ti/Cr=0,17. Для співвідношення Ti/Cr=0,27, товщина шару TiN становила – 90 нм, а CrN – 200 нм. Для співвідношення Ti/Cr=0,40, товщина шару TiN становила – 140 нм, а CrN – 170 нм. Загальна товщина багат шарового покриття для всіх варіантів співвідношення досягала 1,7 мкм.

4. Дослідження якості та властивостей проводили порівняльно з використанням комплексних досліджень вихідного і зміцненого стану поршневих кілець. При цьому оцінювали рівень Hц і мінливість структури металу при експлуатації. Рівень залишкових напружень після зміцнення оцінювали шляхом порівняння з вихідним станом з використанням неруйнівного контролю якості, згідно показників коерцитивної сили. На основі отриманих результатів розробили технологію їх зняття перед використанням поршневих кілець в експлуатації після зміцнення.

5. Використані підходи до досліджень полягали в оцінках та обґрунтуваннях запропонованого технологічного процесу з композицією багатошарового іонно-плазмового наноструктурного TiN/CrN зміцнення. Оцінку показників зносостійкості проводили на основі стендових випробувань на тертя та зношування. Детально випробування проводили при двох швидкостях ковзання: 1,0 і 1,3 м/с. Вони обрані для оцінки рівня зношування і процесів структуроутворення, які формуються на поверхнях тертя при переході від пружної деформації (при 1,3 м/с) до пластичної (при 1,0 м/с) з урахуванням умов експлуатації. В окремі періоди випробувань оцінювали коефіцієнт тертя, швидкості зношування та ступінь зміни мікротвердості поверхні тертя. Для визначення особливостей структурних змін проводили електронномікроскопічні дослідження і мікрорентгеноспектральний аналіз поверхні тертя, а також прилеглої до неї зони. Для опису зміни структуроутворення використовували оптико-математичний її опис (робочої і прилеглої поверхні).

5. Для виявлення залишкових напружень в періоди до- і після зміцнення кілець використовували магнітний неруйнівний метод по коерцитивній силі (коерцитиметр КРМ-Ц-2М). Ступінь зміцнення оцінювали по мікротвердості приладом ПМТ-3. Випробування на тертя і знос проводили на машині тертя при зворотно-поступальному русі. Для визначення ступеня зміни хімічного складу поверхонь тертя в локальних мікрозонах використовували скануючий електронний мікроскоп JSM-6390LV.

6. Для детального аналізу процесів, що відбуваються на поверхні тертя використовували вдосконалену методика оптико-математичного опису змін на поверхні тертя з одночасним визначенням хімічного складу в різних зонах тертя, що дозволить встановити кінетику розвитку мінливості стану системи. Така методика полягала в оцінках масиву зображень похилої зони і поверхні тертя, що відносяться до певних інтервалів абсолютних величин лапласіанів і дивергенцій. Їх фізична суть полягає в описі дифузійних потоків і такого показника як щільність фрагмента зображення, що характеризують різні зони тертя.

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТРИБОЛОГІЧНИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ПОРШНЕВИХ КІЛЕЦЬ, ЗМІЦНЕНИХ БАГАТОШАРОВОЮ
НАНОЗМІЦНЮЮЧОЮ КОМПОЗИЦІЄЮ TiN/CrN

3.1 Результати вимірювання лінійних розмірів замків поршневих кілець та коерцитивної сили їх робочих зон після нанесення покриттів

Перед нанесенням багат шарового покриття TiN/CrN оцінювали рівень напружень партії маслороз'ємних поршневих кілець двигуна спеціальної техніки [Додаток А, п. 11]. Покриття наносили товщиною 1,7 мкм. Для цього одночасно провели статистичні вимірювання коерцитивної сили поршневих кілець, що виготовляються за серійною технологією.

Вимірювання величини замку і рівня залишкових напружень проводили протягом 1,5 місяців з періодичністю оцінки 7-9 днів. Зони вимірювань різних партій чавунних поршневих кілець (сірий чавун) представлені на Рис. 3.1 (зони: I, II і III). Ступінь неоднорідності напружено-деформованого стану кільця, по коерцитивній силі, оцінювали порівняльно до- і після осадження зміцнюючого покриття.

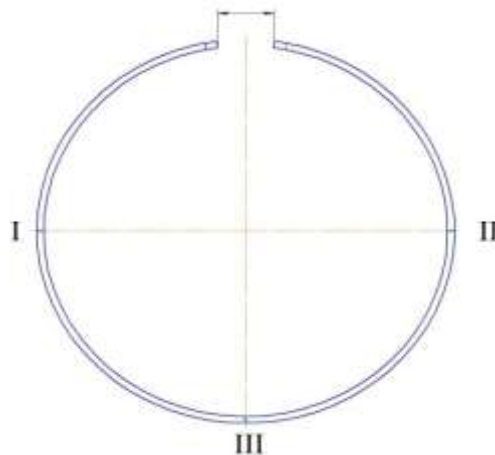


Рис. 3.1. Зони вимірювань коерцитивної сили і лінійного розміру замку поршневого кільця

Аналізом встановлено, що після нанесення покриття в залежності від періоду оцінювання розміру замку і рівня показань коерцитивної сили вони в цих зонах змінювалися. Зміни пов'язані з формуванням залишкових напружень при зміцнюючих обробках. У таблиці 3.1 наведені величини замків до нанесення зміцнюючого покриття, а також перший і останній період вимірювання після нанесення покриття за весь період спостережень. У таблиці 3.2 відображені показання коерцитивної сили першого і останнього вимірювань в трьох зонах після нанесення покриття.

Таблиця 3.1 Лінійні розміри замків до і після нанесення покриття

Номер поршневого кільця	До нанесення покриття, мм	Після нанесення покриття, мм (1-е вимірювання)	Після нанесення покриття, мм (останнє вимірювання)
1	31	30	30
2	27	27	27
3	24	29	28

Таблиця 3.2 Показники коерцитивної сили в трьох зонах вимірювань після нанесення покриття

Номер поршневого кільця	Після нанесення покриття, А/см (1-е вимірювання)				Після нанесення покриття, А/см (останнє вимірювання)			
	I	II	III	середнє значення	I	II	III	середнє значення
1	11,9	11,8	12,2	11,97	11,5	11,4	11,8	11,57
2	16,9	16,9	19,3	17,7	16,4	16,3	19,0	17,23
3	14,8	14,0	14,2	14,3	14,0	13,9	13,5	13,8

До нанесення покриттів коерцитивна сила була близька до рівня цього показника після нанесення покриття (останнє вимірювання), але відрізнялася рівнем показань різних поршневих кілець, що пов'язано з використанням

відповідного набору шихтових матеріалів при їх виготовленні (спадкових властивостей металу).

Результати вимірювань (таблиця 3.1) показали, що після нанесення покриття величина замку в кільці № 1 зменшилася на 3,2%, а в № 3 збільшилася на 17,24%. Останнє вимірювання зазору замку, по закінченню проведення експерименту, в кільці № 3 показало, що воно зменшилось на 3,45%, що за розміром відповідає вимогам креслення. У кільці № 2 розмір замку залишився незмінним за весь період спостережень і відповідав вихідному стану.

Результати вимірювань (таблиця 3.2) виявили, що в результаті природнього старіння (вилежування) рівень залишкових напружень знизився, в середньому, на 3,34%, 2,65% і 3,5% для кілець № 1, № 2 та № 3 відповідно, що свідчить про ефективність такої технології для релаксації напружень в поршневих кільцях після їх зміцнення.

Додатково оцінили рівень коерцитивної сили маслороз'ємних поршневих кілець, що виготовляються за серійною технологією, яка передбачає нанесення покриття оловом, необхідне для прискореного припрацювання виробу (таблиця 3.3). Рівень напружень таких кілець можна порівняти з кільцями, додатково зміцненими іонно-плазмовим покриттям (таблиця 3.3). Однак, якщо порівняти середнє значення напружень по всім кільцям як серійних, так і з іонно-плазмовим покриттям, то можна побачити, що коерцитивна сила зміцнених кілець, після природнього старіння, на 10,8% нижче в порівнянні з серійними. Це також підтверджує, що істотного впливу на рівень напружень запропонована технологія нанесення зміцнюючого покриття не має. Такий вплив нанесення покриття на рівень напружень в кільці пояснюється низькою чутливістю матеріалу до накопичень напружень через наявність графітових включень [163, 164]. Це також дозволяє забезпечувати підвищення зносостійкості таких виробів без втрати

довговічності при розвитку напружено-деформованого стану при експлуатації.

Таблиця 3.3 Коерцитивна сила серійних поршневих кілець в трьох зонах вимірювань

Умовні номери серійних поршневих кілець	Без зміцнюючого покриття, А/см			
	I	II	III	Середнє значення
1	18,9	17,2	18,7	18,27
2	14,8	14,5	15,2	14,83

3.2 Вплив мінімальної швидкості ковзання на зносостійкість зміцнених поршневих кілець

Відомо, що швидкість роботи двигуна в процесі експлуатації змінюється в певних межах. Тому становить інтерес визначити їх межі та виявити особливості структуроутворення в експлуатації при мінливості цього параметра.

В даному розділі аналізували границю впливу мінімальної швидкості ковзання, що дорівнює 1 м/с, при якій пройдений шлях тертя склав 360 км. Та вплив на зміну мікротвердості, знос і структуроутворення, що формуються при терті. Аналізом виявлено, що за всі періоди випробувань сумарний ваговий знос гільз циліндрів, що працювала в парі зі зміцненими кільцями (при співвідношенні $Ti/Cr=0,17$) на 42% вище в порівнянні з гільзою, яка працювала у sprzęженні з серійними кільцями (Рис. 3.2). При цьому, у варіанті зі зміцненням цим покриттям зі співвідношенням твердої складової до м'якої $Ti/Cr=0,27$ – сумарний знос гільзи вище на 56 % відносно серійної. Після зміцнення кільця покриттям зі співвідношенням $Ti/Cr=0,40$ – сумарний знос гільзи вище на 66 % відносно серійної.

З отриманих даних також видно, що підвищений знос характерний для гільз, що працюють в парі зі зміцненими кільцями – в період припрацювання. В цьому випадку знос вище в 3 рази при $Ti/Cr=0,17$ та 0,27, і в 3,9 рази – при $Ti/Cr=0,40$, в порівнянні з гільзою циліндрів, що випробовувалась з серійними кільцями. Це пояснюється

наявністю покриття оловом на серійних виробках, призначеного для прискореного припрацювання трибопари. Однак, вже на другому етапі випробувань ваговий знос гільзи, яка працювала в парі з зміцненим кільцями (при $Ti/Cr=0,17$) знижується в порівнянні з серійними на 43%, а на третьому – на 29%. Співвідношення елементів покриття $Ti/Cr=0,27$ та $Ti/Cr=0,40$ характеризуються більшим рівнем зносу гільз на 2-му і 3-му етапах в порівнянні з трибосистемою «гільза-серійне кільце» – в діапазоні від 21 % та 55 %.

З огляду на високу мікротвердість кілець з іонно-плазмовим покриттям (Рис. 3.4), були зафіксовані процеси локального схоплювання з матеріалом поверхні гільзи, що і викликало підвищену швидкість зношування на початковому етапі (період припрацювання) у всіх зразках.

Незначний приріст ваги кілець всіх варіантів на останньому етапі випробувань (Рис. 3.3), також пов'язаний з локальним схоплюванням окремих зон поверхні тертя. Результати оцінки свідчать про більш високу інтенсивність зношування серійних кілець.

За результатами випробувань, зношування кілець з іонно-плазмовим покриттям при співвідношенні $Ti/Cr=0,17$ менше відносно серійних в 12,2 рази. Співвідношення $Ti/Cr=0,27$ та $Ti/Cr=0,40$ забезпечують зниження зношування в 3,4 рази та на 47 % відносно серійного варіанту.

Збільшення висоти робочих поверхонь серійних і зміцнених кілець після випробувань представлені в таблиці 3.4. Висота робочих поверхонь серійних кілець після випробувань збільшилася, в середньому, на 0,06 мм (30 % від вихідного розміру робочої поверхні), а зміцнених лише на 0,015 мм (5–10 % від вихідного розміру робочої поверхні). Спостережуване є результатом розвитку процесу пластичної деформації робочих поверхонь кілець, та особливо це спостерігається при відсутності зміцнення.

Швидкість зношування по збільшенню висоти робочих поверхонь показує, що для зміцнених кілець вона нижче, в середньому, в 4 рази.

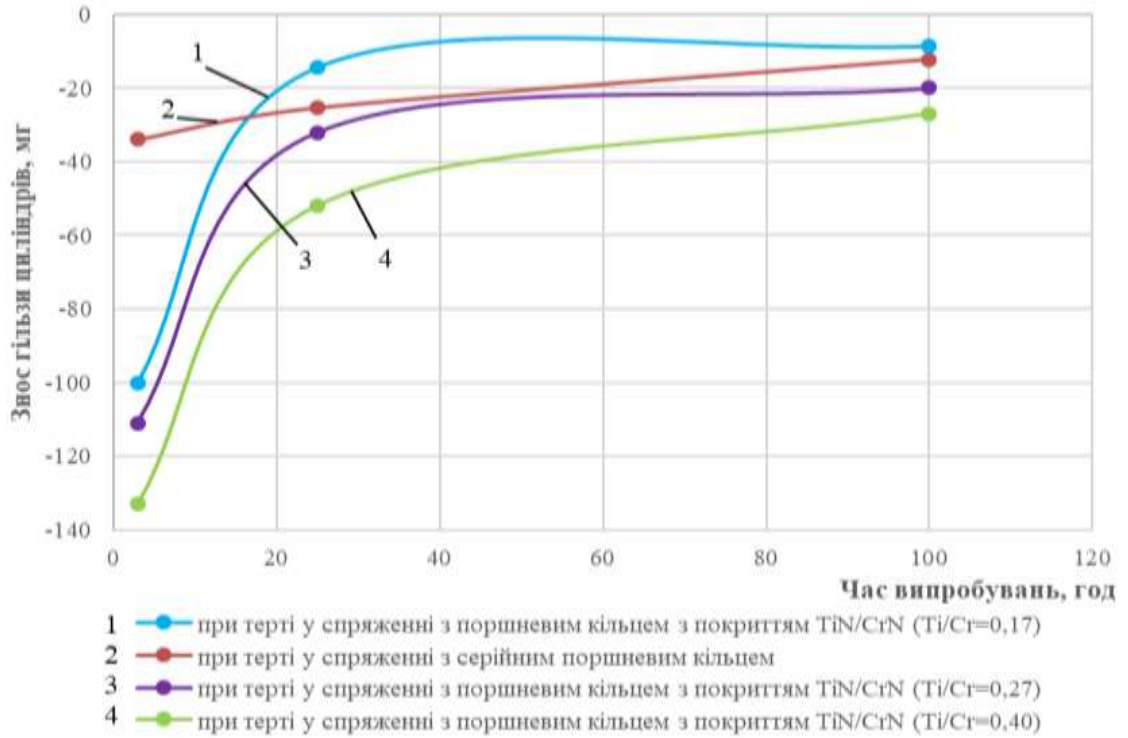


Рис. 3.2 - Знос гільзи циліндрів

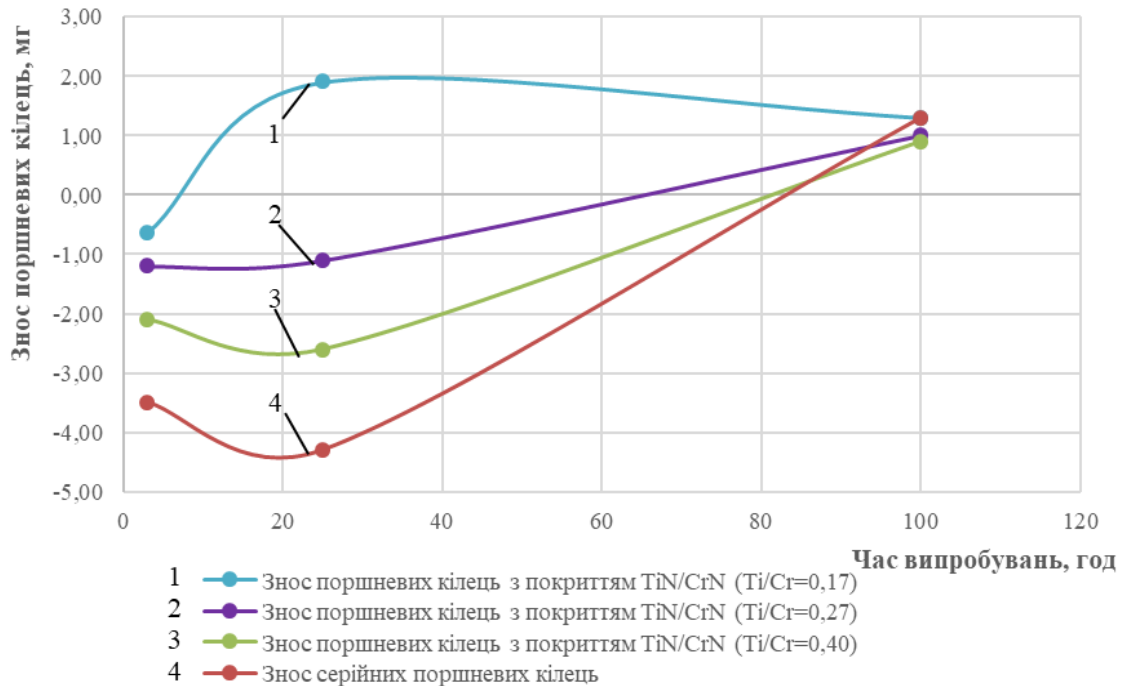


Рис. 3.3 - Ступінь зносу маслоз'ємних поршневих кілець

Таблиця 3.4 – Ступінь збільшення висоти робочої поверхні кілець

Варіант поршневих кілець		Збільшення висоти робочої поверхні, %
З покриттям TiN/CrN	Ti/Cr=0,17	5
	Ti/Cr=0,27	5
	Ti/Cr=0,40	10
Серійні		30

Середній коефіцієнт тертя, за весь час випробувань при цій швидкості ковзання, найвищий у серійного варіанту виготовлення кільця – 0,67 (Рис. 3.4). При цьому, іонно-плазмові зміцнення зі співвідношеннями Ti/Cr=0,17 та Ti/Cr=0,27 забезпечило його зниження до 0,21 (у 3 рази).

Покриття оловом, забезпечує стабільність показників тільки в період припрацювання, а вже після 2-го етапу випробувань, фіксується різниця в ступені зміцнення (Рис. 3.5). Вихідна середня мікротвердість кілець з покриттям TiN/CrN вище в 170 разів в порівнянні з серійно застосовуваними. Мікротвердість серійних кілець вже після 2-го етапу підвищується, в середньому, в 13,4 рази. Цей показник з іонно-плазмовим покриттям після 2-го і 3-го етапів знижується, в середньому, в 3,6 і 10,5 разів відносно вихідного стану.

Результати локального спектрального мікроаналізу робочих поверхонь тертя серійних кілець і зміцнених покриттям TiN/CrN зі співвідношенням Ti/Cr=0,17 (як найбільш зносостійкого) представлені в таблиці 3.5 і 4.6 відповідно. Вихідний (до випробувань) хімічний склад поверхні серійного кільця і після випробувань представлений в таблиці 3.5, спектр 1 і 2 відповідно. На Рис. 3.5 наведені зони визначення хімічного складу вихідної поверхні (спектр 1) і зони тертя (спектр 2) серійного кільця, і аналогічно на Рис. 3.6 (спектр 1 і 2) – зміцненого.

Слід зазначити, що олова в серійних кільцях, внаслідок повного його зносу на робочих поверхнях не виявлено.

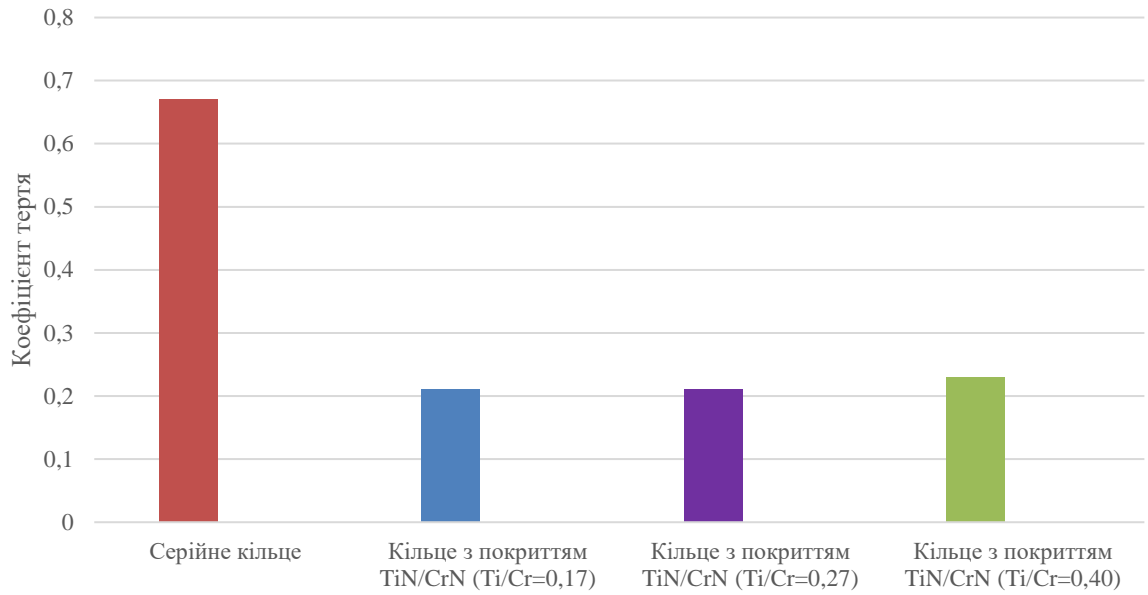


Рис. 3.4 – Коефіцієнт тертя поршневих кілець

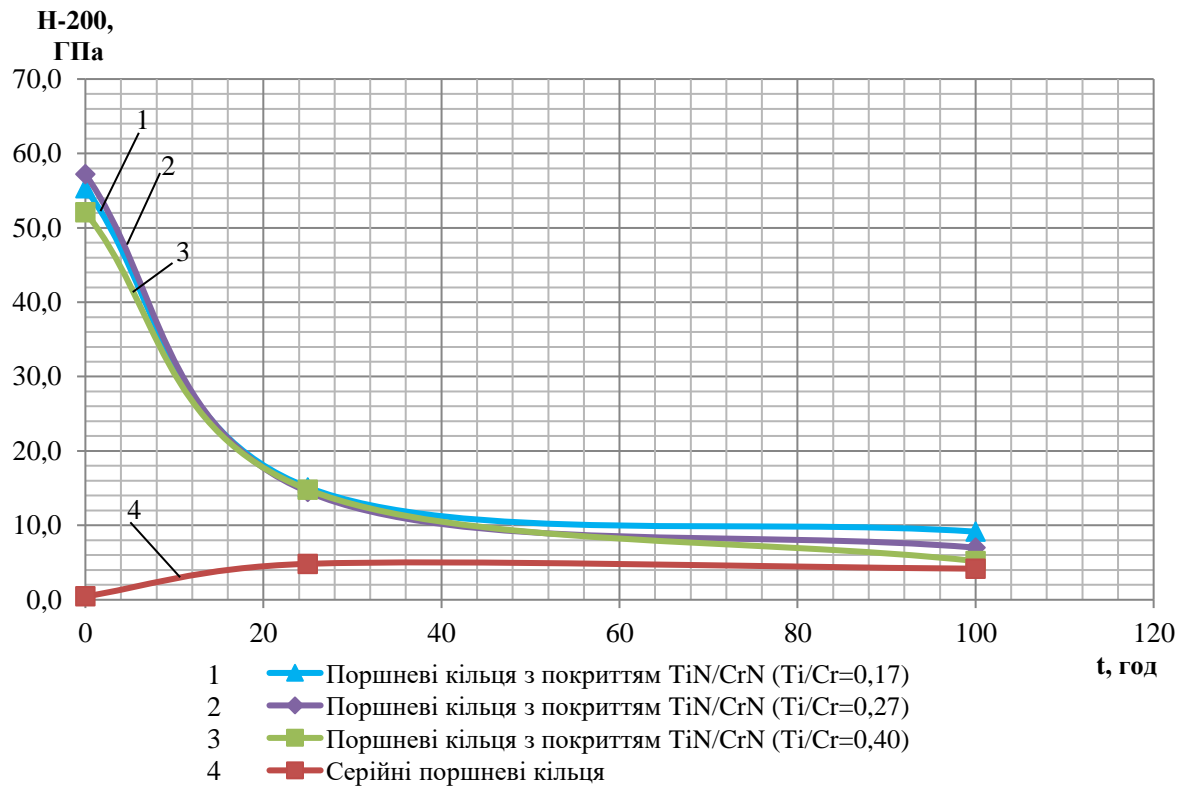


Рис. 3.5 - Мікротвердість кілець з іонно-плазмовим покриттям (1, 2, 3) серійних кілець (4)

Таблиця 3.5 - Хімічний склад вихідної (спектр 1) поверхні і зони тертя (спектр 2) серійного поршневого кільця (Рис. 3.5), %

Зона	C	O	Al	Si	P	Ca	Cr	Mn	Fe	Sn
спектр 1	1,09	-	0,29	0,29	-	-	-	-	1,14	97,21
спектр 2	2,23	-	0,23	1,65	0,52	-	0,42	1,66	93,28	-

Одночасно виявлено вплив пластичної деформації [Додаток А, п. 1], яка порушує цілісність покриття олова, що не бере участь в терті, сприяючи його структуризації в зоні похилої площини (див. Рис. 3.6). Це пов'язано з ефектом, відповідному принципу Сен-Венана, супроводжуваного зміною напружено-деформованого стану прилеглої області матеріалу (зона прилягання похилої поверхні до зони тертя кільця), внаслідок прикладання зовнішнього навантаження на ділянку (робоча зона кільця), дещо віддалену від зони виникнення деформації. Зміна макрорельєфа зони примикання похилої площини відповідає висоті робочої поверхні (~ 0,45-0,5 мм).

При цьому має місце часткове перенесення фосфору (див. таблицю 3.5, P = 0,52%) на поверхню кільця від його контртіла. Це пов'язано з приростом ваги даного кільця після випробувань (див. Рис. 3.3).

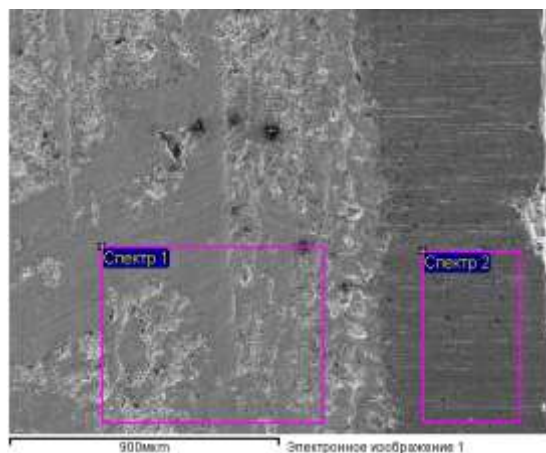


Рис. 3.6 - Зони визначення хімічного складу вихідної поверхні (спектр 1) і зони тертя (спектр 2) серійного кільця

Таблиця 3.6 - Хімічний склад поверхні тертя кільця з покриттям TiN/CrN (Ti/Cr=0,17) (Рис. 3.7), %

Зона	C	O	Al	Si	P	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe
спектр 1	0,8	0,13	-	0,16	-	-	14,5	83,77		0,63
спектр 2	4,41	0,91	0,60	1,25	-	0,77	10,76	39,08	-	42,22

Характерні поздовжні смуги на поверхні робочих зон обох варіантів кілець, формуються внаслідок тертя у напрямку їх переміщення при випробуванні. Спостерігається і формування графітної сітки в робочих зонах серійних кілець, які представлені і у вигляді окремих, хаотично розташованих і орієнтованих пластинчастих включень чорного кольору (див. Рис. 3.6), що відповідає початковому металу.

Результати аналізу вихідної поверхні випробуваних маслоз'ємних поршневих кілець з багат шаровим іонно-плазмовим покриттям TiN/CrN демонструють, що початкове відношення частки компонентів покриття Ti/Cr склало 0,17. Також на поверхні робочої кромки після випробувань були виявлені Al (0,55%) і Ca (0,2%). Можливим поясненням появи цих елементів є часткове їх перенесення при терті в умовах змащення маслом M14-B₂, що в свою чергу забезпечує внесок в приріст ваги зразків кілець на 2-му і 3-му етапах випробувань.

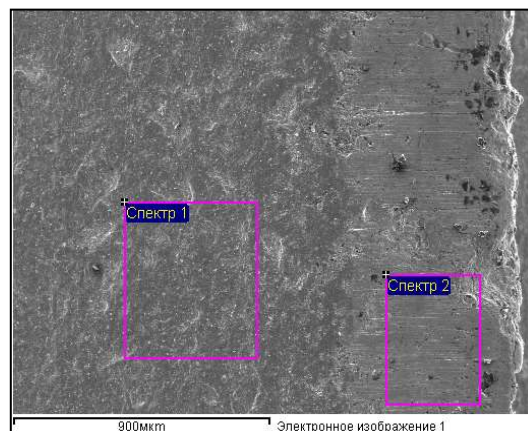


Рис. 3.7 - Зона локального хімічного аналізу початкової поверхні кільця з покриттям TiN/CrN (спектр 1) і після випробувань (спектр 2)

Використан метод оцінки ефективної (залишкової) товщини покриття [Додаток А, п. 18], який полягає в оцінюванні ступеня його зносу, що визначається після проведення стендових випробувань на тертя та зношування. Для цього, рекомендовано виконувати локальне визначення хімічного складу і мікроструктури поверхні тертя виробів по стендовим випробувань. Після чого, порівнюючи сумарне відсоткове співвідношення компонентів, з яких складається багат шарове покриття, до- і після випробувань, а також враховуючи частку компонентів підкладки, проводили розрахунок частки залишкової товщини покриття. Розрахунками встановлено, що в кільці, випробуваних при швидкості ковзання 1 м/с - частка покриття по співвідношенню Ti і Cr становить 49,84%, а вихідної - 48,77%. В даному випадку, оптимальна залишкова його товщина складає 49,84% від початкової 1,7 мкм, тобто $\sim 0,85$ мкм.

3.3 Вплив максимальної швидкості ковзання на зносостійкість зміцнених поршневих кілець

В даному розділі роботи детально аналізується вплив швидкості ковзання поршневого кільця 1,3 м/с, при пройденому шлях тертя 468 км, на особливості процесу зносу та структурних змін.

За період випробувань сумарний ваговий знос гільз циліндрів, в парі зі зміцненими кільцями на 6% нижче в порівнянні з серійними (Рис. 3.8). У період припрацювання знос гільзи, яка працювала в трибосистемі зі зміцненими кільцями ($Ti/Cr=0,17$), нижче в 3 рази відносно серійних. На другому етапі випробувань більш висока зношуваність (в 3 рази) спостерігається у гільзі, яка працювала в трибосистемі зі зміцненими кільцями ($Ti/Cr=0,17$), відносно серійних. На третьому етапі випробувань ваговий знос гільзи, яка працювала зі зміцненими кільцями нижче в порівнянні з серійними на 13%. На етапі припрацювання зміцнений варіант кільця (при $Ti/Cr=0,27$) забезпечує зменшення зношування гільзи на 37 %, а варіант

зміцнення зі співвідношенням компонентів $Ti/Cr=0,40$ – на 25 % відносно серійної. На другому етапі співвідношення $Ti/Cr=0,27$ демонструє підвищення зношуваності гільзи в 3 рази, а $Ti/Cr=0,40$ – в 3,9 рази. На третьому етапі іонно-плазмове покриття зі співвідношеннями $Ti/Cr=0,27$ та $Ti/Cr=0,40$ забезпечило підвищену зношуваність гільзи у 2,5 рази відносно серійного варянту.

Незначний приріст ваги зміцнених кілець на 2-му і 3-му етапах (Рис. 3.9), також пов'язаний з локальним захопленням окремих зон поверхні тертя. Такі результати характерні для більш високої швидкості зношування серійних кілець.

З огляду на високу мікротвердість кілець, зміцнених іонно-плазмовим покриттям (Рис. 3.11), були зафіксовані процеси локального захоплення матеріалу поверхні гільзи, що також викликало підвищений знос на початковому етапі випробувань.

Результати випробувань кілець з іонно-плазмовим покриттям при співвідношенні $Ti/Cr=0,17$ навіть при більшій швидкості показують, що, в середньому, їх сумарний знос знижується в 15,7 разів. При співвідношеннях $Ti/Cr=0,27$ та $Ti/Cr=0,40$ сумарний знос таких варіантів зміцнення кілець знижується в 6 та 3 рази відповідно.

Збільшення висоти робочих поверхонь серійних і зміцнених кілець після випробувань представлені в таблиці 3.7. Висота цих поверхонь серійних кілець після випробувань збільшилася, в середньому, на 0,04 мм (20%), а висота крайок зміцнених кілець – на 0,01 мм (5 %). Спостережуване є результатом розвитку процесу пластичної деформації робочих зон кілець, особливо в разі відсутності зміцнення і меншої швидкості ковзання.

Швидкість зношування по збільшенню висоти робочих поверхонь для зміцнених кілець істотно нижче, в середньому, в 4 рази для кожного варіанту зміцнення.

Середній коефіцієнт тертя, за весь час випробувань при цій швидкості ковзання, найвищий у серійного варіанту виготовлення кільця – 0,42 (Рис. 3.10).

При цьому, іонно-плазмові зміцнення тільки зі співвідношенням $Ti/Cr=0,17$ забезпечило його зниження до 0,13 (у 3 рази).

Покриття оловом, забезпечує стабільність показників зносостійкості тільки в період припрацювання, а вже після 2-го етапу випробувань, фіксується різниця в ступені зміцнення (див. Рис. 3.11). Вихідна середня мікротвердість кілець з покриттям TiN/CrN вище в 116 разів у порівнянні з серійними до випробувань. Мікротвердість зміцнених кілець після 2-го етапу випробувань, в середньому, вище в 3 рази, після 3-го – на 40 % відносно серійних. Мікротвердість кілець з іонно-плазмовим покриттям після 2-го етапу випробувань знижується в 3,7 рази, а після 3-го - в 7,6 відносно їх вихідного рівня.

Результати локального мікрорентгеноспектрального аналізу робочих поверхонь тертя кілець серійних і зміцнених покриттям TiN/CrN при співвідношенні $Ti/Cr=0,17$ (як найбільш зносостійких), представлені в таблиці 3.8 і 4.9 відповідно. Вихідний (до випробувань) хімічний склад поверхні серійного кільця і після випробувань представлений в таблиці 3.8 (спектр 1 і 2 відповідно). На Рис. 3.10 наведені зони визначення хімічного складу вихідної поверхні (спектр 1) і зони тертя (спектр 2) серійного кільця, і аналогічно на Рис. 3.11 (спектр 1 і 2) зміцненого кільця.

Слід зазначити, що олова в зоні тертя зразків серійних кілець, внаслідок інтенсивного зносу, на жодній з робочих поверхонь не виявлено.

Таблиця 3.7 – Збільшення висоти робочих поверхонь кілець

Варіант поршневих кілець		Збільшення висоти робочої поверхні, %
З покриттям TiN/CrN	$Ti/Cr=0,17$	5
	$Ti/Cr=0,27$	5
	$Ti/Cr=0,40$	5
Серійні		20

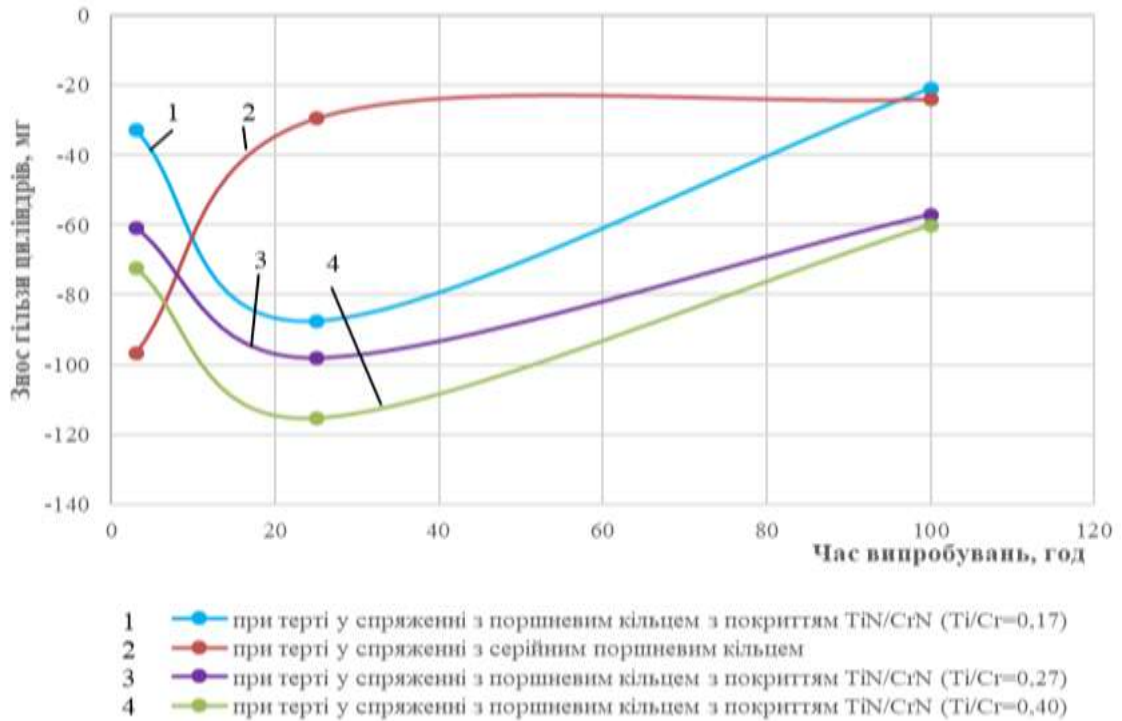


Рис. 3.8 – Знос гільзи циліндрів

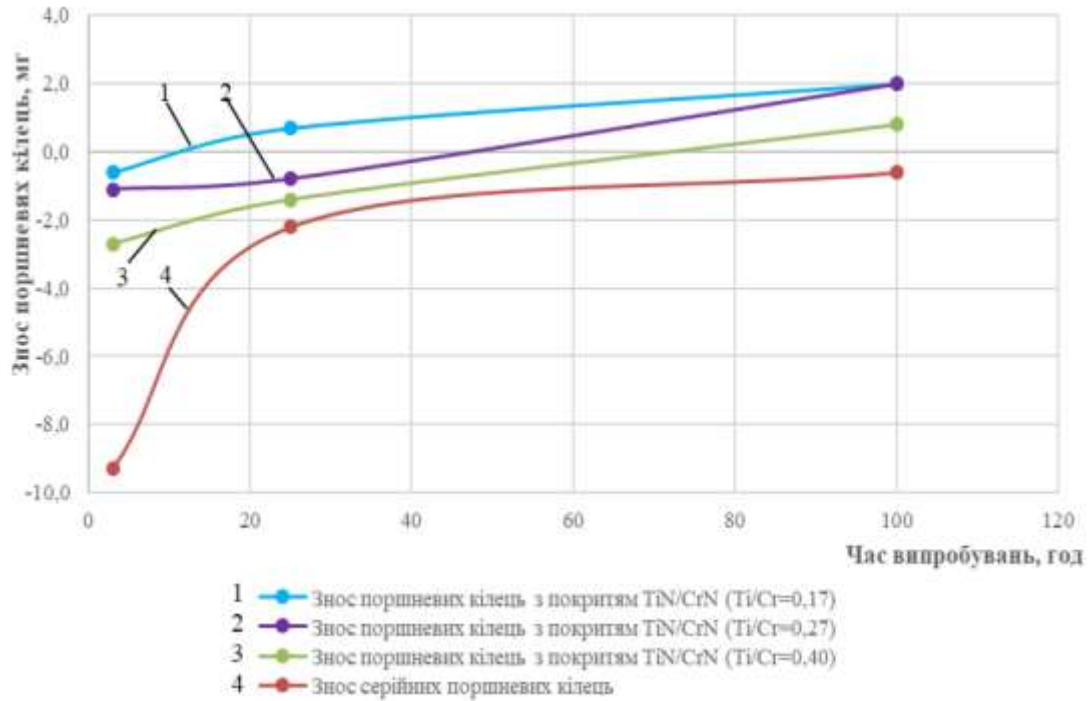


Рис. 3.9 - Ступінь зносу маслоз'ємних поршневих кілець

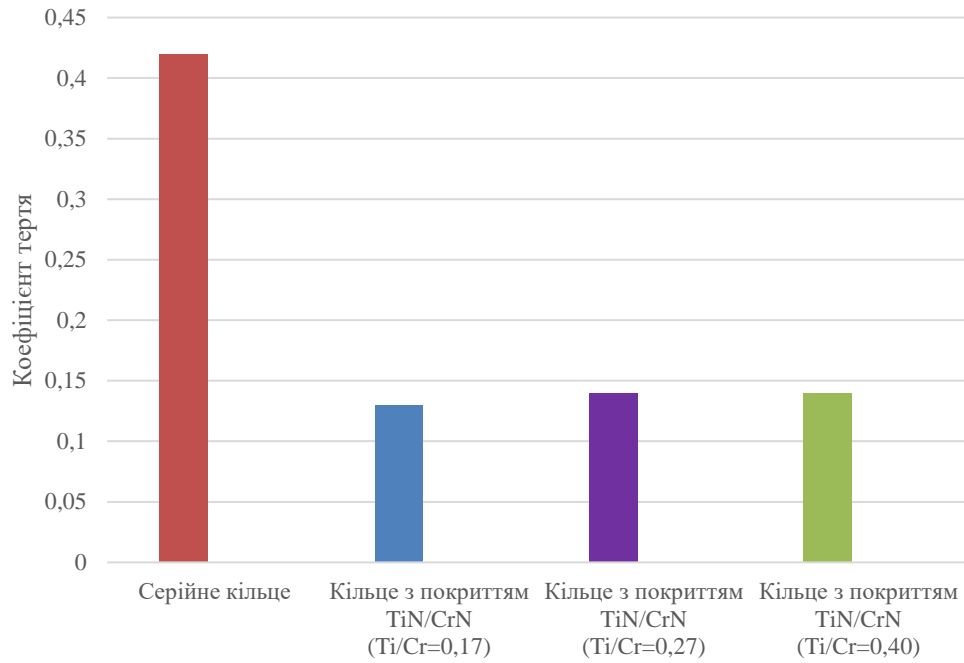


Рис. 3.10 – Коефіцієнт тертя поршневих кілець

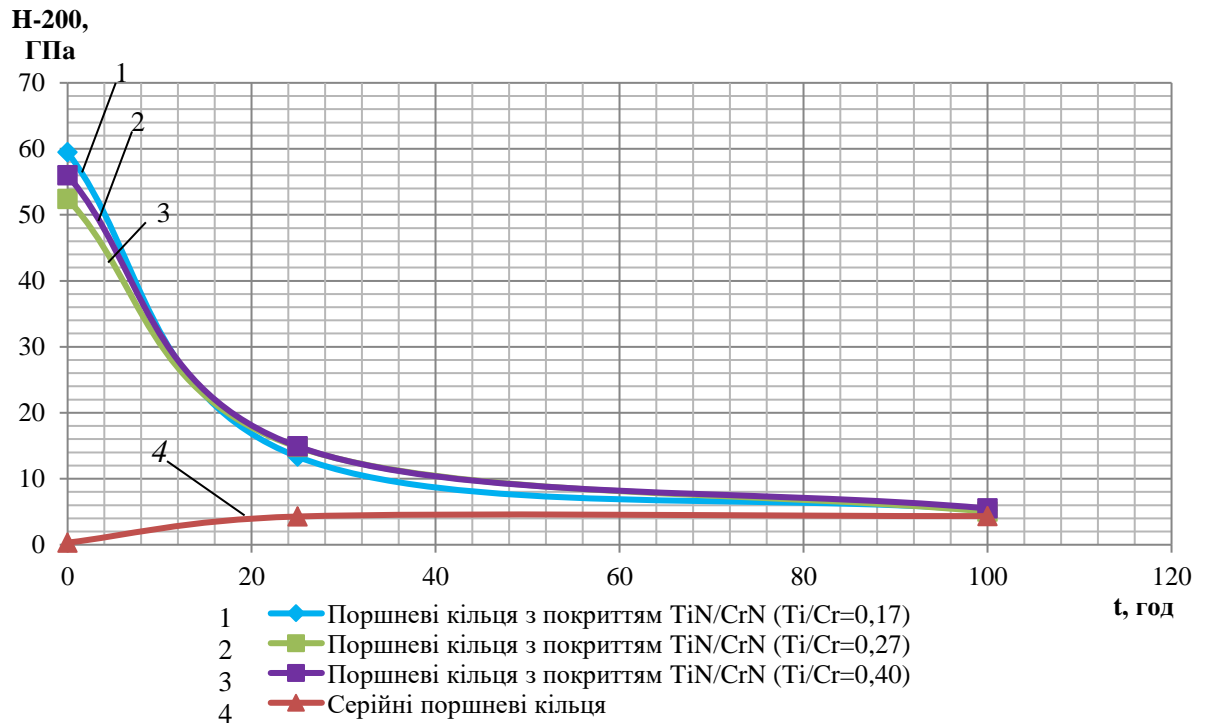


Рис. 3.11 – Мікротвердість кілець з іонно-плазмовим зміцненням (1, 2, 3) і серійних (4)

Таблиця 3.8 - Хімічний склад вихідної (спектр 1) поверхні і зони тертя (спектр 2) серійного поршневого кільця (Рис. 3.10)

Зона	C	O	Al	Si	Mn	Fe	Sn
спектр 1	1,09	-	0,29	0,29	-	1,14	97,21
спектр 2	2,69	-	0,23	1,86	1,25	94,20	-

Таблиця 3.9 - Хімічний склад поверхні тертя кільця з покриттям TiN/CrN при співвідношенні Ti/Cr=0,17 (Рис. 3.13)

Зона	C	O	Al	Si	P	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe
спектр 1	0,8	0,13	-	0,16	-	-	14,5	83,77		0,63
спектр 2	3,59	-	0,55	1,77	0,59	0,20	0,80	2,20	1,28	89,03

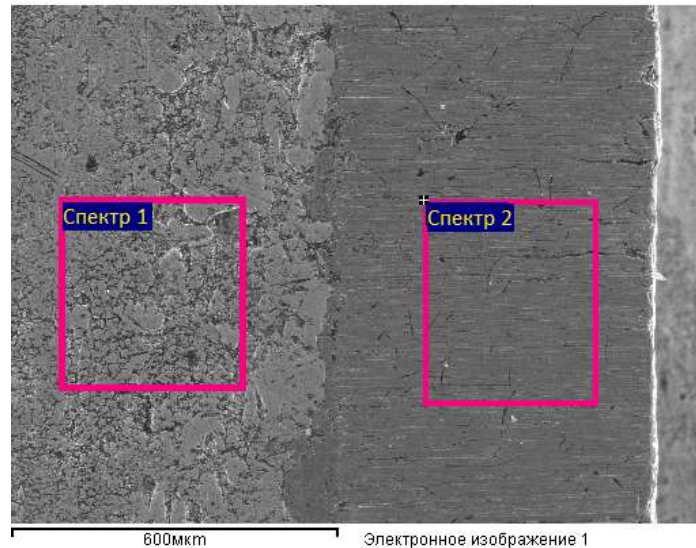


Рис. 3.12 - Зони визначення хімічного складу вихідної поверхні (спектр 1) і зони тертя (спектр 2) серійного кільця

Одночасно виявлено вплив пластичної деформації, що порушує цілісність покриття оловом похилої поверхні, яка прилягає до поверхні тертя (див. Рис. 3.12). Зміна макрорельєфа в зоні прилягання похилої площини до робочої відповідає величині близькою до висоти зони тертя (~ 0,45-0,5 мм).

Незалежно від способу зміцнення для поверхні тертя поршневого кільця характерно формування поздовжніх смуг на робочих поясах обох варіантів кілець.

Вони найбільш чітко формуються в результаті тертя у напрямку їх переміщення при випробуванні. Спостерігається також і формування графітної сітки на робочих поверхнях серійних кілець, які одночасно представлені і в вигляді окремих, хаотично розташованих і орієнтованих пластинчастих включень чорного кольору (див. Рис. 3.12). Їх поява пов'язана зі зносом і відповідає початковому металу.

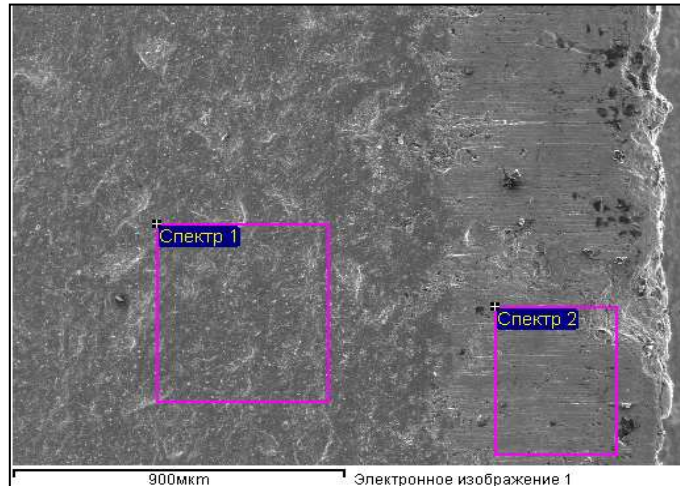


Рис. 3.13 - Зона локального хімічного аналізу поверхні поршневого кільця з покриттям TiN/CrN після випробувань

Результати аналізу вихідної поверхні маслоз'ємних поршневих кілець з багатшаровим іонно-плазмовим покриттям TiN/CrN демонструють, що початкове відношення частки компонентів покриття Ti/Cr склало 0,17. Потім частка компонентів у покритті (по співвідношенню Ti і Cr) після випробувань сумарно складало 3%, а основи (C, O, Si, Mn, Fe) - збільшилася до 95,67%, що свідчить про істотне зношування покриття при такій швидкості ковзання та шляху тертя. Відношення Ti/Cr складало 0,36, при цьому частка Cr після випробувань зменшилася в 38 разів, а частка Ti в – 18. За раніше запропонованою методикою розрахунку [Додаток А, п. 18], залишкова товщина покриття TiN/CrN після випробувань становить 50 нм. Також на робочій поверхні після випробувань були виявлені Al (0,55%), P (0,59%) і Ca (0,2%). Можливо, поява фосфору

пов'язано з частковим його перенесенням з поверхні контртіла (фосфатована гільза циліндрів) при випробуваннях, а – Al і Ca за рахунок змащення (масло M14-B₂).

Висновки до третього розділу

1. Перед і після нанесення багат шарового покриття TiN/CrN з різним співвідношенням Ti/Cr (0,17, 0,27 та 0,40) на поршневі кільця проводили, за спеціальною схемою, визначення і фіксацію показників коерцитивної сили, яка характеризує рівень напруженого стану. Вимірювання виявили, що при нанесенні зміцнюючого покриття змінюється не тільки рівень напружень, в середньому, до 3,1%, але і величина замку кільця – на 17,24 %, що не відповідає вимогам нормативно-технічної документації. Це справедливо для всіх використаних співвідношень Ti/Cr.

2. Для виключення впливу цих факторів мінливості стану при зміцненні кільця використовували метод природнього старіння в період 1,5 місяців. Метод полягав у використуванні вилежування деталей після зміцнення в перебігу певного періоду, при якому будуть досягнуті необхідні параметри коерцитивної сили і розміри замку, які відповідають вихідному стану.

3. Після досягнення стабільного стану зміцнених поршневих кільць проводили порівняльні стендові випробування на зношування з традиційно використовуваними деталями. На меті було визначити найбільш оптимальне співвідношення Ti/Cr, яке забезпечить максимальну зносостійкість та найнижчий коефіцієнт тертя.

4. При швидкості ковзання 1,0 м/с, встановлено, що зношування зміцнених поршневих кільць зі співвідношенням Ti/Cr=0,17 зменшується до 12,2 рази, а висота зон тертя нижча в 4 рази відносно серійного варіанту. Співвідношення Ti/Cr=0,27 та Ti/Cr=0,40 забезпечують зниження зношування в 3,4 рази та на 47 % відносно серійного варіанту. При цьому, коефіцієнт тертя при співвідношенні Ti/Cr=0,17 і такій швидкості випробувань знижується у тричі.

5. Оцінка хімічного складу поверхні тертя, що визначається локальним спектральним аналізом, показала суттєві зміни в робочій зоні при трьох циклах випробувань (відповідає пройденому шляху тертя 360 км). При цьому співвідношення базових елементів покриття Ti/Cr в початковому стані склало 0,17, а після випробувань – 0,28. В кільцях без і зі зміцненням чітко проявляється текстура смуг тертя при випробуваннях, розташованих вздовж напрямку руху поршневого кільця.

6. При підвищенні швидкості ковзання до 1,3 м/с знос поршневих кілець традиційного використання супроводжується деяким схоплюванням з металом гільзи, що підтверджується незначним зростанням їх ваги. Зміцнені поршневі кільця багат шаровим покриттям TiN/CrN зі співвідношенням Ti/Cr=0,17, так само відрізняються підвищенням зносостійкості – до 15,7 разів, порівняно з іншими варіантами співвідношення зміцнюючих елементів покриття. При співвідношеннях Ti/Cr=0,27 та Ti/Cr=0,40 сумарний знос таких варіантів зміцнення, відносно серійних кілець, знижується в 6 та 3 рази відповідно. При цьому, коефіцієнт тертя при співвідношенні Ti/Cr=0,17 і такій швидкості випробувань знижується у тричі. Висота робочих поверхонь серійних кілець після випробувань збільшилася в 4 рази в порівнянні з зміцненими, що є результатом їх інтенсивної пластичної деформації.

7. Електронномікроскопічні дослідження поверхні тертя і прилеглої зони також, як і при випробуваннях з меншою швидкістю ковзання 1,0 м/с виявили формування смуг ковзання в процесі тертя і більш істотну деформацію в прилеглій до неї області.

8. Для оцінки залишкової товщини покриття після випробувань на знос використаний метод, який оцінює мінливість хімічного складу в зоні тертя на основі зтоншення покриття і рівня дифузії компонентів основи. Показано, що за період випробувань при швидкості ковзання 1,0 м/с покриття зносилося з 1,7 мкм до 0,85 мкм, тобто при цих умовах експлуатації шлях тертя може бути збільшений в 2 рази.

9. Після випробувань відношення Ti/Cr змінилося в порівнянні з їх вихідним співвідношенням до 0,36 при пройденому шляху тертя 468 км. При цьому частка Ti в зоні тертя знизилася з 14,5% до 0,8%, а Cr - з 83,77% до 2,2%. На поверхні тертя виявляються окремі включення графіту металу поршневого кільця.

10. У процесі тертя мікротвердість на робочій поверхні серійних поршневих кілець зростає. Залежно від параметрів тертя вона, в середньому, при швидкості ковзання 1,0 м/с – підвищується в 10 разів, а при 1,3 м/с – в 13. Мікротвердість зміцнених кілець в процесі випробувань знижується при швидкості ковзання 1,0 м/с – в 9 разів, а при 1,3 м/с – в 14.

11. Випробуваннями на знос поршневих кілець в парі з гільзою виявили, що використання для зміцнення багат шарового покриття TiN/CrN не тільки підвищується експлуатаційна їх стійкість, але і невелике зношування спряженої деталі. Так, підвищений знос характерний для гільз, що працюють в парі зі зміцненими кільцями – в період припрацювання. В цьому випадку знос вище в 3 рази при $Ti/Cr=0,17$ та 0,27, і в 3,9 рази – при $Ti/Cr=0,40$, в порівнянні з гільзою циліндрів, що випробовувалась з серійними кільцями. Однак, вже на другому етапі випробувань ваговий знос гільзи, яка працювала в парі з зміцненими кільцями (при $Ti/Cr=0,17$) знижується в порівнянні з серійними на 43%, а на третьому – на 29%. Співвідношення елементів покриття $Ti/Cr=0,27$ та $Ti/Cr=0,40$ характеризуються більшим рівнем зносу гільз на 2-му і 3-му етапах в порівнянні з трибосистемою «гільза-серійне кільце» – в діапазоні від 21% та 55%.

РОЗДІЛ 4

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ
ДОСЛІДЖЕНЬ ПОРШНЕВИХ КІЛЕЦЬ, ЗМІЦНЕНИХ ЗА РІЗНИХ
СПІВВІДНОШЕНЬ Ti/Cr

В процесі експлуатації спеціальної техніки є природнім зміна швидкостей руху. Тому слід визнати доцільним порівняти вплив цього фактору на структурні зміни при різних умовах тертя.

4.1 Вплив швидкості ковзання на швидкість зношування поршневих кілець

В умовах експлуатації, що відрізняються за параметрами діючих навантажень, використовуються як різні типорозміри поршневих кілець, так і матеріал для їх виготовлення. Основними параметрами, що змінюються в умовах їх експлуатації, є швидкість ковзання і тиск на їх робочу поверхню. Ці процеси і визначають їх фізико-хімічні і структурні зміни, які характеризують характер зношування. Детальний аналіз змін параметрів експлуатації в конкретних умовах може здійснюватися тільки на основі отриманої інформації про їх вплив і вибір найбільш ефективного способу зміцнення, оптимальне співвідношення зміцнюючих фаз покриття і використання деталей.

В даному розділі наведені результати, які аналізують вплив різних швидкостей ковзання від 0,7 до 1,6 м/с на швидкість зношування зміцнених поршневих кілець іонно-плазмовим покриттям при різних співвідношеннях основних елементів – Ti та Cr. При цьому, особливий інтерес представляють швидкості ковзання в інтервалі 1,0 і 1,3 м/с, які, як було показано раніше, супроводжуються зміною співвідношенням компонентів в процесі випробувань, так і зносом частки покриття при різному шляху тертя.

Результати раніше проведених досліджень по визначенню ступеня і характеру зношування серійних маслоз'ємних поршневих кілець підтвердили низьку їх зносостійкість [Додаток А, п. 1].

Для вирішення проблеми підвищення зносостійкості було проведено індивідуальну оцінку при різних умовах тертя [Додаток А, п. 1, 3, 6, 9, 12]. Так, в кожному випадку, було виявлено багатократне зниження зносу зміцнених кілець, відносно серійних. Однак, при урахуванні різних режимів роботи двигуна (прискорення і гальмування), а отже, і зміною швидкостей переміщення поршневої групи, великий інтерес представляє послідовна порівняльна оцінка властивостей при різних швидкостях ковзання таких кілець.

За всі періоди випробувань сумарна швидкість зношування гільз циліндрів, що працювали в трибосистемі зі зміцненими кільцями (при співвідношенні елементів покриття $Ti/Cr=0,17$), на 6% нижче при швидкості 1,3 м/с, в порівнянні з серійними. При цій же швидкості, в період припрацювання знос гільзи, яку використовували зі зміцненими кільцями, вище в 3 рази відносно серійних (рис. 4.1). Це пояснюється наявністю покриття оловом на серійних виробках, призначеного для прискореного припрацювання трибосистеми. На другому етапі випробувань більш висока зношуваність (в 3 рази) спостерігається у гільзи, яка працювала в трибосистемі з серійними кільцями, відносно зміцнених покриттям. На третьому етапі випробувань знос гільзи, яка працювала зі зміцненими кільцями нижче в порівнянні з серійними на 13%. З огляду на високу мікротвердість кілець з іонно-плазмовим покриттям, були зафіксовані процеси локального захоплення матеріалу з поверхнею гільзи, що і викликало підвищений знос на початковому етапі випробувань (див. рис. 4.1).

Швидкість зношування гільзи при випробуванні зі зміцненими кільцями при співвідношеннях $Ti/Cr=0,27$ та $Ti/Cr=0,40$ на першому етапі при швидкості ковзання 1,3 м/с також нижче в порівнянні з серійним варіантом – на 37 % та 25 % відповідно. На цьому ж етапі, співвідношення $Ti/Cr=0,27$ та $Ti/Cr=0,40$ забезпечили більш високу швидкість зношування гільзи в середньому в 2 рази, порівняно зі співвідношенням $Ti/Cr=0,17$. На другому співвідношення $Ti/Cr=0,27$ та $Ti/Cr=0,40$ забезпечили на 18 % більш високу швидкість зношування гільзи порівняно зі

співвідношенням $Ti/Cr=0,17$, та в середньому, в 3 рази – відповідно до серійного варіанту трибосистеми. Аналогічно і на третьому етапі співвідношення $Ti/Cr=0,27$ та $Ti/Cr=0,40$ забезпечили в 2,8 рази більш високу швидкість зношування гільзи порівняно зі співвідношенням $Ti/Cr=0,17$, та в середньому, в 2,4 рази – відповідно до серійного варіанту. Суммарна швидкість зношування гільз циліндрів в трибосистемі зі зміцненими кільцями зі співвідношеннями $Ti/Cr=0,27$ та $Ti/Cr=0,40$, забезпечили більш низьку зносостійкість порівняно зі співвідношенням $Ti/Cr=0,17$ – на 41 % та у 2 рази відповідно.

Дещо інша картина спостерігається при швидкості ковзання 1 м/с (рис. 4.2). Сумарна швидкість зношування гільз циліндрів, що випробовувалися в парі зі зміцненими кільцями ($Ti/Cr=0,17$) в 2,7 рази вище в порівнянні з серійними. З цих даних видно, що підвищений знос характерний для гільзи, яка працювала в трибосистемі зі зміцненими кільцями, де це зафіксовано в період припрацювання. У цьому випадку швидкість зношування вище в 3 рази, в порівнянні з гільзою циліндрів, що випробовувалась з серійними кільцями. Таке пояснюється наявністю покриття оловом на серійних виробках. Однак, вже на другому етапі випробувань, при цій же швидкості ковзання, зношування гільзи, яка працювала в парі зі зміцненими кільцями, знижується в порівнянні з серійними на 43%, а на третьому – на 29%.

Суммарна швидкість зношування гільз циліндрів в трибосистемі зі зміцненими кільцями зі співвідношеннями $Ti/Cr=0,27$ та $Ti/Cr=0,40$, забезпечили дещо низьку зносостійкість порівняно зі співвідношенням $Ti/Cr=0,17$ – на 11,6 % та на 27 % рази відповідно. При цьому, обидва варіанти співвідношення забезпечили більш низьку зносостійкість в порівнянні з серійним варіантом трибосистеми – більш ніж в 3 рази.

Незначний приріст ваги зміцнених кілець на 2-му і 3-му етапах при швидкості ковзання 1,3 м/с (рис. 4.3), пов'язаний з локальним схоплюванням

окремих зон поверхні тертя. Результати оцінки характерні для більш високої швидкості ковзання серійних кілець.

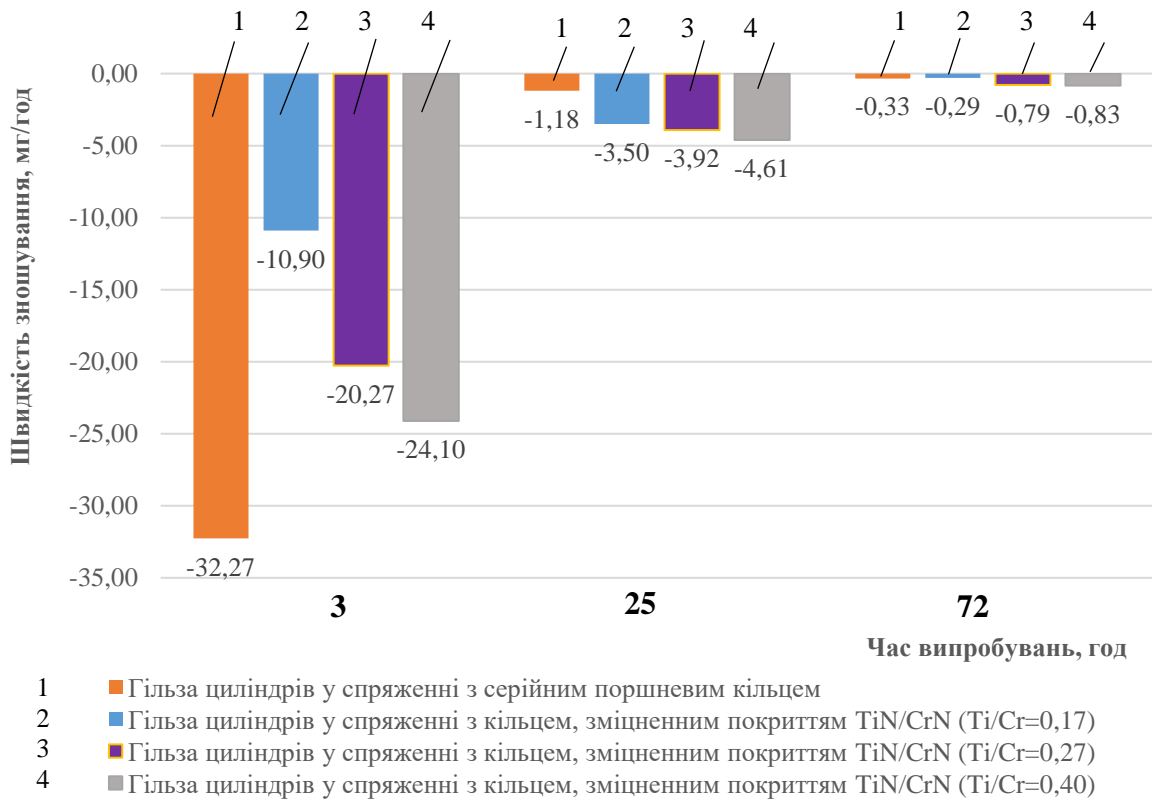


Рис. 4.1 – Швидкість зношування гільз циліндрів при швидкості ковзання 1,3 м/с

Збільшення ваги кілець обох варіантів на останньому етапі випробувань (рис. 4.3, 4.4) при швидкостях ковзання 1 м/с і 1,3 м/с, можна пояснити локальним захоплюванням окремих зон поверхні тертя. Результати випробувань свідчать про високу швидкість зношування серійних кілець. Однак, через процеси локального захоплювання зміцнених кілець, оцінити рівень підвищення їх зносостійкості можна лише по окремим періодам їх випробувань, в тому числі і в період припрацювання. Виходячи з цього, при швидкості ковзання 1,3 м/с, сумарна швидкість зношування найнижчя у співвідношння Ti/Cr=0,17 – в 12,3 рази по відношенню до серійних кілець, і на 43 % та в 3,7 разів порівняно до співвідношень компонентів іонно-плазмового покриття Ti/Cr=0,27 та Ti/Cr=0,40 відповідно.

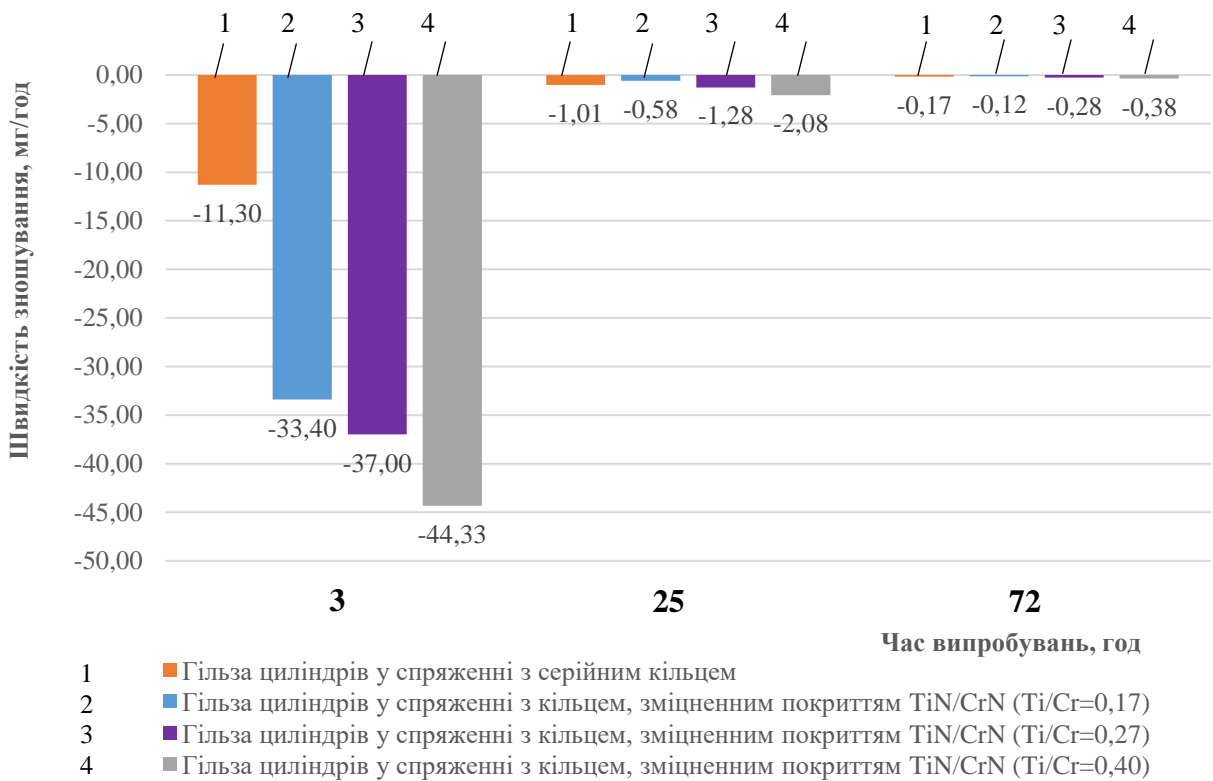


Рис. 4.2 - Швидкість зношування гільз циліндрів при швидкості ковзання 1 м/с

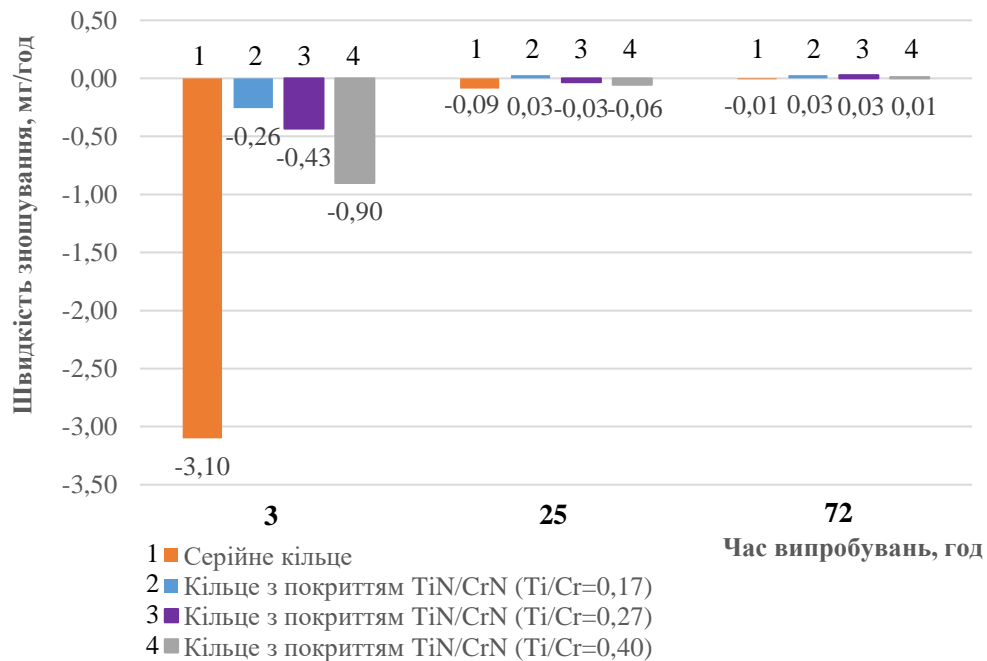


Рис. 4.3 – Швидкість зношування маслоз'ємних поршневих кілець при швидкості ковзання 1,3 м/с

При швидкості ковзання 1,0 м/с, сумарна швидкість зношування також найнижчя у співвідношння $Ti/Cr=0,17$ – в 6,4 разів по відношенню до серійних кілець, і у 2 рази та у 3,8 разів порівняно до співвідношень компонентів іонно-плазмового покриття $Ti/Cr=0,27$ та $Ti/Cr=0,40$ відповідно.

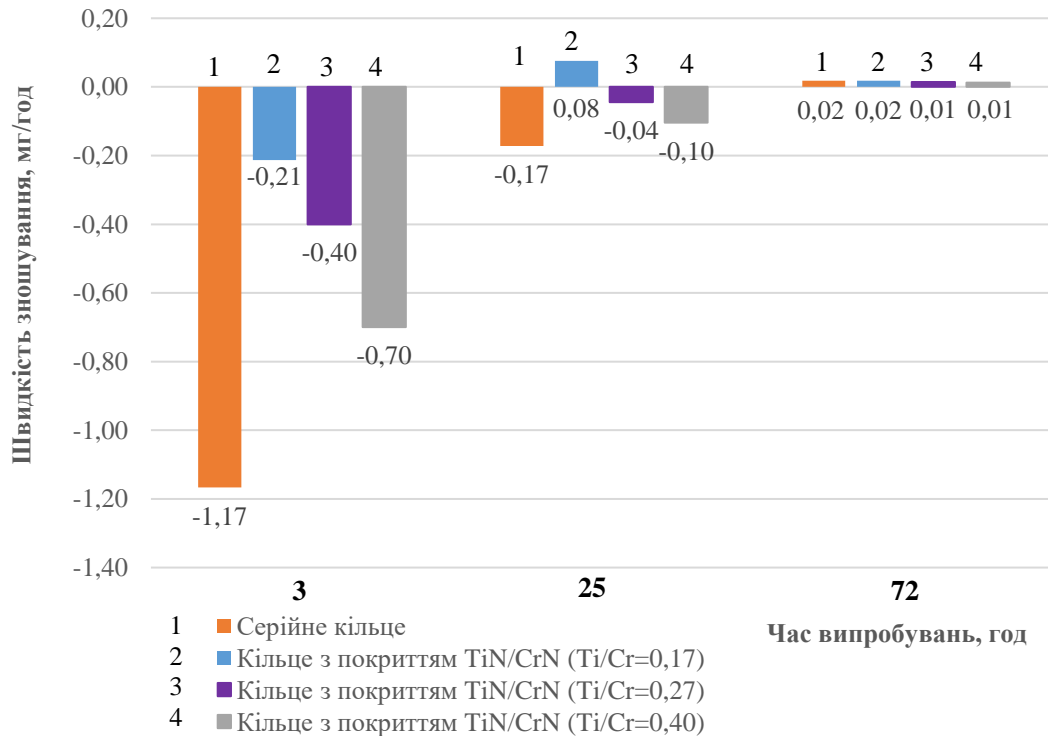


Рис. 4.4 – Швидкість зношування маслоз'ємних поршневих кілець при швидкості ковзання 1 м/с

Збільшення висоти робочих поверхонь поршневих кілець серійних і зміцнених після випробувань при швидкостях ковзання 1,0 м/с і 1,3 м/с представлені в таблицях 3.4 і 3.7 відповідно. Висота робочих поверхонь серійних кілець після випробувань збільшилася, в середньому, на 20 %, а висота поверхонь зміцнених кілець – на 5%. Це є результатом схильності до пластичної деформації поверхонь тертя кілець. Найбільша схильність характерна для кілець без додаткового зміцнення. Зміна висоти робочих поверхонь показує, що для зміцнених кілець, схильність до пластичної деформації знижується ~ в 4 рази для обох швидкостей тертя.

Покриття оловом, забезпечує стабільність показників тільки в період припрацювання, а вже після 2-го етапу випробувань, фіксується різниця в ступені зміцнення (див. рис. 3.4 та 3.8). Така тенденція характерна для обох швидкостей ковзання. Середня вихідна мікротвердість зразків кілець з покриттям TiN/CrN вище в 148 разів у порівнянні з серійними до випробувань. Мікротвердість зміцнених кілець після 2-го етапу випробувань підвищується в 3 рази, після 3-го – в 2 рази відносно серійних при швидкості 1,3 м/с. Мікротвердість зміцнених кілець після 2-го етапу випробувань при швидкості ковзання 1 м/с, вище в 3,6 рази, після 3-го – на 17% відносно серійних.

Мікротвердість кілець з іонно-плазмовим покриттям після 2-го етапу випробувань знижується в 3,7 разів при порівнянні двох швидкостей (1,0 та 1,3 м/с), а після 3-го – в 6 разів відносно вихідного значення. При цьому середня мікротвердість серійних кілець підвищується в 11 разів на другому етапі випробувань, і несуттєво на третьому (див. рис. 3.4 та 3.8) в порівнянні з вихідним станом.

За результатами проведених випробувань співвідношення покриття Ti/Cr=0,17 можна вважати оптимальним для забезпечення високої зносостійкості кільця.

4.2. Хімічний склад поверхні тертя зміцнених поршневих кілець при різних швидкостях ковзання

Узагальнюючи результати досліджень 4 розділу, можливим буде це використати для оцінки змін хімічного складу та товщини залишкових покриттів при зношуванні з різною швидкістю ковзання.

Для цього використовували, результати локального мікрорентгеноспектрального аналізу робочих поверхонь тертя серійних кілець і зміцнених багат шаровим наноструктурним покриттям TiN/CrN. При цьому, для аналізу обрано зміцнююче покриття зі співвідношенням компонентів Ti/Cr=0,17 –

як найбільш зносостійкого. Визначали локальний хімічний склад вихідної поверхні і зони тертя серійного кільця, і аналогічно – зміцнених, які випробувані при різних швидкостях ковзання. Глибина, аналізованої зондом поверхні становила 2 мкм.

Слід зазначити, що олова в серійних кільцях після випробувань, внаслідок повного зносу поверхні, на робочих кромках не виявлено при різних варіантах випробувань. Це також підтверджується і збільшенням мікротвердості після 2-го і 3-го етапів випробувань щодо відповідності рівню основного металу (сірого чавуну).

Одночасно оцінювали вплив пластичної деформації області, в якій порушується цілісність покриття оловом (похилій площині, що прилягає до поверхні тертя). Це пов'язано з ефектом, відповідним принципу Сен-Венана [165, 166], що супроводжується локалізацією напружено-деформованого стану прилеглої області матеріалу, внаслідок прикладеного зовнішнього навантаження на зону тертя кільця. Зміна макрорельєфа в зоні прилягання похилої площини до робочої поверхні відповідає величині близької до розміру цієї поверхні (~ 0,45-0,5 мм).

На поверхнях тертя, не залежно від способу зміцнення і швидкості ковзання, характерно формування поздовжніх смуг на робочих поверхнях всіх аналізованих кілець. Вони формуються внаслідок тертя у напрямку їх переміщення при експлуатації. Під час зношування на поверхні тертя серійних кілець з'являється і графітна сітка, яка представлена і в вигляді окремих, хаотично розташованих і орієнтованих пластинчастих включень чорного кольору, що відповідає початковому металу.

Результати аналізу вихідної поверхні, випробуваних при швидкості 1,3 м/с маслоз'ємних поршневих кілець з багат шаровим іонно-плазмовим покриттям TiN/CrN показали, що початкове співвідношення їх частки до основи складо 98,27%. Таке співвідношення після випробувань знизилося до 3%, а частка основи (C, O, Si, Mn, Fe) збільшилася до 95,67%, що свідчить про істотне зношування покриття при такій швидкості тертя. При цьому, частка Cr зменшилася в 38 разів і

Ti - в 18. За запропонованою раніше методикою розрахунку [Додаток А, п. 18], залишкова товщина покриття TiN/CrN після випробувань склала 50 нм. На поверхні робочої кромки після випробувань були виявлені Al (0,55%), P (0,59%) і Ca (0,2%). Можливо, поява фосфору пов'язано з частковим його перенесенням з поверхні контртіла (фосфатовані зразок гільзи циліндрів) при випробуваннях. Поява Al і Ca на поверхні можливо через тертя в умовах змащування (олива M14-B₂), та результатом схоплювання (характеризується зростанням ваги кілець на 2-му і 3-му етапах випробувань).

Загальна частка покриття на поверхні кільця, оцінена локальним спектральним аналізом, випробуваного при 1 м/с і становить 49,84%, а основи - 48,77%. Частка Ti знизилася всього лише в 1,35, а Cr в 2,14 рази по відношенню до початкового складу покриття. Залишкова товщина покриття після випробувань склала 850 нм. При цьому має місце часткове перенесення фосфору на кромку серійного кільця від його контртіла. Це також супроводжується зростанням ваги таких зразків після випробувань.

Одночасно, виявлено факт вираженої структуризації покриття оловом в області похилій поверхні серійного кільця, прилеглої до зони тертя протяжністю ~ 0,45 – 0,5 мм. Це також свідчить про деградацію основного металу і низьку його стійкості до циклічного впливу при експлуатації. У кільцях з іонно-плазмовим зміцненням схожою структуризації похилої поверхні не спостерігається, що пояснюється високим ступенем опору покриття розвитку і поширенню деформацій, викликаних напруженнями при циклічному впливі при терті.

Характерні поздовжні смуги на робочих поверхнях обох варіантів кілець, формуються внаслідок тертя у напрямку їх переміщення при експлуатації. Як було зазначено раніше, спостерігається і формування графітної сітки на поверхнях тертя серійних кілець, які виявлені також в вигляді окремих, хаотично розташованих і орієнтованих включень чорного кольору, що відповідає структурі вихідного металу.

Аналогічна графітна сітка формується і на поверхні тертя гільзи циліндра, яка випробовувалась в трибосистемі з кільцем при швидкості ковзання 1 м/с, зміцненим оптимальним співвідношенням TiN/CrN (Рис. 4.5, спектри 1 – 3). Цей зразок трибосистеми було обрано виходячи з рівня його зношування після випробувань. Хімічний склад поверхні тертя гільзи циліндра представлений у таблиці 4.1.

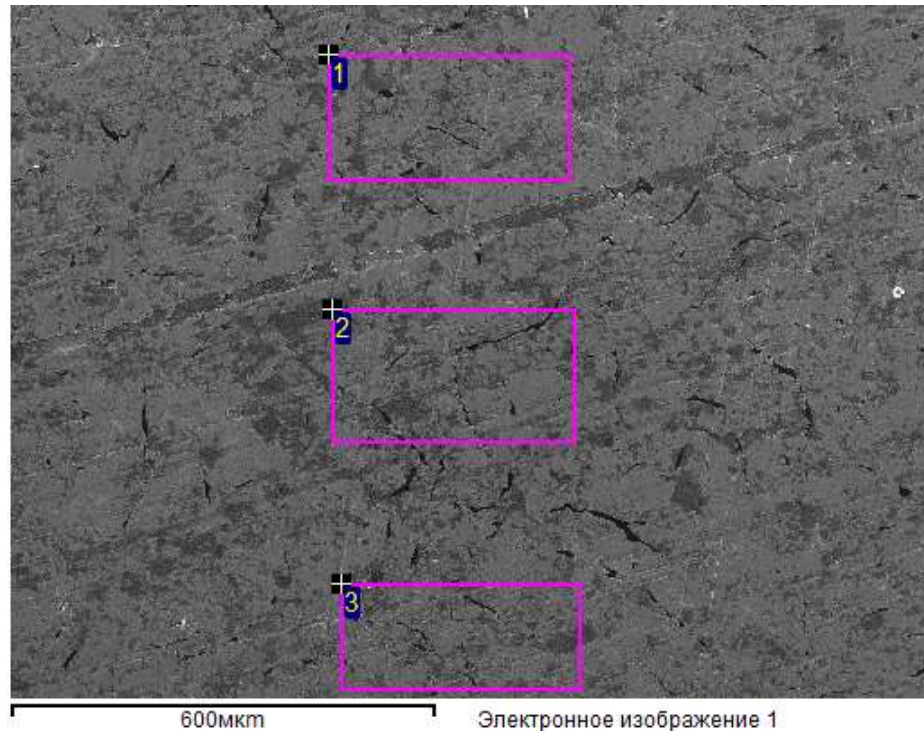


Рис. 4.5 – Поверхня тертя гільзи циліндра

Таблиця 4.1 – Хімічний склад поверхні тертя гільзи циліндра (Рис. 4.5), %

Зона	C	O	Al	Si	P	Ca	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Mo
спектр 1	9.94	16.55	0.13	1.09	3.45	0.30	0.46	3.53	62.42	0.74	0.36	1.02
спектр 2	11.03	17.44	0.09	0.95	3.72	0.26	0.42	3.84	60.31	0.71	0.38	0.84
спектр 3	9.97	18.07	0.13	0.90	3.86	0.31	0.45	3.95	60.44	0.70	0.40	0.82

Поверхня тертя гільзи характеризується меншим інтервалом розкиду хімічних елементів, порівняно з вихідною поверхнею (Рис. 4.6, таблиця 4.2). Такий розподіл елементів пояснюється, зокрема, рівномірним зношуванням робочої поверхні гільзи в трибосистемі зі зміцненим поршневым кільцем. Про це свідчить

рівномірний розподіл фосфора на поверхні в діапазоні 3,45-3.86 % (див. таблицю 4.1). При цьому, на вихідній поверхні фосфор розподілен нерівномірно – 3,96-13,15 %, в залежності від аналізуємої зони (див. таблицю 4.2).

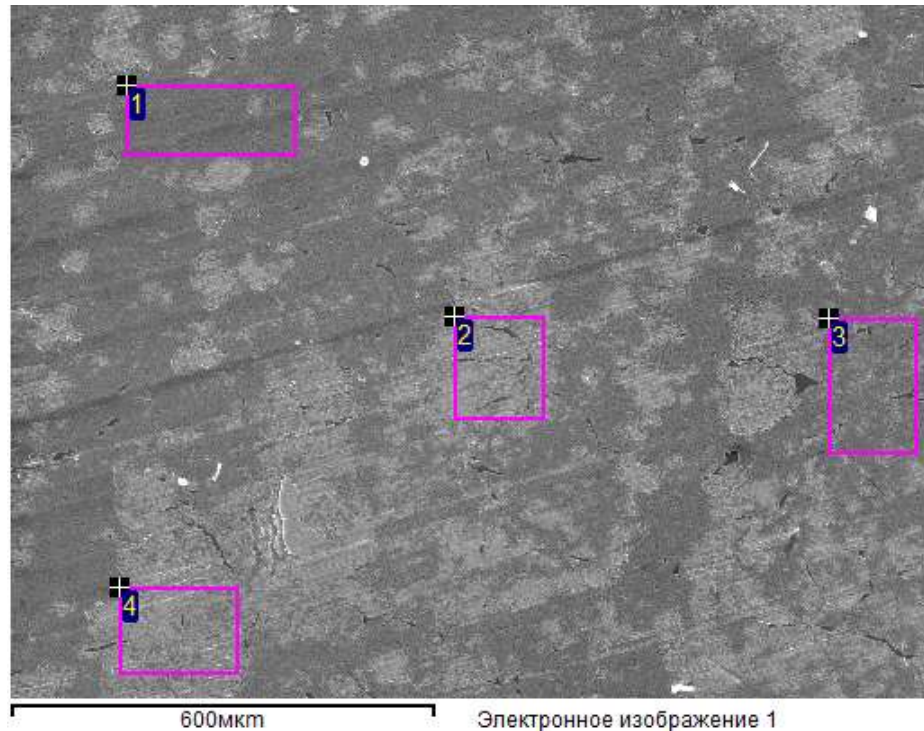


Рис. 4.6 – Вихідна поверхня гільзи циліндра

Таблиця 4.2 – Хімічний склад вихідної поверхні гільзи циліндра (Рис. 4.6), %

Зона	C	O	Na	Si	P	Ca	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Mo
спектр 1	7.54	48.86	0.17	0.11	13.15	1.13	0.08	14.02	14.33	0.18		0.26	0.28
спектр 2	12.41	21.65	0.2	0.85	3.96	0.30	0.30	3.83	55.11	0.72	0.31		0.57
спектр 3	11.19	39.76	0.24	0.35	9.07	0.76	0.15	8.38	29.32	0.33	0.20	0.15	0.35
спектр 4	8.74	22.46	0.53	0.85	4.31	0.33	0.36	3.96	57.27	0.70	0.36		0.67

4.3 Оцінка товщини зміцненого шару в системі «покриття-основа» поршневих кілець та її прогнозування при експлуатації

Для прогнозування залишкової товщини зміцнюючого шару і дифузійних процесів при зношуванні зі зміною частки покриття при терті

був запропонований метод [Додаток А, п. 18], який полягає в оцінці зміни локального хімічного складу в зоні тертя з урахуванням оцінки частки вихідного зміцнюючого покриття поршневих кілець і їх зміни по глибині, що враховує перетин покриття, перехідну частину і шар, який формується після експлуатації, тобто зміни, що характеризують вміст компонентів в системі «покриття – основа».

Як видно з таблиці 4.3, вихідне співвідношення базового компонента чавуну (Fe) до елементів іонно-плазмового покриття поршневого кільця (TiN, CrN) становить 0,006. Раніше було показано, що експлуатація при швидкості ковзання 0,7 м/с інтенсифікує процеси дифузії і сприяє руйнуванню покриття на графітових включеннях і співвідношення фаз покриття становить 0,32 (збільшується в 53 рази). Після експлуатації при швидкості 1 м/с співвідношення збільшується в 142 рази - до 0,85 відносно вихідного стану з покриттям, що свідчить про істотне збільшення дифузії Fe в покриття внаслідок тертя вже при підвищенні такої швидкості ковзання. Так, при швидкості 1,3 м/с загальний вміст Fe збільшується в 4950 разів, до 29,7 від вихідного стану. При швидкості ковзання 1,6 м/с, іонно-плазмове покриття повністю зношується на поверхні кільця. При цьому для швидкості ковзання 0,7 м/с зберігається початковий (відносно низький) вміст Fe в покритті, що характеризує високий рівень зносостійкості і незначну дифузію заліза з основи.

Результати зміни концентрації заліза і компонентів покриття при різних швидкостях ковзання представлені на рис. 4.7. Як видно з графіка, зміна одного з найважливіших параметрів експлуатації (швидкості ковзання), істотно впливає на інтенсифікацію процесу зношування і локальну дифузію заліза в покриття. Особливо це помітно при більш інтенсивному зношуванні і швидкостях ковзання 1,3 і 1,6 м/с (див. рис. 4.7).

Таблиця 4.3 – Співвідношення компонентів основи до покриття при різних швидкостях ковзання

Швидкість ковзання, м/с	Концентрація Fe, %	Покриття кільцець (Ti + Cr), %	Співвідношення $\frac{(Fe)}{(Ti,Cr)}$	Характеристика перехідної зони
Початковий стан системи	0,63	98,27	0,006	Дифузія практично відсутня, висока зносостійкість
0,7	23,4	73,6	0,32	Низька дифузія Fe і висока зносостійкість
1,0	42,22	49,84	0,85	Помірна дифузія Fe і висока зносостійкість
1,3	89,03	3,0	29,7	Дифузія Fe і зношування покриття різко зростають
1,6	94,2	Відсутнє	Початковий стан металу	Зношування

На основі результатів мікрорентгеноспектрального аналізу, скануючий зонд якого утворює сферичну зону при оцінюванні хімічного складу поверхні тертя кільця з радіусом проникнення 2 мкм, була виконана і одночасна оцінка величини зносу покриття і дифузії основного елемента поршневих кільцець Fe в результаті експлуатації. Для цього, за будь-якої швидкості ковзання, розраховували площу перетину залишкового покриття за вмістом Ti, Cr, а також Fe (див. рис. 4.5), використовуючи раніше розроблений метод для таких покриттів [Додаток А, п. 20]. Після чого, різницю зміни хімічного складу до- і після експлуатації покриття і окремо основи (%) співвідносили до їх площі. Різниця в хімічному складі і площі в варіанті з покриттям відповідають результатам величини локального зносу, а різниця визначає збільшення частки основи і – рівню дифузії Fe. Результати розрахунку представлені в таблиці 4.4, а їх вплив – схематично на рис. 4.8. Таким

чином, при збільшенні швидкості ковзання з 0,7 м/с до 1,3 м/с, частка покриття знизилася на 27,3 %, а основи зросла – на 21,7 %. При цьому, процентна різниця між співвідношеннями покриття (Ti + Cr) і основи (Fe) склала 5,6 %, що вказує на незначну дифузію заліза у покриття.



Рис. 4.7 – Залежність зміни концентрації компонентів покриття і основи при різних швидкостях ковзання

Таблиця 4.4 – Відношення частки зміни хімічних елементів покриття і основи кілець до залишкової при різній швидкості ковзання

Швидкість ковзання, м/с	Площа перетину покриття (частка Ti + Cr), мкм ²	Частка Fe на площі, мкм ²	Співвідношення $\frac{ (Ti, Cr)_{исх} - (Ti, Cr)_{тр} }{ S_{(Ti, Cr)_{исх}} - S_{(Ti, Cr)_{тр}} }, \frac{\%}{мкм^2}$	Співвідношення $\frac{ (Fe)_{исх} - (Fe)_{тр} }{ S_{(Fe)_{исх}} - S_{(Fe)_{тр}} }, \frac{\%}{мкм^2}$
Початковий стан системи	5,9	0,4	16,7	1,6
0,7	5,3	1,0	41,1	38
1,0	3,8	2,5	23	19,8
1,3	0,2	6,1	16,7	15,5
1,6	0,0	6,3	16,7	16

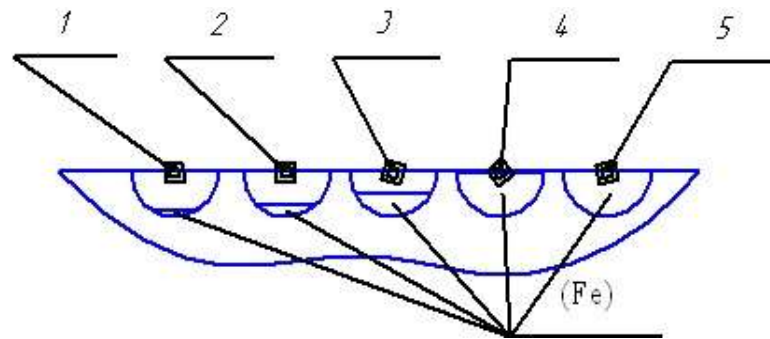


Рис. 4.8 – Схема зміни концентрації компонентів основи ($S_{(Fe)}$) та покриття ($S_{(Ti, Cr)}$):

- 1 - зона аналізу вихідного покриття ($S_{(Ti, Cr)} = 5,9 \text{ мкм}^2$, $S_{(Fe)} = 0,4 \text{ мкм}^2$);
- 2 - зона аналізу при швидкості 0,7 м/с ($S_{(Ti, Cr)} = 5,3 \text{ мкм}^2$, $S_{(Fe)} = 1,0 \text{ мкм}^2$);
- 3 - зона аналізу при швидкості 1 м/с ($S_{(Ti, Cr)} = 3,8 \text{ мкм}^2$, $S_{(Fe)} = 2,5 \text{ мкм}^2$);
- 4 - зона аналізу при швидкості 1,3 м/с ($S_{(Ti, Cr)} = 0,2 \text{ мкм}^2$, $S_{(Fe)} = 6,1 \text{ мкм}^2$);
- 5 - зона аналізу при швидкості 1,6 м/с ($S_{(Ti, Cr)} = 0,0 \text{ мкм}^2$, $S_{(Fe)} = 6,3 \text{ мкм}^2$).

В результаті виконаних досліджень встановлено, що помітна втрата зміцненого шару при терті спостерігається в інтервалі ковзання при 1,3 м/с і повна – при 1,6 м/с. Окрім того, показано, що зносостійкість такого покриття істотно залежить від наночарів з нітридами титану, які відрізняються більш високою мікротвердістю. Збільшувати їх товщину для подальшого підвищення зносостійкості може бути неефективним через їх схильності до пошкоджуваності в умовах експлуатації. Ймовірно, при необхідності цю проблему можна вирішити за рахунок збільшення кількості шарів наноструктур TiN або зменшення їх товщини.

Висновки до четвертого розділу

1. В розділі виконано аналіз впливу мінливості швидкості ковзання поршневого кільця на показники структурних змін в процесі експлуатації. Аналізували вплив швидкості їх ковзання від 0,7 до 1,6 м/с на зношування, структуроутворення і розвиток дифузійних процесів. Порівняльна оцінка вихідних і зміцнених поршневих кілець багат шаровим нанопокриттям TiN/CrN показала, що незалежно від швидкості ковзання виявляється багаторазове підвищення зносостійкості останніх. Особливий інтерес викликають швидкості ковзання в

інтервалі 1,0 - 1,3 м/с, які супроводжуються мінливістю компонентів і істотною зміною зносу при різному шляху тертя.

2. Порівняльними випробуваннями вихідних і зміцнених поршневих кілець виявлено, що в період до 72 год. незалежно від швидкості ковзання відзначається локальне схоплювання в зонах поверхні тертя, що пов'язано зі зносом окремих ділянок зміцненого шару і характеризується збільшенням ваги кільця.

3. За всі періоди випробувань сумарна швидкість зношування гільз циліндрів, що працювали в трибосистемі зі зміцненими кільцями (при співвідношенні елементів покриття $Ti/Cr=0,17$), на 6% нижче при швидкості 1,3 м/с, в порівнянні з серійними. Суммарна швидкість зношування гільз циліндрів в трибосистемі зі зміцненими кільцями зі співвідношеннями $Ti/Cr=0,27$ та $Ti/Cr=0,40$, забезпечили більш низьку зносостійкість порівняно зі співвідношенням $Ti/Cr=0,17$ – на 41 % та у 2 рази відповідно.

4. Сумарна швидкість зношування гільз циліндрів, що випробовувалися в парі зі зміцненими кільцями ($Ti/Cr=0,17$) в 2,7 рази вище в порівнянні з серійними. Підвищену швидкість зношування зафіксовано в період припрацювання.. Однак, вже на другому етапі випробувань, при цій же швидкості ковзання, зношування гільзи, яка працювала в парі зі зміцненими кільцями (при $Ti/Cr=0,17$), знижується в порівнянні з серійними на 43%, а на третьому – на 29%. Суммарна швидкість зношування гільз циліндрів в трибосистемі зі зміцненими кільцями зі співвідношеннями $Ti/Cr=0,27$ та $Ti/Cr=0,40$, забезпечили дещо низьку зносостійкість порівняно зі співвідношенням $Ti/Cr=0,17$ – на 11,6 % та на 27 % рази відповідно.

5. При швидкості ковзання 1,3 м/с, сумарна швидкість зношування найнижчя у співвідношення $Ti/Cr=0,17$ – в 12,3 рази по відношенню до серійних кілець, і на 43 % та в 3,7 разів порівняно до співвідношень компонентів іонно-плазмового покриття $Ti/Cr=0,27$ та $Ti/Cr=0,40$ відповідно. При швидкості ковзання 1,0 м/с, сумарна швидкість зношування також найнижчя у співвідношення

$Ti/Cr=0,17$ – в 6,4 разів по відношенню до серійних кілець, і у 2 рази та у 3,8 разів порівняно до співвідношень компонентів іонно-плазмового покриття $Ti/Cr=0,27$ та $Ti/Cr=0,40$ відповідно. При цьому збільшення висоти робочих поверхонь вихідних кілець зростає на 20%, а зміцнених лише на 5%. Спостережуване є результатом зниження пластичної деформації при зміцненні поверхні наноструктурним багатошаровим покриттям, що підвищує їх довговічність. За результатами випробувань співвідношення покриття $Ti/Cr=0,17$ можна вважати оптимальним для забезпечення високої зносостійкості кільця.

6. Локальним спектральним аналізом встановлено, що після випробувань на зношування частка компонентів при швидкості ковзання 1,3 м/с в зміцненому багатошаровому покритті знижується Ti з 14,5 до 0,8 % і Cr – з 83,77 до 2,20 %. Одночасно на поверхні тертя виявлена і окисна плівка (вторинні захисні структури, які містять 0,13 – 0,91% O_2), що може бути використана для змащення та є результатом поганого очищення камери. Вона використовується для зміцнення і формування з'єднань покриття. Аналізом також виявлені компоненти, які не входять до складу покриття Si , Mn , Fe . З огляду на той факт, що Si суттєво не дифундує, можна припустити, що в цьому випадку зонд мікроаналізатора захопив незначну частину основного металу. Результати хімічного аналізу поверхні тертя гільзи циліндра, яка виробовувались в трибоситемі із поршневим кільцем, зміцненим оптимальним співвідношенням покриття Ti/Cr при швидкості ковзання 1 м/с, показали помірний рівень зносу. Про це свідчить наявність рівномірно розподіленого покриття фосфора – в межах 3,45-3.86 % в залежності від аналізованої зони.

7. Запропоновано спосіб оцінки і прогнозування зміни товщини покриття і дифузійних процесів при експлуатації в системі «покриття-основа». Локальним спектральним аналізом при різних швидкостях ковзання показано, що зі збільшенням цього показника процес істотно інтенсифікується і зростає на один-два порядки. Так, при швидкості ковзання 1,3 м/с зміна концентрації Fe зростає вже

на 2 порядки, тобто чим більше частка таких швидкостей в техніці при її експлуатації, тим істотніше знижується стійкість поршневих кілець.

8. Для визначення залишкової товщини покриття і прогнозування швидкості зношування використовували спеціальний підхід, при якому на основі оцінки зміни концентрації заліза статистичним методом за результатами локального спектрального аналізу визначали його частку. На основі таких оцінок отримано залежність, що дозволяє прогнозувати величину зносу в залежності від зміни швидкості ковзання поршневого кільця при експлуатації.

9. Дослідженнями показано, що зносостійкість поршневих кілець з багатошаровим наноструктурним зміцненням в більшій ступені залежить від частки TiN, яка відрізняється підвищеною твердістю. Тому, для підвищення їх зносостійкості зі зміцненням багатошаровою композицією при певних умовах експлуатації слід регулювати частку складової TiN. Проблему можна вирішити двома шляхами: за рахунок зміни товщини більш твердого шару або збільшення кількості його шарів за умови забезпечення оптимального співвідношення $Ti/Cr=0,17$.

РОЗДІЛ 5

РЕЗУЛЬТАТИ ОЦІНКИ ЯКОСТІ ПОВЕРХОНЬ ТЕРТЯ ПОРШНЕВИХ КІЛЕЦЬ ОПТИКО-МАТЕМАТИЧНИМ МЕТОДОМ ТА ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТЕХНОЛОГІЇ ЇХ ЗМІЦНЕННЯ

5.1 Обробка зображень поверхонь тертя поршневих кілець

Після оцінки абсолютних величин нейтральності виконали їх порівняння за критерієм Колмогорова, яке представлено в (Додаток Б, таблиця 2). Як видно з цієї таблиці, при ідентичних умовах випробувань, характер зношування серійних і зміцнених кілець істотно відрізняється. Про це свідчить критерій порівняльних показників. Незважаючи на те, що критерій порівняння для похилих поверхонь кілець більше нуля (2,7%), його мала величина вказує на низький ступінь зміни цих зон, які не брали участі в терті, але прилягали до них.

Оптико-математичною обробкою цифрових зображень, формуємих структур при терті, встановлено, що після випробувань в зоні робочої поверхні (див. Рис. 5.1, 5.2) і, що примикає до неї – похилої (див. Додаток Б, рис. 1 и 2), в обох варіантах поршневих кілець, формуються поперечні (перпендикулярно напрямку ковзання) смуги, які відповідають зонам стиснення і розтягнення. Періодичність і ширина поперечних смуг на поверхні тертя з іонно-плазмовим покриттям (див. Додаток Б, рис. 2), складає, в середньому, ~20 мкм. Слід зазначити і підвищену контрастність цих смуг. На поверхні тертя серійного кільця, ширина і період виявлених поперечних смуг складає ~10 мкм. Вони і визначають експлуатаційну стійкість при опорі зношуванню. При цьому зафіксовано формування і поздовжніх смуг в цьому варіанті кільця.

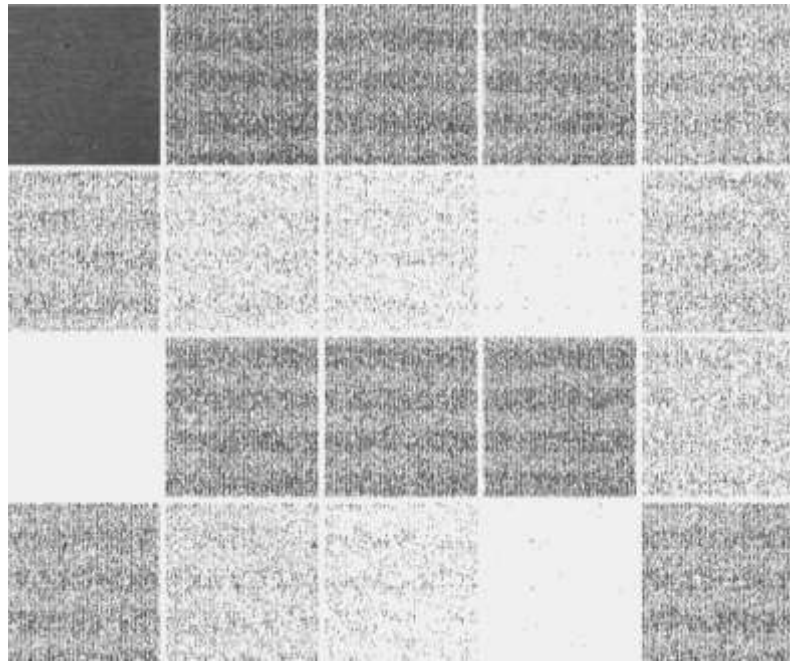


Рис. 5.1 – Фотографія зони тертя серійного поршневого кільця (1,3 м/с)

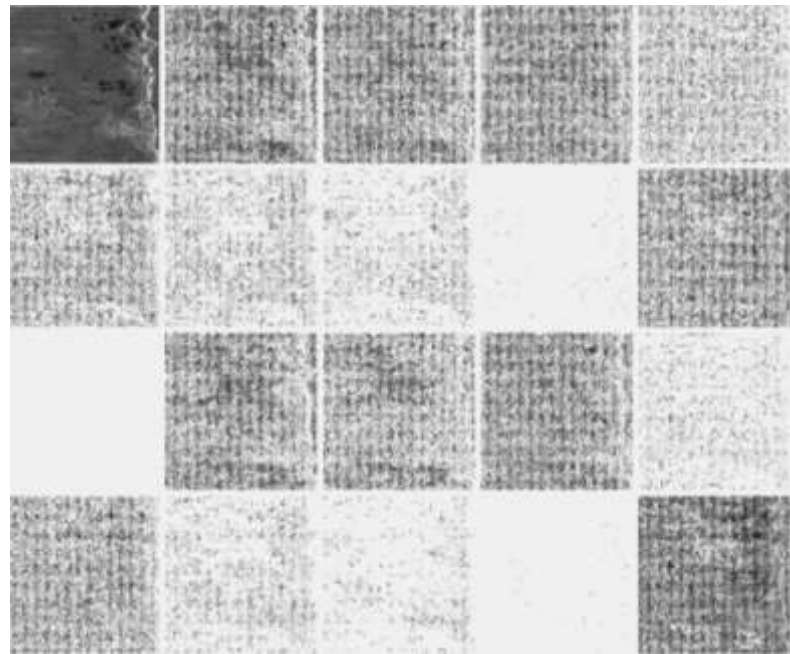


Рис. 5.2 – Фотографія зони тертя поршневого кільця з покриттям TiN/CrN (1,3 м/с)

У зоні похилої поверхні серійного кільця, виявлені поперечні смуги, (мають період і ширину), перетин яких складає ~ 5 мкм. Висока частота чергування смуг відповідає за область безпосередньої зміни структури на поверхні тертя, в

даному випадку через процеси циклічного впливу в умовах підвищення температури до 70°C (виміряна в процесі експлуатації). Наявність смуг в зоні, прилеглої до тертя можна пояснити локалізацією деформації, згідно принципу Сен-Венана [165, 166].

Одночасно, виявлено факт яскраво вираженою структуризації поверхні і серійного кільця, покритого оловом на похилій поверхні, прилеглої до зони тертя, протяжністю $\sim 0,45-0,5$ мм (див. Додаток Б, рис. 1). Це також свідчить про деградацію основного металу і низьку його стійкість до циклічного впливу, який приймає характер ударної хвилі і проявляється у формуванні смуг, що чергуються. У кільцях з іонно-плазмовим покриттям схожою структуризації похилої поверхні при однаковому шляху тертя не спостерігається (див. Додаток Б, рис. 2), що пояснюється високим ступенем опору покриття пластичній деформації, викликаній циклічним впливом при терті, а також наявністю в його осередку додаткового змащення – графіту.

Високий опір зношуванню визначається мікроструктурою, хімічним і фазовим складом, фізико-механічними властивостями матеріалу і напруженим станом зон контактної взаємодії пари тертя. Для підтвердження нового підходу математичного опису структуроутворення додатково оцінили концентраційні зміни компонентів в локальних зонах тертя.

На Рис. 5.3 і в Таблиці 5.1 наведені результати порівняльного мікрорентгеноспектрального аналізу поперечних зон, які формуються при терті (стиснення – спектри 4, 5 і розтягнення – спектр 6), які характеризуються різним вмістом компонентів. Так, зони стиснення насичуються переміщуємими більш твердими зміцнюючими фазами TiN, які, як і CrN, досить однорідно розподіляються в них 14,27 - 15,67% і 51,58 - 60,45% відповідно. Що стосується зон скидання енергії (розтягнення), то в них частка цих зміцнюючих фаз знижується в $\sim 2,0$ і $3,0$ рази відповідно. При цьому, кількість азоту не завжди змінюється відповідно до основних зміцнюючих компонентів - Ti, Cr. Це дає

підставу припустити про можливість формування різних типів нітридів - Cr_2N , CrN або TiN_{1-x} [167].

Аналіз поздовжньої зони, прилеглої до області тертя, також характеризується підвищеним вмістом зміцнюючих фаз покриття. Ці області також мають близьку частку Cr, Ti і N, які змінюються у вузьких межах: 72,92 - 73,71%; 16,72 - 16,89% і 9,10 - 9,98% відповідно (див. Рис. 5.3 і таблицю 5.1, спектри 1, 2, 3).

Такі комплексні дослідження дозволили описати характер формування структурних змін на поверхні тертя при експлуатації поршневого кільця.

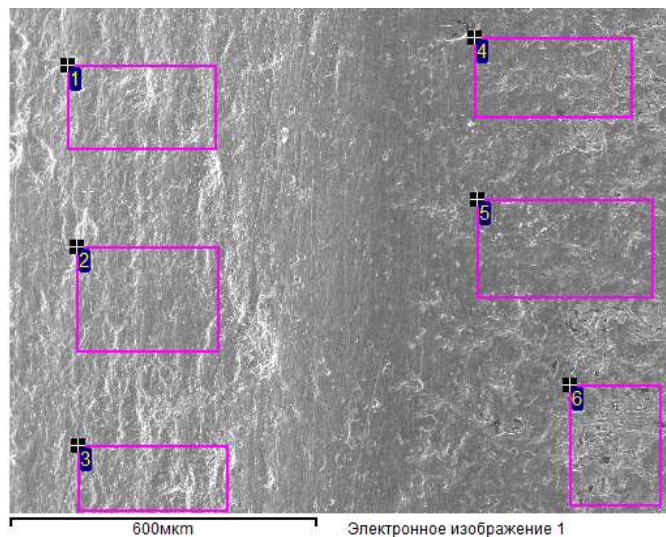


Рис. 5.3 – Мікрорентгеноспектральний аналіз похилої поверхні (спектри 1, 2, 3) і локальних зон тертя (спектри 4, 5, 6) зміцненого поршневого кільця

Таблиця 5.1 – Результати мікрорентгеноспектрального аналізу похилої поверхні (спектри 1, 2, 3) і локальних зон тертя (спектри 4, 5, 6) зміцненого поршневого кільця

Спектр	N, %	O, %	Al, %	Si, %	Ti, %	Cr, %	Fe, %
1	9.17	-	-	0.07	16.85	73.59	0.31
2	9.10	-	-	0.09	16.89	73.71	0.22
3	9.98	-	-	0.07	16.72	72.92	0.31
4	19.19	-	0.13	0.41	14.27	51.58	14.41
5	16.67	4.19	0.12	0.11	15.67	60.45	2.79
6	7.49	8.04	0.48	1.13	6.94	20.90	55.02

5.2 Теоретичне обґрунтування особливостей зносостійкості маслоз'ємних поршневих кілець в умовах тертя ковзання

Як видно з Додатка Б (таблиці 3 - 6), значення функціоналів обох варіантів кілець відрізняються як за результатами підрахунку по стовпцях, так і - рядкам фотографій поверхні вихідної і – тертя (Рис. 5.4, 5.5). Однак, якщо порівнювати функціонали виключно по рядках або стовпцях, то можна виділити певну закономірність.

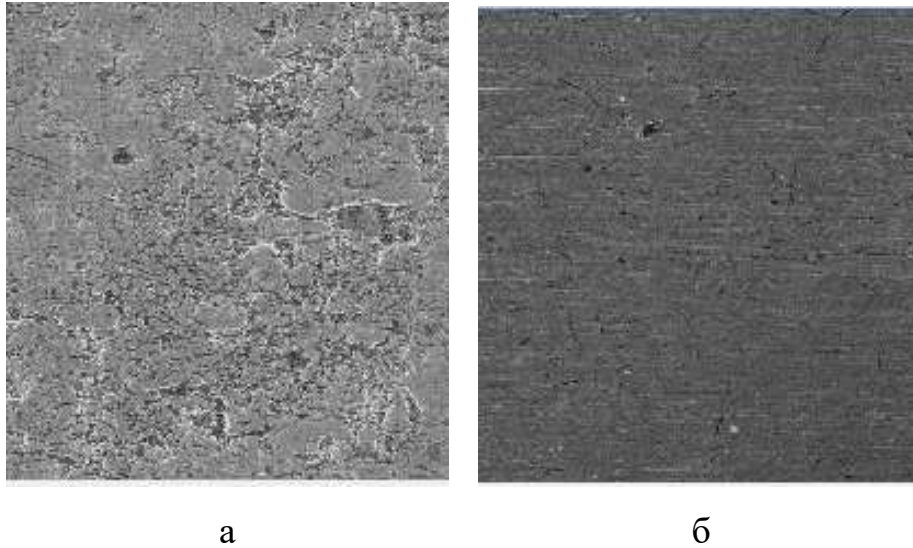


Рис. 5.4 Мікроструктура вихідної поверхні (а) і тертя (б) серійного кільця (швидкість ковзання 1,3 м/с), x100

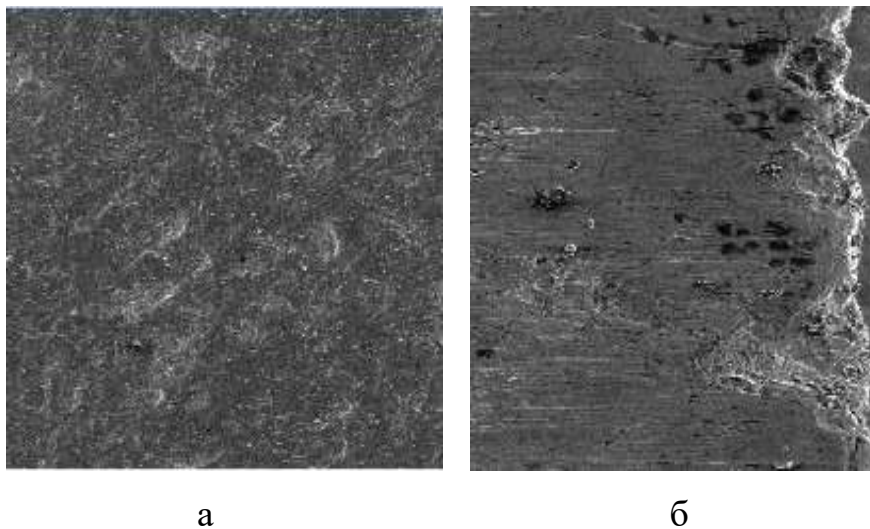


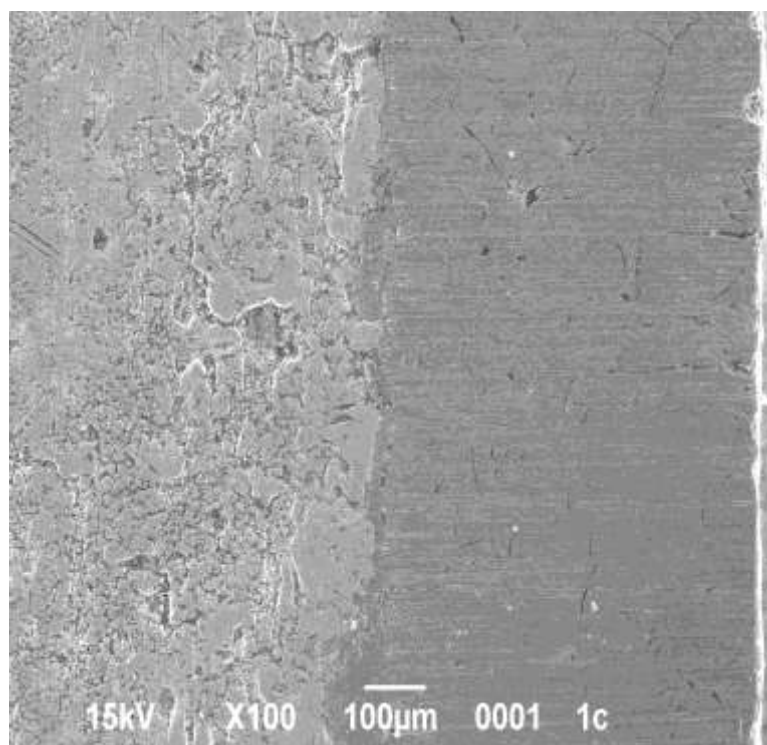
Рис. 5.5 Мікроструктура вихідної поверхні (а) і тертя (б) зміцненого кільця (швидкість ковзання 1,3 м/с), x100

При підрахунку за стовпцями максимальний функціонал вихідної поверхні серійного кільця на 13,7% нижче його зони тертя (див. Додаток Б, таблиці 3, 5), а зміцненого - на 32% вище (див. Додаток Б, таблиці 4, 6). Однак, підрахунок по рядках, показує, що найбільший функціонал вихідної поверхні серійного кільця вище його області тертя на 4% (див. Додаток Б, таблиці 3, 5), а зміцненого - на 8,2% нижче. В обох випадках, як за стовпцями, так і рядками найбільша різниця між поверхнями характерна для кільця з багат шаровим іонно-плазмовим покриттям. Такий результат, як видно, пов'язаний із зносом ефективного шару покриття, що підтверджується різким зниженням мікротвердості зміцненого кільця (вихідна мікротвердість TiN/CrN 53 - 59 ГПа), а після випробувань, її рівень наблизився до - вихідного матеріалу (4 - 4,7 ГПа).

На це вказує і величина максимального функціоналу кілець (підраховано по рядках зон тертя, див. Додаток Б, таблиці 4, 6).

Можливо, що високий розкид по функціоналам окремих поверхонь кілець безпосередньо пов'язаний з розбивкою загального знімка на окремі фрагменти. З огляду на те, що чергування зон стискання і розтягнення раніше було зафіксовано по всьому об'єму матеріалу робочої поверхні кільця [Додаток А, п. 4, п. 7], додатково виконано оцінку підрахованих значень функціоналів (Додаток Б, таблиці 7, 8) за загальними фотографіями обох розглянутих варіантів (Рис. 5.6, 5.7) після випробувань, які показують відмінну закономірність, як по рядках, так і - стовпцях.

Так, в середньому, по стовпцях максимальний функціонал серійного кільця нижче зміцненого. Цей же показник, але підрахований по рядках нижче щодо зміцненого іонно-плазмовим багат шаровим покриттям робочого шару, що відображає його більш високий опір пластичній деформації в розглянутих напрямках, в середньому, на 30%. При цьому, різниця по стовпцях і рядках в обох варіантів кілець становить 26%. Це відображає і однаковий характер розподілу зон стиснення і розтягнення в ідентичних умовах експлуатації.



а

б

Рис. 5.6 Загальна фотографія вихідної структури і поверхні тертя серійного кільця

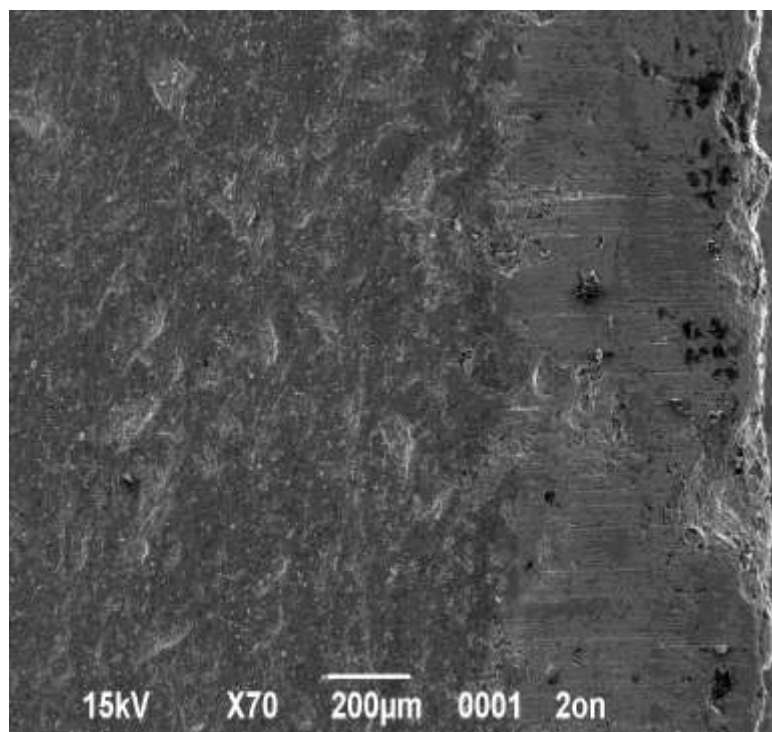


Рис. 5.7 Загальна фотографія вихідної структури і поверхні тертя зміцненого кільця

5.3 Теоретичне обґрунтування впливу параметрів тертя на стійкість структуроутворення у зміцненому шарі поршневих кілець

Теоретичне дослідження проводили також по електронімікроскопічним зображенням. За допомогою спеціально розробленого алгоритму програми додатково були порівняльно оброблені цифрові зображення трьох партій маслоз'ємних серійних і зміцнених кілець, випробуваних при швидкостях ковзання 1 і 1,3 м/с у форматі bmp. Обробку проводили для побудови кореляційних залежностей. Для цього додатково кожне зображення, було умовно поділено на 2 області: зона тертя, яку утворює робоча поверхня кільця і вихідна, що безпосередньо примикає до неї.

Оцінювали лапласіани (характеризують дифузійні потоки) і дивергенцію (описує щільність фрагмента зображення). Виявлено, що в серійних кільцях, випробуваних при обох швидкостях ковзання, середня нейтральність лапласіанів, підрахованого по основній формулі, під кутом 90° до основного (відображає анізотропію показників), 3-го і 4-го порядку, які вище в досліджуваних поверхнях тертя, щодо їх вихідних зон (Додаток Б, таблиця 9). Однак, рівень дивергенції нижче в зонах тертя щодо вихідних значень. Слід зазначити, що збільшення різниці по ряду перерахованих вище показників, що характеризують поверхню тертя, крім дивергенції, вище в кільці, випробуваному при швидкості ковзання 1,3 м/с, в середньому, на $\sim 41\%$ (для основного лапласіана - 36% , для лапласіану під кутом 90° до основного - 83% , 3-го лапласіана - 26% , 4-го лапласіана - 18%) (Додаток Б, таблиця 10). З цього виходить, що при збільшенні швидкості ковзання на 23% при відповідних умовах, зростає як ваговий знос гільзи циліндрів (в 1,6 р.), так і їх поршневих кілець (на 16%). Різниця виявлена апроксимуваними показниками. При цьому дивергенція показує, що її рівень в кільці, випробуваного при швидкості 1 м/с, вище на 12% щодо – 1,3 м/с (див. Додаток Б, таблиці 10).

Інша ситуація спостерігається при зміцненні кілець з наноструктурним покриттям. Так, показники середньої нейтральності, крім лапласіана під кутом 90° ,

вище в зоні тертя кільця (див. Додаток Б, таблиця 11). Однак, різниця показників між вихідною поверхнею і зоною тертя значно менше, ніж у серійного кільця, випробуваного при тій же швидкості – 1,3 м/с (див. Додаток Б, таблиці 10 і 12). Така різниця між серійними і зміцненими кільцями складає для показників лапласіана основного – 97%, а під кутом 90° – 92%, 3-го – 89%, 4-го – 83%, дивергенція – 97 %.

Така висока різниця по перерахованих вище характеристикам середньої нейтральності, вказує на близьку ідентичність структури вихідної поверхні і зони після тертя зміцненого кільця. При цих показниках відзначається низький ступінь деградації зміцненої поверхні в процесі тертя, і як наслідок – висока ступінь зносостійкості.

Виходячи з отриманих результатів виявили, що середня локальна однорідність у всіх аналізованих варіантах досить висока і близька до 1,0 (Додаток Б, таблиці 13 і 14). Слід зазначити, що локальна однорідність вихідної поверхні в серійних варіантах нижче випробуваної на знос. Можливо, це пов'язано з повним видаленням покриття олова і структуризацією поверхні тертя. Різниця по однорідності між вихідною поверхнею і серійним кільцем, випробуваними при швидкості 1,3 м/с підвищується відносно кільця, випробуваного при швидкості 1 м/с, в середньому, в 4 рази і на 18% при оцінці однорідності по рядках і стовпцях відповідно (Додаток Б, таблиця 14).

Варіант кільця зі зміцненням, випробуваний при швидкості 1,3 м/с схильний до меншого механічного впливу, ніж серійне кільце при тій же швидкості – на 25% (див. Додаток Б, таблиці 14 і 15 розрахунок за рядками). Однак відповідає більшому показнику, ніж серійний варіант при швидкості ковзання 1,0 м/с – в 3 рази. Аналогічно і при розрахунку за стовпцями – зміцнене кільце менш схильне до зношування ніж серійне при 1,3 м/с – на 11%. При цьому, в більшій ступені пластичну деформацію сприймає зміцнене кільце в порівнянні з серійним при швидкості 1,0 м/с – на 8% також за стовпцями (див. Додаток Б, таблиці 14 та 16).

Середні функції таких показників як: колір, середньоквадратичне відхилення, узагальнений градієнт, загальний лапласіан, 3-й і 4-й лапласіан, а також дивергенція

виявляють зниження після випробувань, яке характерно для обох варіантів серійних кілець (Додаток Б, таблиця 17). Однак, можна спостерігати незначну різницю між ними. Так, всі показники, крім узагальненого градієнта (показник мінливості структуроутворення), вище в кільці, випробуваному при швидкості ковзання 1 м/с: колір на 21%, середньоквадратичне відхилення на 12,5%, загальний лапласіан на 9,5%, 3-й лапласіан на 11,4%, 4-й лапласіан на 12%, дивергенція - 12,5%. Узагальнений градієнт в обох варіантах показує ідентичний рівень.

Аналізом встановлено, що серійні поршневі кільця відрізняються недостатньою експлуатаційною стійкістю, особливо при швидкості ковзання 1,3 м/с. При використанні іонно-плазмового зміцнення кілець, середні функції показників його поверхні після експлуатації при швидкості 1,3 м/с навпаки підвищуються відносно їх вихідного стану: колір (див. Додаток Б, таблиця 18) - на 6%; середньоквадратичне відхилення - на 17%; узагальнений градієнт - на 9%; загальний лапласіан - на 15%; 3-й лапласіан - на 15%; 4-й лапласіан - на 16%; дивергенція - на 16% (див. Додаток Б, таблиця 19). Різниця між вихідним станом поверхні і після тертя серійного і зміцненого кілець наведені в таблицях Додатку Б, таблицях 18, 20. Вона істотно нижче за показниками середніх функцій для зміцненого кільця, випробуваного при швидкості 1,3 м/с, відносно серійного при тій же швидкості: колір - в 8,7 раз; середньоквадратичне відхилення - в 3,5 раз; узагальнений градієнт - в 7 разів; загальний лапласіан - в 3,8 раз; 3-й лапласіан - в 3,4 рази; 4-й лапласіан - в 3,2 рази; дивергенція - в 3,7 раз. Дані результати свідчать про те, що серійні кільця схильні до більш суттєвого зношування. У той час як багат шарове іонно-плазмове зміцнення забезпечує мінімальну зміну стану поверхні після експлуатації. Це відображено в таблиці 22 Додатку Б, де спостерігається несуттєве відхилення від показників середніх функцій вихідної поверхні.

В даному дослідженні найбільш деградована структура прийнята така, для якої абсолютна величина лапласіану більше або дорівнює 16. Різниця вихідної поверхні і після тертя по першим 3-м показниками: дивергенції, абсолютного і 3-го лапласіанів,

вище в серійному кільці, випробуваному при швидкості 1,3 м/с: дивергенція на 4%; лапласіан в 39 разів; 3-й лапласіан в 4,5 рази (Додаток Б, таблиця 21). Однак 4-й лапласіан показує зворотню тенденцію і можливо спостерігати його зниження в обох серійних виробках, проте він менше змінюється в кільці, випробуваному при швидкості ковзання 1 м/с – на 11 %.

Для зміцненого кільця спостерігається схожа тенденція. Однак, на відміну від серійних, після їх експлуатації забезпечується підвищення всіх показників (Додаток Б, таблиця 22). Слід зазначити, що 4-й лапласіан в цьому розрахунку вказує на відмінний характер структуризації поверхні серійних кілець (див. Додаток Б, таблиця 21).

З середніх відносин до кольору по аналізованим показникам, крім дивергенції, видно, що після випробувань на тертя вони незначно знижуються при обох швидкостях в серійних кільцях і практично можливо порівняти один з одним (Додаток Б, таблиця 23). Однак, дивергенція серійного кільця, випробуваного при швидкості ковзання 1 м/с залишилася на рівні вихідного стану, в той час як при швидкості 1,3 м/с – вона знизилася з 0,3 до 0,2. Протилежна ситуація спостерігається для зміцненого кільця, де показники після випробувань на тертя підвищуються (за винятком узагальненого градієнта і дивергенції), які залишилися на колишньому рівні (Додаток Б, таблиця 24). При цьому, основний лапласіан підвищився на 17%, 3-й – на 18 %, 4-й – на 14 %.

Рівень напруженого стану і локалізація деформацій істотно впливають на пошкодзованість поверхні тертя. У зв'язку з цим важливим є оцінити вплив процесів, що відбуваються при мінливості функції потужності дисипації в процесі тертя і зношування.

Функції потужності дисипації (відображає ступінь переходу енергії упорядкованого руху в енергію неупорядкованого) вихідних поверхонь серійних кілець, випробуваних при швидкості 1,3 м/с показують відносно більш високі значення в порівнянні з меншою швидкістю 1 м/с (Рис. 5.8, 5.9). Так, вони вище за умовними показниками кольору 1-5, 7 і 9. За показниками 6, 10, 13, 17, 19, 21, 25, 26,

29, 31, 33, 36 і 37 спостерігається зворотня тенденція, однак різниця не суттєва. За іншими показниками – значення близькі.

Різниця потужності дисипації між поверхнями вихідними і тертя серійного кільця (швидкість 1 м/с) полягає в тому, що початкові потужності після випробувань істотно підвищуються (Рис. 5.9 і 5.11). Така тенденція справедлива для умовних показників 1-4 і 9, а для 5, 6, 8, 10, 11, 13, 15, 16, 17, 19, 21, 22, 25, 26, 28, 29, 31, 33, 36 і 37 спостерігається незначне зниження потужності дисипації після випробувань. При швидкості тертя 1,3 м/с потужність дисипації як поверхні вихідної, так і після експлуатації залишилися без змін (Рис. 5.8, 5.10).

Іонно-плазмове зміцнення забезпечує зниження рівня потужності дисипації за показниками 1, 2, 5, і підвищення по 3, 9. Решта показників без змін (Рис. 5.12, 5.13). Як видно рівні потужності різних варіантів виготовлення поршневих кілець, і випробуваних при швидкості ковзання 1,3 м/с, мають відмінний характер, що також вказує на різний рівень опору пластичної деформації при терті.

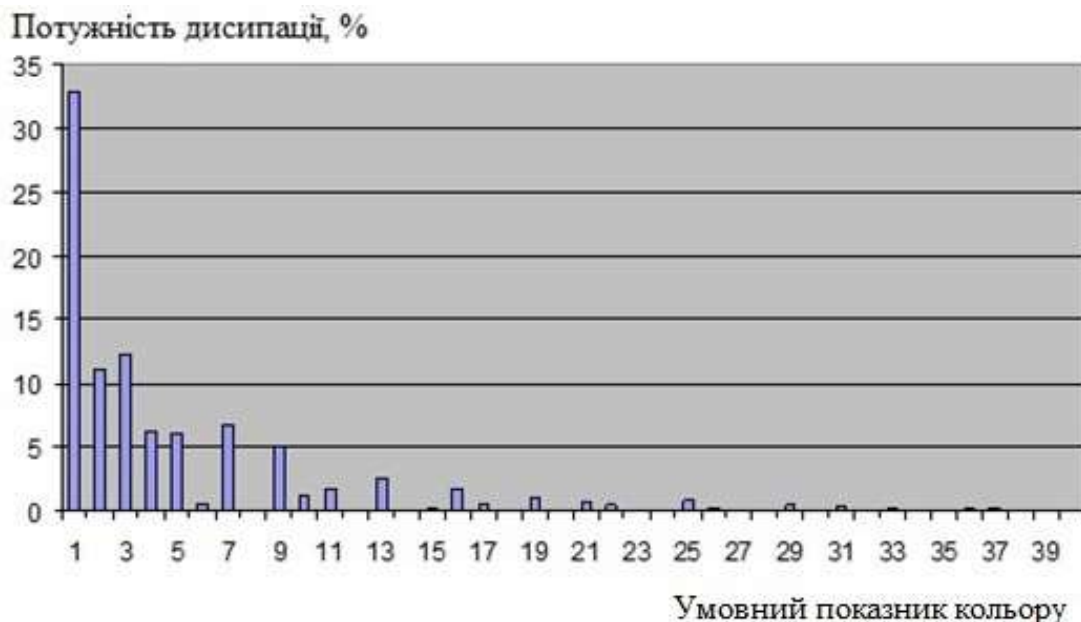


Рис. 5.8 – Потужності дисипації вихідної поверхні серійного кільця, випробуваного при швидкості ковзання 1,3 м/с

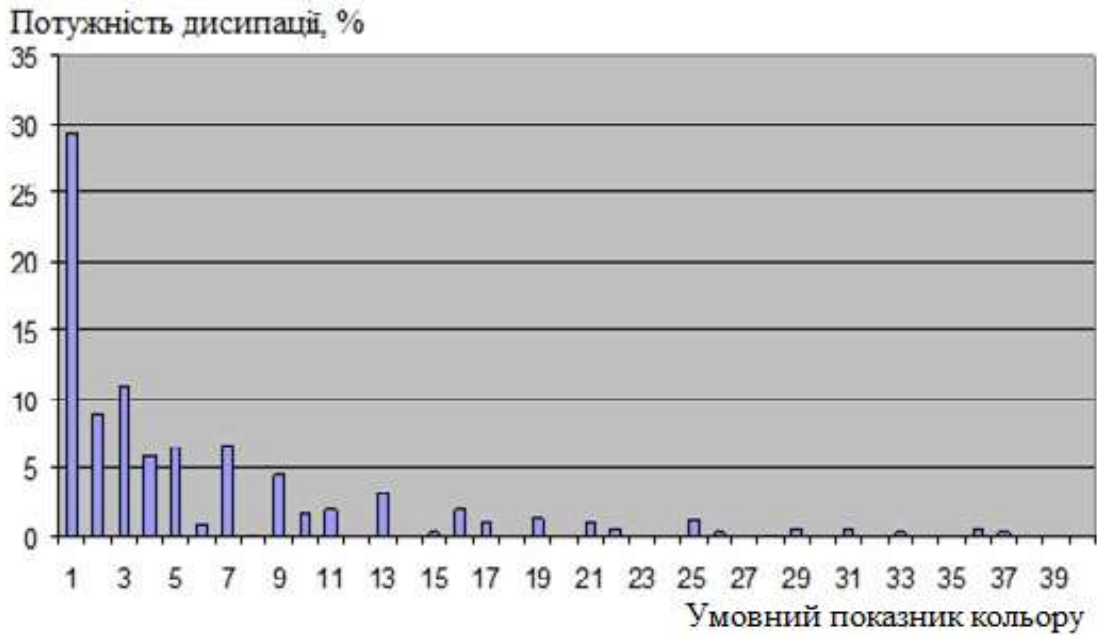


Рис. 5.9 – Потужності дисипації вихідної поверхні серійного кільця, випробуваного при швидкості ковзання 1 м/с

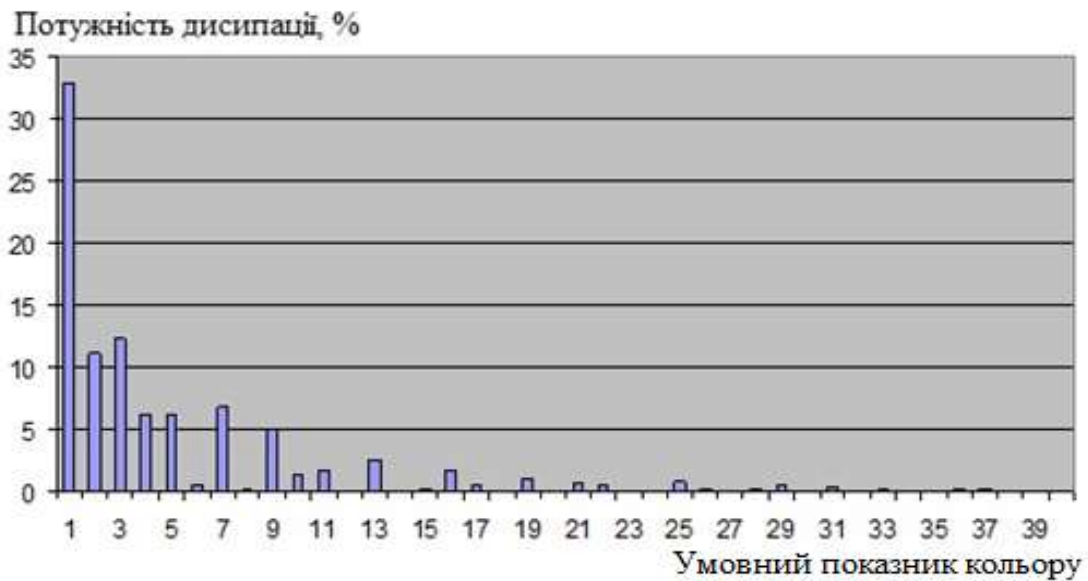


Рис. 5.10 – Потужності дисипації поверхні тертя серійного кільця, випробуваного при швидкості ковзання 1,3 м/с

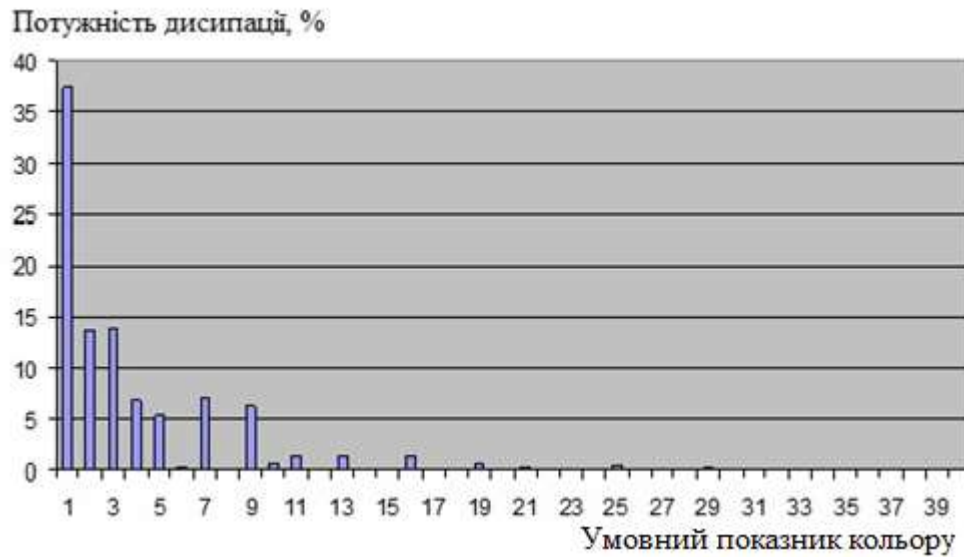


Рис. 5.11 – Потужності дисипації поверхні тертя серійного кільця, випробуваного при швидкості ковзання 1 м/с

Для серійних кілець після випробувань при швидкості ковзання 1,3 м/с характерна ідентичність за всіма показниками потужності дисипації (див. Рис. 5.8 і Рис. 5.10). Підвищення початкових показників цієї характеристики серійних кілець після випробувань при швидкості ковзання 1 м/с (див. Рис. 5.9 і Рис. 5.11), відносно – 1,3 м/с, може вказувати на більш інтенсивну пластичну деформацію (характерно для збільшення висоти робочої поверхні після експлуатації).

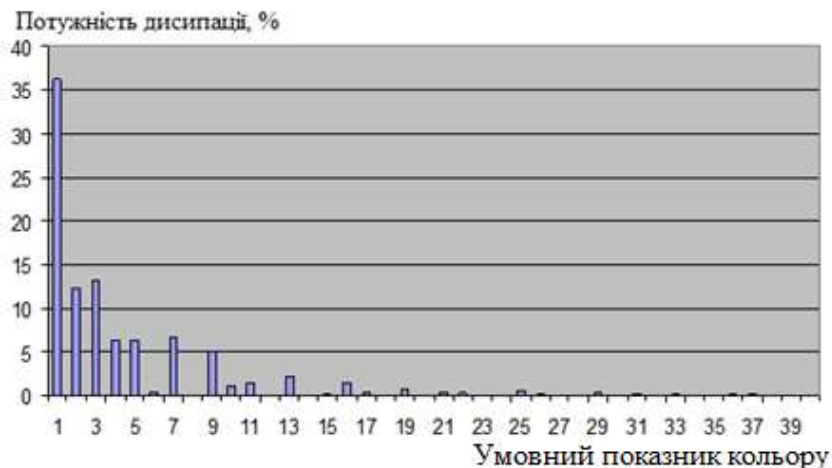


Рис. 5.12 – Потужності дисипації вихідної поверхні зміцненого кільця, випробуваного при швидкості ковзання 1,3 м/с

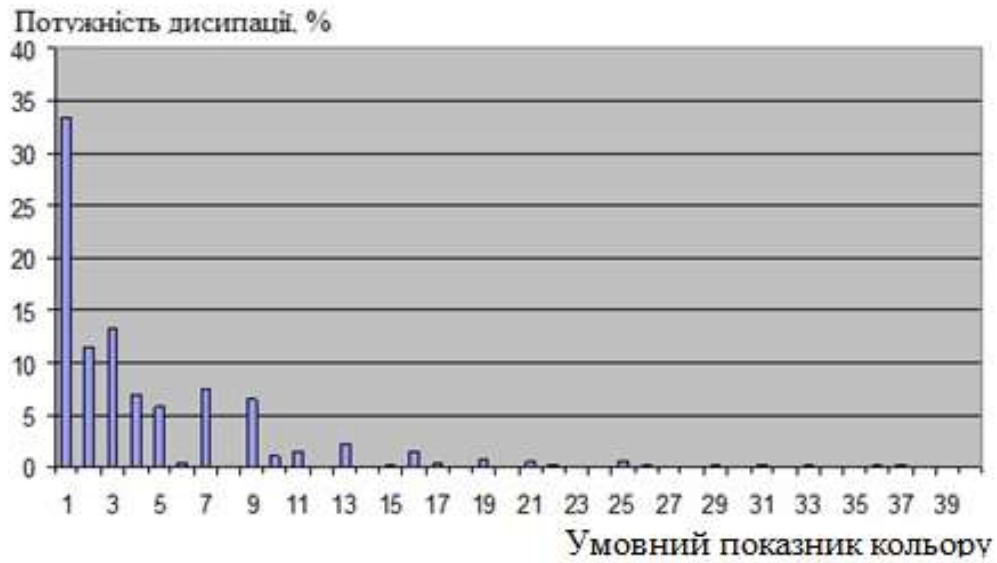


Рис. 5.13 – Потужності дисипації поверхні тертя зміцненого кільця, випробуваного при швидкості ковзання 1,3 м/с

Аналізували взаємодію фаз, які оцінювали за поєднанням кольорів. Для зручності виявлення залежностей, було створено 14 груп сполучень кольорів (фаз) випробуваних кілець в порядку зниження процентного їх поєднання. Потім виконали сортування за номером поєднань: від 4-го до 1-го. У підсумку після перерахунку зображень велика частина результатів (з 14 груп сполучень кольорів) відповідає за зміцнення і серійних кілець, випробуваних при швидкості ковзання 1,3 м/с. Для зони тертя зміцненого кільця, із загальної кількості зон впливу (Додаток Б, таблиця 25), відповідають – 7 рядків (37%), і таке ж на серійних. З цієї кількості для серійного кільця, випробуваного при швидкості 1 м/с, виявлено – 5 поєднань (26%). Можливо, відносно високий відсоток поєднань кольорів характеризує схожі умови експлуатації, зокрема, при ідентичній швидкості тертя. Значення підрахованих поєднань кольорів для вихідних поверхонь представлені в Додатку Б, таблиця 26.

Для вихідної поверхні серійного кільця (при швидкості ковзання 1,3 м/с) програма розрахувала найбільшу кількість - 10 поєднань (57%); для зміцненого - 6 (32%); для серійного при швидкості – 1 м/с – 3 (11 %).

У Додатку Б, рис. 3 – 5 представлені візуалізації значень зображень зон тертя кілець, випробуваних при швидкостях ковзання 1,3 і 1 м/с відповідно (Додатку Б, таблиця 25). На рис. 6 – 8 представлено значення, які відповідають зображенням вихідних поверхонь кілець, випробуваних при швидкостях ковзання 1,3 і 1 м/с відповідно (Додатку Б, таблиця 26). Окремі рисунки відображають розрахунки різних сполучень кольорів, які представлені на рис. 3 – 8, та вони не внесені до відповідних таблиць 25 і 26, оскільки мають низький рівень значень, який не перевищує 1,1% для вихідних поверхонь оцінюваних варіантів змін структури кілець і менше 0,2% - їх зон тертя. Великий інтерес представляють виявлені смуги, що чергуються та розташовуються перпендикулярно напрямку ковзання і, характеризують переміщення твердих фаз, що відбувається в процесі тертя (див. Додаток Б, рис. 5).

Оптико-математичним описом поверхні тертя виявлені зони розшарувань і порушення цілісності поверхні тертя, особливо серійних кілець. Причиною цього, як видно, є викришування мікрооб'ємів поверхні матеріалу. Доказом цього може бути загальна спрямованість розшарувань і шляхи тертя. Розшарування зони тертя виникає через пошкодзованість нанесеного шару покриття оловом, що не дозволяє забезпечити високу однорідність серійного кільця. Крім того, розшарування сприяє і формуванню напружень, що виникають після випробувань на тертя робочої поверхні кільця (Додаток Б, рис. 3, 4).

З огляду на високу мікротвердість і низьку швидкість зношування зміцненого варіанту кільця, то такі смуги характеризують високий ступінь опору зношуванню.









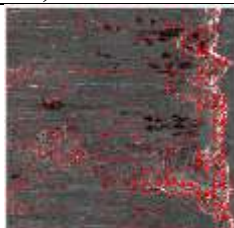
У вихідних поверхнях, які примикають до робочої зони кілець обох варіантів їх виготовлення, спостерігається теж її структуризації (Додаток Б, рис. 6 – 8). Спостережуване пояснюється циклічним навантаженням при випробуваннях.

Аналіз частки поєднань кольорів на вихідних поверхнях серійних кілець (Додаток Б, таблиця 26), виявив переважання випробуваного при швидкості ковзання 1,3 м/с – 10 рядків (67,2%), а при 1 м/с – 3 рядки (34,3 %). Якщо порівняти загальну частку вмісту кольорів вихідних і поверхонь тертя, то можна побачити, що при швидкості ковзання 1,3 м/с відсоток поєднань кольорів в першому випадку, дорівнює 67,2%, а після випробувань – 78% тобто відзначається збільшення сумарної їх частки на 10,8%. Сумарна частка вмісту кольорів вихідної поверхні кільця, випробуваного при швидкості ковзання 1 м/с становить, як було виявлено вище, 34,3%, а після випробувань – 57,5%, тобто сумарна взаємодія кольорів зростає на 23,2%. У підсумку, сумарне процентне поєднання кольорів за різницею їх поверхонь до- і після випробувань кілець при швидкості ковзання 1 м/с в 2 рази вище, ніж при – 1,3 м/с.

Частка виявлених сполучень фаз показує, що зона тертя при обох швидкостях ковзання серійних кілець, має більш високі значення в порівнянні з вихідними поверхнями: 6,97% – при швидкості ковзання 1,3 м/с і 6,35% – при 1 м/с. У вихідних поверхнях такі показники не перевищують: 1,625% і 1,636% – при відповідних швидкостях ковзання 1 м/с (таблиця 5.2). При цьому збільшення частки поєднань фаз може забезпечуватися в умовах дифузійних процесів при формуванні та мінливості дислокаційної структури.


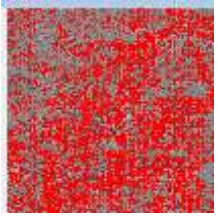
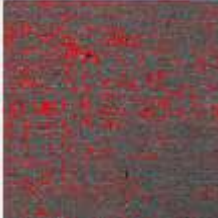
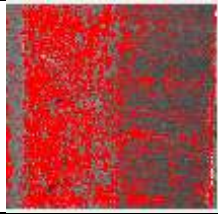
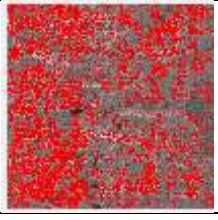

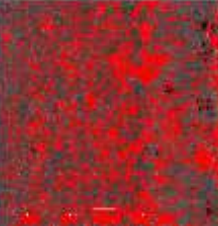
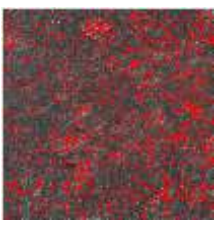
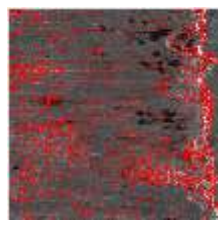
Протилежна ситуація спостерігається при зміцненні кільця наноструктурним покриттям. Аналіз виявив підвищення цього показника на поверхні тертя, щодо вихідного стану - на 8,4% (див. таблицю 5.2).

Таблиця 5.2 – Структурні зміни в різних варіантах поршневих кілець

Загальний вигляд кільця		Вихідна поверхня		Зона тертя	
фото	Відсоток дислокацій, %	фото	Відсоток дислокацій, %	фото	Відсоток дислокацій, %
Серійне кільце (швидкість 1,3 м/с)					
	4.006		6.971		1.625
Серійне кільце (швидкість 1 м/с)					
	3.766		6.352		1.636
Зміцнене кільце (швидкість 1,3 м/с)					
	3.535		3.453		3.77

Наведені показники оцінювали при потужності дисипації більше 16%. У серійному кільці, випробуваному при швидкості ковзання 1,3 м/с, показано зниження цього показника в 4,28 рази, а при швидкості ковзання 1 м/с - в 4,27 рази (таблиця 5.3). Для зміцненого кільця, випробуваного при швидкості ковзання 1,3 м/с спостерігається підвищення цього показника – на 22,4%. Очевидно, що така залежність вказує на більш високу ступінь опору зношуванню та деградації поверхні тертя зміцненого кільця.

Таблиця 5.3 – Структурні зміни різних варіантів в поршневих кільцях при експлуатації і потужності дисипації більше 16 %

Загальний вигляд кільця		Вихідна поверхня		Зона тертя	
фото	Відсоток дислокацій, %	фото	Відсоток дислокацій, %	фото	Відсоток дислокацій, %
Серійне кільце (швидкість 1,3 м/с)					
	6.605		11.713		2.735
Серійне кільце (швидкість 1 м/с)					
	5.959		10.145		2.375
Зміцнене кільце (швидкість 1,3 м/с)					
	4.407		3.346		4.312

Також аналізували вплив різного рівня потужності дисипації (більше 12% і 20%, див. Додаток Б, таблиці 27, 28). Показано, що мінливість цього параметра вносить свої корективи.

При потужності більше 12% (Додаток Б, таблиця 27 включає аналіз мінливості структуроутворення при різному рівні потужності дисипації) показники знижуються:

- для кілець, випробуваних при швидкості ковзання 1,3 м/с - в 3,42 рази;
- для кілець, випробуваних при швидкості ковзання 1 м/с - в 3,32 рази.

Для зміцнених кілець, такий показник (див. Додаток Б, таблиця 27) після тертя підвищується на 17,2%.

При потужності більше 20% (Додаток Б, таблиця 28) показники знижуються для серійних кілець після випробувань:

- при швидкості ковзання 1,3 м/с - в 5,7 рази;
- при швидкості ковзання 1 м/с - в 5,3 рази.

У зміцненому кільці, частка (див. Додаток Б, таблиця 28) показань після тертя підвищується на 24 %.

Як при менших, так і – більших потужностях в діапазоні від <12 до <20 зберігається наступна тенденція: різниця у відсотках показників дефектності (оцінювали за щільністю дислокацій) і вона більш значна в серійних поршневих кільцях, після випробувань при швидкості ковзання 1,3 м/с (відповідає зниженню значень) та у всіх описаних варіантів має – 14,8%, 13,45% і 15,28% при потужностях <12, <16 і <20 відповідно.

Протилежна тенденція спостерігається для зміцнених кілець. При всіх розрахованих потужностях на поверхні тертя спостерігається підвищення цього показника в межах від 8,4 до 24%. Це дає підставу вважати, що багатопшарове іонно-плазмове зміцнення забезпечує більш високу стабільність поверхні при зворотно-поступальному навантаженні при експлуатації.

Для більш повної характеристики мінливості стану поршневих кілець виконані порівняльні розрахунки розподілу потужностей дисипації по фотографіях, отриманих після випробувань при швидкості ковзання 1,3 м/с. Показано, що пік потужності дисипації вище на поверхні тертя, в порівнянні з вихідною на 22% (36 проти 280, Додаток Б, рис. 9, 10). При цьому сумарний розподіл потужностей дисипації, наведені на гістограмах поверхонь тертя кілець, випробуваних при швидкості ковзання 1,3 м/с аналогічно зменшується від підвищення швидкості ковзання, і їх відлік починається зі значення 71 і закінчується на позначці 113 цієї ж вісі (Додаток Б, рис. 10, 12).

Пікове значення потужності дисипації вище на поверхні тертя серійних кілець, випробуваних при швидкості ковзання 1 м/с на 11% ніж у вихідній цього ж варіанту (37 проти 33, Додаток Б, рис. 11, 12). Кількість потужностей також більше на вихідній поверхні і розподіляється на 49% осі абсцис (з 65 до 127), а в зоні тертя - на 37% (з 71 до 113). Можливо, порівняння розподілу потужностей за цим критерієм також може бути актуально і для шорсткості, так як на поверхні тертя утворився характерний мікрорельєф внаслідок тертя і зносу.

Гістограма розподілу потужностей до- і після експлуатації зміцненого кільця має відмінну рису відносно серійних виробів. Після зворотно-поступального навантаження на гістограмах зафіксовано зниження пікової потужності дисипації відносно вихідного стану 39 (Додаток Б, рис. 13) до 34 після експлуатації (знижується на 13 %) (Додаток Б, рис. 14).

З порівнюваних гістограм потужностей дисипації видно, що вихідні поверхні серійних кілець мають відносну ідентичність, яка становить 0,53 (Додаток Б, таблиця 29). Загальні знімки мають різний характер, так як порівнювані гістограми серійних кілець при різних швидкостях ковзання не перевищують значення 0,237. При цьому, їх зони тертя мають відносну схожість - 0,546. Однак, виходячи з того ж аналізу, вихідні поверхні і зони тертя тих же кілець абсолютно різні і тому дорівнюють «0». Можливо, така відмінність пояснює різний характер зношування при відмінних швидкостях ковзання.

Порівняння всіх трьох варіантів кілець (загального зображення зони тертя і пов'язаною з нею – вихідної при терті і без нього), показує найменшу схожість, яка не перевищує 0,014 (див. Додаток Б, таблиця 29). Однак порівняння вихідної поверхні і зони тертя такого кільця показує максимальну схожість процесів, що протікають - 0,905 (аналіз виконаний з використанням критерію Колмогорова).

Для виявлення зв'язків між фазами при аналізі мінливості структури на поверхні тертя використовували гістограми Бозе з оцінкою точок (пікселів) поєднань кольорів (фаз). Ці розрахунки наведені в Додатку Б таблиці 31, 33, 35.

Як видно з отриманих даних (Додаток Б, таблиці 30 - 33), для серійного кільця, випробуваного при швидкості ковзання 1,3 м/с, вихідна поверхня і зона тертя мають різну кількість поєднань кольорів. Так, в поєднаннях 4 точок різних кольорів в зоні тертя виявлено суттєве їх зниження з 11,5% до 1,7% (в 6,8 рази), а частка, яка відповідає 4 точкам одного кольору має протилежну тенденцію – вони збільшуються з 7% до 17,8% (в 2,5 рази) щодо вихідного. Можливо, це пов'язано з тим, що експлуатація сприяє структуризації поверхні, і тим самим підвищує її однорідність, про що і свідчить збільшена частка 4 точок одного кольору і зменшення – 4 точок різних кольорів. Також слід зазначити, що перед випробуваннями робочі поверхні серійних кілець мали на своїй поверхні покриття олова, яке також внаслідок зносу повністю було відсутнє. Можливо, що різниця між цими показниками і вказує на знос покриття – олова і шару зміцнюючого в період припрацювання. Чим вище різниця, тим значніша ступінь зносу покриття. Аналогічна ситуація і з кільцями, випробуваними при швидкості ковзання 1 м/с. Як і в першому випадку видно зниження частки поєднань кольорів по 4 точкам де вони різні та їх частка зменшується з 10,1% до 1,6% (в 6,3 рази). В цьому випадку підвищується кількість пікселів з однаковими кольорами з 8,8% до 19,5% (в 2,2 рази) відповідно. Як видно, є різниця між швидкостями ковзання. Так, при швидкості ковзання 1,3 м/с кільця зношуються більше, що супроводжується зміною частки поєднань кольорів з 9,8%, до 8,5%, а при 1 м/с з 10,8% до 10,7%. Ці результати в достатній мірі узгоджуються з результатами фактичного сумарного вагового зносу кілець 12,1 мг при швидкості ковзання 1,3 м/с і 7,8 мг при 1 м/с.

Для зміцненого кільця, випробуваного при швидкості ковзання 1,3 м/с характерна інша закономірність. Так, частка поєднань при 4-х точках різних кольорів показує підвищення значень після експлуатації з 3,3% до 4,3% (на 23,2%). Частка 4-х точок одного кольору після випробувань демонструє незначне зниження з 14,9% до 14,7% (на 1,3%). Слід зазначити що, ці показники кількості точок кольорів зміцненого кільця (Додаток Б, таблиці 34, 35), оцінені при швидкості ковзання 1,3 м/с змінюються в межах - від 1,3% до 23,2%. Для обох серійних кілець, випробуваних при швидкостях 1 м/с і 1,3 м/с,

зафіксована суттєва зміна. За винятком частки 4 точок одного кольору і такого ж числа різних кольорів в серійному кільці (швидкість 1,3 м/с), де зафіксована зміна - від 31,2% до 2,2 раз, а для швидкості ковзання 1 м/с (Додаток Б, таблиці 30 та 31, 1-й і 5-й стовпці) - від 23,9% до 2,2 раз.

Гістограми Бозе відповідно до лапласіанів показують, що тенденції дещо змінюються щодо вище наведених поєднань кольорів (Додаток Б, таблиці 36 - 39). Так, при 4 точках одного кольору, для серійних кілець при обох швидкостях ковзання частка його знижується після випробувань. При цьому, для кільця, випробуваного при швидкості ковзання 1,3 м/с, цей показник знижується з 5,4% до 3,5% (на 35,2%), а для швидкості ковзання 1 м/с - з 5% до 3,5% (на 30%), тобто різниця між двома швидкостями не перевищує 14,8%.

Іонно-плазмове зміцнення кілець змінює характер показників по 4-м точкам одного кольору відносно серійних кілець, випробуваних при обох швидкостях ковзання. У цьому випадку відзначається підвищення на 17,8% аналізованого показника (Додаток Б, таблиці 40, 41).

Розрахунки гістограм Бозе кольору точок дивергенції (Додаток Б, таблиці 42 - 45) показують схожу закономірність для серійних кілець при обох швидкостях ковзання, як і для знаків лапласіанів (див. Додаток Б, таблиці 36 - 39). Так, частка 4 точок одного кольору вище при швидкості ковзання 1,3 м/с, ніж при 1 м/с. Різниця між вихідною поверхнею і зоною тертя для серійного кільця, випробуваного при швидкості ковзання 1,3 м/с становить 38%, в той час як при 1 м/с – 23,5%, що також узгоджується з експериментальними результатами випробувань і підтверджує підвищений знос при підвищеній швидкості ковзання.

Зміцнений варіант виробу показує зниження кількості 4 точок одного кольору з 06.5 до 04.6% (на 29%). Така різниця, яка менше серійного кільця (1,3 м/с) і більше серійного (1 м/с), очевидно відображає загальний характер навантаження при випробуванні.

Для отримання інформації про ступінь неоднорідності структури додатково виконали порівняльний розрахунок поворотів серійних кілець і зміцнених. Встановлено, що вони відображають схожу закономірність, як і при попередніх розрахунках гістограм Бозе для лапласіанів (Додаток Б, таблиці 36 - 39) і дивергенції (Додаток Б, таблиці 42 - 45) для серійних кілець. Спостерігається зниження 4-х точок одного кольору вихідної поверхні і після експлуатації, що характерно і для серійних кілець, випробуваних при швидкостях ковзання 1,3 м/с на 6,7% (Додаток Б, таблиці 48, 49) і 1,0 м/с на 2,6%, (Додаток Б, таблиці 50, 51).

У разі зміцнення такого виробу іонно-плазмовим покриттям (Додаток Б, таблиці 52, 53), спостерігається істотне підвищення відсотка 4-х точок одного кольору – з 18,7% до 24,6% (на 24%). Такий результат узгоджується з розрахунками цього варіанту кільця, виконаними для лапласіанів (див. Додаток Б, таблиці 40, 41) і підтверджує відмінний рівень властивостей робочої поверхні кілець після іонно-плазмової технології зміцнення.

В процесі експлуатації поршневих кілець формуються зони стиснення і розтягнення (скидання енергії). Для їх опису використовували наступний підхід. За допомогою статистичних розрахунків і експериментальних результатів визначали лапласіани, які вираховували за формулою (2.5). В цьому випадку оцінювали кольори c_1 - c_5 , які розташовані в точках і показані на Рис. 2.14.

В цьому випадку, статистика, відповідає залежності Бозе і полягає в розподілі числа однакових кольорів на раніше показаних 5 точках (див. Рис. 2.15). При цьому однакові кольори можливі тільки для випадків, які представлені в Додатку В, таблиці 1 - 6. В результаті послідовної оцінки фотографії, точка за точкою (скануванням), були пораховані відсотки, що припадають на кожен випадок. Це і є гістограма Бозе для фотографії. Детально методика і результати розрахунків гістограм Бозе з урахуванням М-трійок наведені в Додатку В.

Показано, що для серійного кільця (швидкість 1,3 м/с) характерна наступна залежність: частка гістограми Бозе, а також - особливих М-трійок по поєднанню 5-ти точок однакового кольору, сприяють збільшенню з 03.143 до 10.235 (в 3,26 рази) після

випробувань (див. Додаток В, таблиця 1). За поєднанням різних кольорів відзначається зворотня залежність, а саме – зниження значень з 04.014 до 00.206 (в 19,5 разів) для частки гістограм Боze та зниження в 12,5 разів для – особливих М-трійок.

Для серійного кільця, випробуваного при швидкості ковзання 1 м/с, зберігається залежність розподілу їх частки (%), як і при швидкості ковзання 1,3 м/с, проте рівень значень вище описаних показників відрізняється (див. Додаток В, таблиця 2). Так, відсотки гістограм Боze для вихідної поверхні і зони тертя, а також і особливих М-трійок по поєднанню 5-ти точок одного кольору показують збільшення значень з 04.327 до 12.121 (в 2,8 раз) після випробувань. Аналогічно, як і при швидкості ковзання 1,3 м/с. Частка гістограм Боze для однакових кольорів показує зниження значень з 03.555 до 00.259 (в 13,7 рази), а – особливих М-трійок для цього ж випадку – з 00.133 до 00.009 (в 14,8 разів).

Можливо, що при такому порівнянні частки гістограм Боze для різних кольорів характеризують ступінь їх зносу після випробувань, а особливих М-трійок відображають збільшення висоти робочої поверхні серійного кільця, внаслідок його пластичної деформації при більш низькій швидкості ковзання. Так, при швидкості ковзання тертя 1,3 м/с, висота зони тертя, в середньому по кільцях, збільшилася на 0,04 мм, а при швидкості ковзання 1 м/с – на 0,06 мм.

Зміцнення забезпечує іншу закономірність. Частка гістограм Боze такого кільця по поєднанню 5-ти точок одного кольору після експлуатації показують незначне підвищення з 08.189 до 08.902 (на 8%) (див. Додаток В, таблиця 3). Одночасно, частка особливих М-трійок цієї ж поверхні після експлуатації показують аналогічне підвищення на 8%. Такі результати підтверджують високу стабільність зміцненої поверхні, мінімальний ступінь зношування зміцненого кільця, і високий опір пластичній деформації при зворотно-поступальному навантаженні в експлуатації.

Після апроксимації поєднань 5-ти точок різних кольорів (Додаток В, таблиця 4) видно, що серійне кільце при швидкості ковзання 1,3 м/с, має частку негативних лапласіанів, які підвищується з 0.425 до 0.440 (на 3,4%). Для позитивних лапласіанів для

5-ти точок поєднання різних кольорів, характерно зниження з 0.575 до 0.560 (на 2,6%) при тій же швидкості ковзання 1,3 м/с. При швидкості ковзання серійного кільця 1 м/с (Додаток В, таблиця 5), частка негативних лапласіанів підвищується з 0.426 до 0.529 (на 19,5%), а позитивних – навпаки знижується з 0.574 до 0.471 (на 18%).

Аналіз поверхні тертя зміцненого кільця (Додаток В, таблиця 6), як і в попередніх розрахунках, показує зворотню залежність відносно кілець серійного використання. Частка негативних лапласіанів знижується з 0.509 до 0.416 (на 18,3%), а позитивних – підвищується з 0.491 до 0.584 (на 16%). В даному випадку можна спостерігати близьку різницю в показниках, але чим вона нижча, тим більш високу стабільність властивостей спостерігається після експлуатації при формуванні відповідної структури.

5.4 Оцінка економічної ефективності технології зміцнення багат шаровим іонно-плазмовим покриттям TiN/CrN маслоз'ємних поршневих кілець

Традиційно для поршневих кілець використовують сірий або високоміцний чавун. Через їх форми і малий перетин, застосовують різні покриття для їх зміцнення - найчастіше використовують хромування. Однак, це не забезпечує досягнення необхідних вимог по зносостійкості. Зниження довговічності поршневих кілець відбувається в результаті їх інтенсивного зношування і деформації робочої поверхні.

Як було показано випробуваннями (див. Розділ 4), розробка нової технології нанесення багат шарового нанопокриття TiN/CrN іонно-плазмовим методом підвищує зносостійкість поршневих кілець в 12-15 разів, а пластичну деформацію робочої поверхні в 4 рази.

Оцінка економічного ефекту пропонуємої нової технології зміцнення кілець, виконана з урахуванням їх застосування для комплектації двигуна спеціальної техніки і виконана для ДП «Завод імені В.О. Малишева».

Собівартість такого поршневого кільця з сірого чавуну складає 179 грн. Додаткове зміцнення іонно-плазмовим покриттям не перевищує 300 грн. Досить низька вартість такої обробки пояснюється тим, що одночасно наносили багат шарове покриття на два поршневих кільця. Тому, загальна вартість зміцненого кільця досягає 479 грн. Незважаючи на те, що зношування поршневого кільця знижується до 15 разів, для оцінки економічного ефекту використано показник зменшення схильності до пластичної деформації зміцненої робочої зони, що дозволило підвищити його надійність в 4 рази. З огляду на зміну вартості кільця нового типу, економічний ефект від впровадження такої технології для одного двигуна складе:

$$E = (C_k \cdot \Pi - C_y) \cdot K, \quad (6.1)$$

$$E = (179 \cdot 4 - 479) \cdot 60 = 14220 \text{ грн.}$$

де E - економічний ефект, грн.;

C_k - собівартість маслос'ємного поршневого кільця, зміцненого багат шаровим нанопокриттям, грн.;

Π - показник підвищення витрат за рахунок зменшення схильності до пластичної деформації зміцненого кільця (разів);

C_y - вартість поршневого кільця з урахуванням іонно-плазмового зміцнення, грн.;

K - кількість поршневих кілець необхідних для комплектації одного двигуна, шт.

Показник Π з залежності 4.1 визначається витратами у виробника. Основними факторами додаткових витрат є: 1 - виготовлення пристроїв для обробки поршневих кілець методом іонно-плазмового осадження для зміцнення багат шаровим покриттям; 2 - витратні матеріали; 3 - електроенергія і обслуговування техпроцесу; 4 - настройка, обслуговування устаткування, зарплата персоналу фахівців і податки.

Розшифровка витрат на зміцнення, які сумарно склали 300 грн. На одне поршневі кільця, в середньому, відповідає:

- фактор 1 – 15,0 % (45 грн.);
- фактор 2 – 31,0 % (93 грн.);
- фактор 3 – 25,0 % (75 грн.);
- фактор 4 – 29,0 % (87 грн.).

При цьому, в процесі зміцнення нанесенням багатошарових покриттів одночасно здійснювали обробку двох кілець і тривалість процесу не перевищувала 1 год. 30 хв.

Виготовлене пристосування для одночасної обробки двох поршневих кілець може бути використано протягом тривалого часу.

В процесі експлуатації поршневі кільця працюють в різних режимах швидкостей ковзання, які суттєво змінюють характер процесу тертя і зношування, що супроводжується дифузією компонентів, пластичною деформацією робочих поверхонь і їх структуризацією.

В результаті проведених порівняльних комплексних досліджень вивчено внесок цих факторів в показники зносостійкості і запропонована нова економічно і екологічно обґрунтована технологія зміцнення поршневих кілець для двигунів спеціальної техніки.

В результаті проведених досліджень обґрунтована технологічна ефективність використання багатошарових покриттів поршневих кілець з сірого чавуну, зміцнених багатошаровим нанопокриттям TiN/CrN. Технологічні параметри зміцнення і методи контролю якості захищені 4 патентами України (№ 110145, 117673, 120464, 130854) і нагороджені на Всеармійському конкурсі «Кращий винахід року» першим і другим місцем (Додаток А), а основи створення нових наноматеріалів і покриттів для різних галузей техніки удостоєні почесною грамотою (Додаток А) від Академії наук України.

Висновки до п'ятого розділу

1. Теоретична оцінка якості поверхні тертя при нанесенні багат шарового наноструктурного покриття TiN/CrN на поршневі кільця з сірого чавуну виконана на основі поєднання електронномікроскопічних досліджень та нових підходів до оцінок показників зносостійкості з використанням оптико-математичного методу. На його основі розроблена спеціальна комп'ютерна програма для оцінки показників відносної нейтральності абсолютних величин лапласіанів і дивергенції, що описують процеси дифузії і змін щільності фрагментів відповідно. Попередніми дослідженнями було визначено, що в даному випадку оцінювати процеси, які відбуваються при терті і зношуванні найбільш ефективно проводити розрахунками по п'ятиточковій різницевої схеми осередку пікселів.

2. Порівняльні випробування серійних і зміцнених поршневих кілець показали, що в зоні робочої поверхні тій, яка примикає до неї – похилої в обох випадках формуються поперечні смуги (відносно напрямку руху спряженої деталі), які відповідають різним інтервалам зон стиснення і розтягнення (скидання енергії). Зміцнені кільця відрізняються щільністю поперечних смуг і їх розмір не перевищує 20 мкм, а поздовжні – не виявлені. При цьому температура поверхні тертя досягає 70 °C. Структуризація поверхні відзначається і в прилеглий зоні, що можна пояснити ефектом Сен-Венана (дією локальних деформацій на границі з поверхнею тертя).

3. Методом мікрорентгеноспектрального аналізу встановлено, що зона стиснення формується за рахунок переміщення твердих зміцнюючих фаз TiN і CrN, які досить рівномірно в них розподіляються 14,27-15,67% і 51,58-60,45% відповідно. Одночасно в зонах розтягнення частка цих фаз знижується в 2 і 3 рази відповідно. Разом з тим показано, що частка азоту не завжди змінюється відповідно до основних зміцнюючих компонентів Ti і Cr і це дає підставу припускати про можливість формування в зонах стиснення різних типів нітридів Cr₂N, CrN і TiN_{1-x}, TiN. У зонах, прилеглих до поверхні тертя, також відзначається процес структуризації з досить близьким вмістом зміцнюючих фаз.

4. Розроблені спеціальні алгоритми програми для дослідження змін структури. На кожній фотографії визначали значення періодів кожного його пікселя по стовпцях і рядках (анізотропію). Згідно оцінки пробних періодів, цикл мінливості оцінювали в діапазоні від 2 до 200 пікселів. Визначали середні значення часткою негативних, нульових і позитивних лапласіанів, згідно аналізованого періоду. Потім розраховували абсолютну величину відхилення від середнього значення. За результатами отриманого масиву сортували ці показники щодо зменшення їх значень. Це дозволило виявити найбільш істотні зміни.

5. На підставі розрахунків оцінили відмінності в структуроутворенні кілець варіантів, які зіставлялися (серійні і зміцнені) після експлуатації. Показано, що максимальний функціонал вихідної поверхні, оцінений за стовпцями серійного поршневого кільця на 13,7% нижче його зони тертя, а зміцненого - на 32,0% вище. У той же час, найбільший функціонал вихідної поверхні серійного кільця вище його зони тертя лише на 4,0%, а зміцненого – на 8,2% нижче. Спостережуване може бути пов'язано з частковим зносом покриття при терті.

6. Теоретичними розрахунками за показниками середньої нейтральності лапласіанів, підрахованих по основній формулі, а також під кутом 90° до основного, 3-му і 4-му лапласіанів виявили особливості структуроутворення різних поверхонь маслоз'ємних поршневих кілець. Так, в серійних кільцях, випробуваних при обох швидкостях ковзання (1,0 і 1,3 м/с), ці показники вищі в поверхнях тертя, щодо їх вихідних зон. Збільшення різниці за всіма, перерахованим вище показниками на поверхні тертя, крім дивергенції, вище в серійному кільці, випробуваному при швидкості ковзання 1,3 м/с відносно 1,0 м/с, в середньому, на $\sim 41\%$. Це вказує на те, що при збільшенні швидкості ковзання на 23%, зростає як знос поверхні гільзи циліндрів (в 1,6 р.), так і серійних поршневих кілець (на 16%). Різниця між серійним і зміцненим варіантом, випробуваних при швидкості ковзання 1,3 м/с, становить за показниками: лапласіанів основного на 97%; під кутом 90° – 92%; 3-го – 89%; 4-го – 83%; дивергенції – 97%. Така значна різниця по характеристикам середньої нейтральності, в значній мірі, відображає низьку деградацію зміцненої поверхні тертя.

7. Оцінена середня однорідність у всіх варіантах досліджуваних поршневих кілець. Вона досить висока і близька до 1,0. Локальна однорідність вихідної поверхні в обох серійних варіантах нижче, ніж випробуваних на знос. Цілком ймовірно, що це пов'язано з повним видаленням покриття олова (наносять для припрацювання) і структуризацією поверхні тертя. Кільце зі зміцненням (при швидкості ковзання 1,3 м/с) схильне до меншого механічного впливу і цей показник на 25% нижче, ніж у серійному при тій же швидкості ковзання.

8. Досліджено характеристики середніх функцій (кольору, середньоквадратичного відхилення, узагальненого градієнта, 3-го і 4-го лапласіанів, а також дивергенції), які показали їх зниження після випробувань. Це характерно для обох варіантів серійних кілець. Всі показники, крім узагальненого градієнта, вище в кільці, випробуваному при швидкості ковзання 1 м/с в діапазоні 9,5 - 21%. Узагальнений градієнт в обох варіантах випробувань показує ідентичний рівень.

9. Використання іонно-плазмового зміцнення кілець виявило, що середні функції цих показників після експлуатації при швидкості ковзання 1,3 м/с навпаки, підвищуються щодо їх вихідного стану на 6% - 17%. Різниця між вихідним станом поверхні і після тертя серійного кільця (швидкість ковзання 1,3 м/с) нижче, ніж в зміцненому варіанті за показниками перерахованих вище середніх функцій від 3,2 до 8,7 разів. Дані результати ще раз підтверджують, що серійні кільця схильні до істотно більшої пластичної деформації. Одночасно, багатопарове іонно-плазмове зміцнення забезпечує мінімальні зміни на поверхні тертя після експлуатації.

10. Мікроструктури серійних і зміцнених кілець виявили, що максимальний їх колір, який характеризує найбільш деградовану структуру, дорівнює 16. Різниця вихідної поверхні і тертя по дивергенції, абсолютному і 3-му лапласіанів, вище в серійних кільцях (при 1,3 м/с): дивергенція на 4%; абсолютний лапласіан в 39 разів; 3-й – в 4,5 рази. Однак, 4-й лапласіан показує зворотню тенденцію і спостерігається його зниження в обох серійних виробках. При цьому він менше в кільці, відносно випробуваного при швидкості ковзання 1 м/с – на 11%. На відміну від серійних кілець, в зміцнених після експлуатації

забезпечується підвищення всіх показників. Можна припустити, що 4-й лапласіан в цьому розрахунку вказує на відмінний характер структуризації поверхонь тертя серійних кілець (поява поздовжнього переміщення металу формуванням додаткових смуг).

11. Дослідженнями оцінені функції потужності дисипації поверхонь серійних кілець, випробуваних при швидкості ковзання 1,3 м/с, виявлені відносно високі значення в порівнянні з меншою – 1 м/с. Іонно-плазмове зміцнення забезпечує зниження рівня потужності для однієї частини показань, а для іншої – підвищення, що пов'язано зі зміною анізотропії структури в локальних зонах. Рівні потужності різних варіантів виготовлення поршневих кілець, випробуваних при швидкості ковзання 1,3 м/с, мають відмінний характер, що також може вказувати на різну ступінь опору зношуванню.

12. При теоретичному описі структуроутворення в умовах тертя з формуванням смуг стиснення і розтягування (скидання енергії) виявлені області розшарувань і порушення цілісності. Причиною цього є формування зон з повною відсутністю або мінімізацією зміцнюючої фази. Ефекту створення такої неоднорідності сприяє і формуємі напруження, сформовані в процесі тертя робочої поверхні кільця.

13. Для опису структуроутворення і дифузійних процесів, виходячи з мінливості щільності дислокацій, аналізували зв'язки цих процесів з різними інтервалами потужності дисипації (<12 , <16 , <20). Встановлено, що частка дислокацій знижується в серійних поршневих кільцях, після випробувань при швидкості ковзання 1,3 м/с у всіх описаних діапазонах від 3,42 до 5,7 разів. Протилежна тенденція зафіксована для зміцнених кілець. При всіх аналізованих потужностях дисипації на поверхні тертя спостерігається підвищення цього показника в межах від 8,4 до 24%. Це дає підставу вважати, що багат шарове іонно-плазмове зміцнення забезпечує більш високу стабільність поверхні при терті в умовах зворотно-поступального навантаження.

14. Для оцінки відносної ідентичності структуроутворення виконаний розрахунок гістограм потужностей дисипації. Порівняння здійснювали за критерієм Колмогорова. Встановлено, що вихідні поверхні серійних кілець мають відносну ідентичність, яка становить 0,53. При цьому, їх зони тертя мають схожість – 0,546.

Виходячи з цього аналізу, структура вихідних поверхонь і зони тертя кілець одного варіанта різна і відповідає 0. Порівняння фотографій поверхонь серійного кільця зі зміцненим, виявило найменшу схожість, яке не перевищує 0,014. Аналіз вихідної поверхні і зони тертя зміцненого кільця показує максимальну схожість – 0,905. Така закономірність вказує на низький рівень деградації структури поверхні тертя зміцненого кільця після експлуатації.

15. Для оцінки співвідношення змін між фазами на досліджуваних поверхнях виконаний розрахунок частки пікселів (точок) поєднань кольорів. Так, в поєднаннях, по 4-м точкам різних кольорів в зоні тертя серійного кільця (при 1,3 м/с) відзначається їх зниження в 6,8 разів, а в 4-х точках одного кольору – збільшення в 2,5 рази щодо вихідного стану. Слід зазначити, що перед випробуваннями робочі поверхні серійних кілець покривалися оловом, яке після періоду припрацювання повністю було відсутнє. Для зміцненого кільця, випробуваного при швидкості ковзання 1,3 м/с характерна інша закономірність. Всі показники частки точок кольорів знаходяться в межах від 1,3% до 23,2%. Одночасно, для обох серійних кілець, випробуваних при швидкостях 1 м/с і 1,3 м/с, зафіксовано суттєву зміну у співвідношенні частки фаз, що вказує на більш високу стійкість до зношування зміцнених. Оцінку розподілу кольорів, що відображає фазовий склад на поверхні тертя проводили на основі розрахунку гістограм Бозе з урахуванням знаків лапласіанів. Виявлено, що розподіл поєднань кольорів дещо змінилося. Так, їх частка по 4 точкам одного кольору, для серійних кілець при обох швидкостях ковзання після випробувань знижується. При цьому, для кільця, випробуваного при швидкості ковзання 1,3 м/с, вона знижується на 35,2%, а для швидкості 1 м/с – на 30%. При іонно-плазмовому зміцненні кілець забезпечується підвищення цього показника на 17,8% відносно серійних (випробуваних при обох швидкостях ковзання). Для підтвердження достовірності отриманого результату одночасно аналізували ступінь дисипації енергії з використанням особливих М-трибок на основі аналізу дифузії компонентів (лапласіанів) і щільності фрагментів (дивергенції). Отримані результати підтверджують рівень і тенденції мінливості отриманих на основі розрахунків гістограм Бозе.

16. Розрахунок економічної ефективності проведено на основі зниження деформації робочої поверхні. Основними витратами для зміцнення є: виготовлення пристосувань для обробки поршневих кілець методом іонно-плазмового осадження покриття; витратні матеріали; електроенергія і обслуговування техпроцесу; налаштування, обладнання, зарплата фахівців і податки. З перерахованого вище, сумарні витрати на додаткове зміцнення становить 300 грн. З урахуванням використання 60 кілець тільки в одному двигуні спеціальної техніки досягається ефективність 14220 грн.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. В роботі представлені нові експериментальні та теоретичні дослідження, які спрямовані на підвищення триботехнічних властивостей поршневих кілець двигунів спеціальної техніки.

2. Аналізом літературних джерел розглянуто умови роботи поршневих кілець та механізми їх зношування, виявлені різні методи підвищення зносостійкості деталей. На основі одержаної інформації особливу увагу приділили можливості використання багат шарових покриттів при наноструктурному зміцненні, тому що потрібна була необхідність підвищувати робочу поверхню тонкостінних виробів із сірого чавуну. Виходячи з того, що для підвищення зносостійкості таких деталей ефективним є використання хромування з наступною обробкою плазмою, прийняли рішення по вивченню можливості використання для зміцнення багат шарове покриття TiN/CrN.

3. Для зміцнення робочої поверхні (пояска) кільця наносили багат шарове іонно-плазмове покриття TiN/CrN на устаткуванні типу «Булат-6». Покриття наносили при різних співвідношеннях Ti/Cr, а саме: Ti/Cr=0,17, Ti/Cr=0,27 та Ti/Cr=0,40. Встановлено оптимальне співвідношення фаз покриття з точки зору забезпечення найвищої зносостійкості.

4. Перед і після нанесення багат шарового покриття TiN/CrN з різним співвідношенням Ti/Cr (0,17, 0,27 та 0,40) на поршневі кільця проводили, за спеціальною схемою, визначення і фіксацію показників коерцитивної сили, яка характеризує рівень напруженого стану. Вимірювання виявили, що при нанесенні зміцнюючого покриття змінюється не тільки рівень напружень на 17,24 %, але і величина замку, в середньому, до 3,1%, що не відповідає вимогам нормативно-технічної документації. Це справедливо для всіх використаних співвідношень Ti/Cr. Для виключення впливу цих факторів мінливості стану при зміцненні кілець використовували метод природнього старіння в період 1,5 місяців. Метод полягав

у використанні природнього старіння деталей після зміцнення в перебігу певного періоду, при якому будуть досягнуті необхідні параметри коерцитивної сили і розміри замку, які відповідають вихідному стану.

5. Виконано оцінку триботехнічних властивостей зміцнених кілець та порівняльно досліджували з тими, що використовуються у діючому виробництві. При швидкості ковзання 1,0 м/с, встановлено, що зношування зміцнених поршневих кілець зі співвідношенням $Ti/Cr=0,17$ зменшується до 12,2 рази, а при швидкості 1,3 м/с – до 15,7 разів порівняно з серійними поршневими кільцями. При співвідношеннях $Ti/Cr=0,27$ та $Ti/Cr=0,40$ сумарний знос таких варіантів зміцнення, відносно серійних кілець при швидкості 1,3 м/с, знижується в меншій ступені – в 6 та 3 рази відповідно, а при швидкості 1,0 м/с – в 3,4 рази та на 47 % відповідно. При цьому, коефіцієнт тертя при співвідношенні $Ti/Cr=0,17$ і таких швидкостях ковзання знижується у тричі відносно серійного поршневого кільця.

6. При швидкості ковзання 1,3 м/с, сумарна швидкість зношування найнижчя у співвідношення $Ti/Cr=0,17$ – в 12,3 рази по відношенню до серійних кілець, і на 43 % та в 3,7 разів порівняно до співвідношень компонентів іонно-плазмового покриття $Ti/Cr=0,27$ та $Ti/Cr=0,40$ відповідно. При швидкості ковзання 1,0 м/с, сумарна швидкість зношування також найнижчя у співвідношення $Ti/Cr=0,17$ – в 6,4 разів по відношенню до серійних кілець, і у 2 рази та у 3,8 разів порівняно до співвідношень компонентів іонно-плазмового покриття $Ti/Cr=0,27$ та $Ti/Cr=0,40$ відповідно. При цьому збільшення висоти робочих поверхонь вихідних кілець зростає на 20%, а зміцнених лише на 5%. Спостережуване є результатом зниження пластичної деформації при зміцненні поверхні наноструктурним багат шаровим покриттям, що підвищує їх довговічність. Таким чином, обґрунтовано оптимальне співвідношення ($Ti/Cr=0,17$), яке забезпечує високі триботехнічні показники поршневих кілець виготовлених з сірого чавуну.

7. Аналізом структури та мікрорентгеноспектральним аналізом створеної неоднорідності при терті показано, що в зонах зміцнення компоненти покриття

змінюються і досягають Ti – 10,76 %, Cr – 39,08 % (вихідний склад після нанесення нанопокриття дорівнює Ti – 14,5 %, Cr – 83,77 %, при співвідношенні Ti/Cr=0,17. Такі зміни на поверхні тертя відбуваються вже при швидкості ковзання 1,0 м/с та це є результатом пластичної деформації. Після випробувань при швидкості ковзання 1,3 м/с відношення Ti/Cr змінилося в порівнянні з їх вихідним співвідношенням до 0,36. При цьому частка Ti в зоні тертя знизилася з 14,5% до 0,8%, а Cr - з 83,77% до 2,2%. На поверхні тертя виявляються окремі включення графіту металу поршневого кільця.

8. Поверхня тертя гільзи, яка випробувалась в трибосистемі зі зміцненим поршневим кільцем, характеризується меншим інтервалом розподілу хімічних елементів, порівняно з вихідною поверхнею. Такий розподіл елементів пояснюється, зокрема, рівномірним зношуванням робочої поверхні гільзи в трибосистемі з поршневим кільцем, зміцненим оптимальним співвідношенням Ti/Cr. Про це свідчить наявність рівномірного розподілу покриття фосфора на поверхні в діапазоні 3,45-3,86 %. При цьому, на вихідній поверхні фосфор розподілен нерівномірно – 3,96-13,15 %, в залежності від аналізованої зони.

9. З використанням оптико-математичного методу, який адаптовано для аналізу поверхонь тертя поршневих кілець, досліджено характер їх зносу та якості поверхні, які незалежно від їх зміцнення мають схильність до формування дискретних смуг. Виявлена різниця у їх формуванні. Так, при відсутності зміцнення нанопокриттям вони розташовані як вздовж, так і поперек напрямку ковзання трибосистеми. У зміцнених кільцях смуги проявляються лише як поперечні і вони формуються більш тонкими відносно повздовжніх у серійних (20 мкм проти 70 мкм). При цьому ширина та період чергування виявлених поперечних смуг на поверхні тертя у серійному кільці складає 10 мкм, що в 2 рази нижче, а ніж у зміцненому. Аналогічна структуризація поверхні відзначається і в прилеглій зоні, що можна пояснити ефектом Сен-Венана (дією локальних деформацій на границі з поверхнею тертя). Оптико-математичним описом таких структур показано, що

смуги відповідають зонам стиснення, а між ними створюються – розтягнення (скидання енергії). З використанням цього методу виявлені різні параметри, які змінюють напруження та структуроутворення при терті та зношуванні. Це ступень неоднорідності фазового складу, анізотропія властивостей, умови тертя, механізма зношування, використана технологія зміцнення. Результати аналізу нейтральностей абсолютних величин лапласіанів (характеризує дифузійні потоки) та дивіргенції (описує щільність фрагменту зображення) дозволили виявити різницю між вихідним та зміцненим станом.

10. Виявлені зміни, на основі комплексних досліджень, що відбувається в експлуатації на поверхні тертя, яка полягає в тому, що незалежно від типу поверхні тертя має місце значна циклічна пластична деформація, що створює зони зміцнення та розрідження і вони відрізняються зміною хімічного складу, щільністю з розвитком пошкоджень, схоплень, можливими руйнуваннями особливо на деталях без зміцнення. При цьому, отримало подальший розвиток комплексні дослідження впливу параметрів тертя та зношування поршневих кілець спеціальної техніки на структурні зміни.

11. Експлуатаційні випробування на ДП "Завод імені В.О. Малишева" підтвердили результати стендових випробувань. Економічний ефект від впровадження такої технології зміцнення для одного двигуна складе 14220 грн.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

1. Мяконьков М.Б., Хмелевская В.Б. Сравнительные исследования способов нанесения покрытий на поршневые кольца для уменьшения их износа. *Металлообработка. Новые материалы и технологии производства*. 2010. № 3(57). С. 36-39.
2. Тополянский П.А. Плазменные технологии в автосервисе. *Ритм машиностроения*. 2017. №2. С. 34-37.
3. Голего Н.Л. Технологические мероприятия по борьбе с износом в машинах. Москва-Киев : Государственное научно-техническое издательство научной литературы, 1961. 193 с.
4. Поршневые кольца – условия работы, конструкция. URL: <https://mirmarine.net/dvs/osnovy-dvs/1057-porshnevye-koltsa>.
5. Клименко Л. П., Ревнюк П. Я., Прищепов О. Ф. та ін. Упрочнения деталей двигателей внутреннего сгорания методами ионно-плазменных и лазерных технологий. *Двигатели внутреннего сгорания. Технология производства ДВС*. 2014. № 2. С. 82 – 84.
6. Аулін В.В. Абразивна зносостійкість лазерно-модифікованих композиційних покриттів. *Збірник наукових праць КДТУ "Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузі машинобудуванні"*. 2003. Вип. 12. С. 219-223.
7. Аулін В.В. Створення композиційних дисперсно-зміцнених покриттів на деталях СГТ з використанням лазерного випромінювання. *Конструювання, виробництво та експлуатація с/г машин*. 2003. Вип. 33. С. 310-316.
8. Дворук В.І. Вплив низькотемпературної термомеханічної обробки (НТМО) на абразивну зносостійкість легованої сталі. *Проблеми трибології*. 2013. № 4. С. 46-52.
9. Дворук В.І., Белих С.С. Вплив високотемпературної термічної обробки на абразивну зносостійкість легованої сталі. *Problems of friction and wear*. 2013. №1 (60). С. 97-103.

10. Войтов В.А., Билык А.П., Сторожук В.В. Реологические исследования микроструктурных изменений защитного покрытия, которое образовано с помощью триботехнической восстановительной смеси твс "Комбат". *Проблеми трибології*. 2008. № 1 (47). С. 34-38.
11. Vojtov V.A., Tsymbal B.M. Study of Tribological Characteristics of Compatible Materials in Tribosystems of Extruders for Manufacturing Solid Fuel from Biomass. *Journal of Friction and Wear*. 2018. Vol. 39, № 6. P. 500–504.
12. Мощенок В.И., Нестеренко Е.А., Сагалович А.В. та ін. Определение триботехнических характеристик композитных ионно-плазменных покрытий для поршневых колец дизельных двигателей. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*. 2009. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-tribotekhnicheskikh-harakteristik-kompozitnyh-ionno-plazmennyyh-pokrytiy-dlya-porshnevyh-kolets-dizelnyh-dvigatelye>
13. Казаков С.С., Матвеев Ю.И. Лазерная закалка рабочих поверхностей поршневых компрессионных колец, изготовленных из высокопрочного чугуна. *Вестник НГИЭИ. Процессы и машины агроинженерных систем*. 2017. С. 25-31.
14. Матвеев Ю.И., Казаков С.С. Особенности лазерной обработки поршневых колец судовых среднеоборотных дизелей. *Вестник АГТУ. Серия: Морская техника и технология*. 2010. № 2. С. 34-38.
15. Матвеев Ю.И., Казаков С.С. Исследование износостойкости поршневых колец с лазерной обработкой на основании ускоренных испытаний. *Вестник АГТУ. Серия: Морская техника и технология*. 2011. №1. С. 41 – 44.
16. Глушкова Д.Б., Тарабанова В.П., Белый В.А. Исследование структуры и характера изменения твердости поверхности поршневых колец после газотермического напыления на разных стадиях производственного процесса. *Вестник ХНАДУ*. 2015. Вып. 69. С. 45 – 49.
17. Паустовский А.В., Ткаченко Ю.Г., Алфинцева Р.А., та ін. Разработка электродных материалов для электроискрового упрочнения и восстановления

изношенных поверхностей, структура и свойства покрытий. *Электронная обработка материалов*. 2011. С. 30 – 36.

18. Околович Г.А., Гурьев А.М., Шабалин В.Н. Технология нанесения износостойкого покрытия стальных поршневых колец. *Обработка металлов*. 2012. № 4 (57). С. 50-52.

19. Кравченко И.Н., Зубрилина Е.М., Чеха Т.А. та ін. Технология нанесения защитных покрытий на поршневые кольца дизельных двигателей. *Вестник ДГТУ*. 2016. № 3 (86). С. 59 - 64.

20. Береснев В.М. Влияние многокомпонентных и многослойных покрытий на процессы трения износа. *Физическая инженерия поверхности*. 2004. т.2, №4. С. 214-219.

21. Гранкин С.С., Несмченко У.С., Новиков В.Ю. та ін. Механические свойства наноструктурированных покрытий (Ti, Al)N и (Ti, Cr)N, полученные методом вакуумно-дугового осаждения. *ФІП ФІП PSE*. 2014. т.12, № 2. С. 308-315.

22. Skoblo T.S., Romaniuk S.P., Sidashenko A.I., et. al. Study Of Degradation Mechanism Of Metal-Cutting Tools And Their Hardening By ZrN PVD Coatings. *Problems Of Atomic Science And Technology. Series: Plasma Physics*. 2018. №6 (118). P. 300-303.

23. Karamiş M. B., Sertb H. The role of PVD TiN Coating in Wear Behaviour of Aluminium Extrusion Die. *Wear*. 1998. Vol. 217, Is. 1. P. 46-55.

24. Chun-ju W., Chuan-jie W., Bin G., De-bin S. Effects of Tribological Behavior of DLC Film on Micro-deep Drawing Processes. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2014. Vol. 24, Is. 9. P. 2877-2882.

25. Debajyoti B., Chattopadhyay A.K. Study on the Role of PVD TiN Coating in Improving the Performance of Electroplated Monolayer Superabrasive Wheel. *Surface and Coatings Technology*. 2010. 205(2). P. 658–667.

26. Patsalas P., Charitidis C.A., Logothetidis S. The Effect of Substrate Temperature and Biasing on the Mechanical Properties and Structure of Sputtered Titanium Nitride Thin Films. *Surface and Coatings Technology*. 2000. 125(1). P. 335-340.
27. Gangopadhyay S., Acharya R., Chattopadhyay A.K. Composition and Structure Property Relationship of Low Friction, Wear Resistant TiN–MoS_x Composite Coating Deposited by Pulsed Closed-field Unbalanced Magnetron Sputtering. *Surface and Coatings Technology*. 2009. 203(12). P. 1565-1572
28. Ghosh A., Chattopadhyay A.K. Performance Enhancement of Single-layer Miniature cBN Wheels Using CFUBMS-deposited TiN Coating. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2007. 47(12). P. 1799-1806.
29. Simmonds M.C., Savan A., Pflüger E., Swygenhoven H.V. Mechanical and Tribological Performance of MoS₂ Co-sputtered Composites. *Surface and Coatings Technology*. 2000. 126(1). P. 15-24.
30. Fuh-Sheng S., Cheng L.H, Sung Y.C., Huang J.H. Microstructure and Coating Properties of Ion-plated TiN on Type 304 Stainless Steel. *Thin Solid Films*. 1998. 334(1-2). P. 125-132.
31. Montesano L., Petrogalli C., Marcello A.P. Gelfi Corrosion and wear behavior of CAE deposited CrN-PVD coatings. *Key Engineering Materials*. 2014. Vol. 577-578. P. 641-644.
32. Mo J.L., Zhu M.H. Tribological Characterization of Chromium Nitride Coating Deposited by Filtered Cathodic Vacuum Arc. *Applied Surface Science*. 2009. 255(17). P. 7627-7634.
33. Zhang G., Yan P.X., Wang P., Chen Y.M. The Structure And Tribological Behaviors Of CrN And CrTiN Coatings. *Applied Surface Science*. 2007. 253(18). P. 7353-7359.
34. Feng W., Yan D., He J., Li X. Reactive Plasma Sprayed TiN Coating and Its Tribological Properties. *Wear*. 2005. 258(5-6). P. 806-811.

35. Odén M., Ericsson C., Håkansson G., Ljungcrantz H. Microstructure and Mechanical Behavior of Arc-evaporated Cr-N Coatings. *Surface and Coatings Technology*. 1999. 114(1). P. 39-51.
36. Uchida M., Nihira N., Mitsuo A., Toyoda K. Friction and Wear Properties of CrAlN and CrVN Films Deposited by Cathodic Arc ion Plating Method. *Surface and Coatings Technology*. 2004. Vol. 177-178. P. 627-630.
37. Kumakiri T. New and Promising Materials from Nitride Compounds. Chromium Nitride(CrN) Coating Superior to the Sliding Wear Resistance. *Journal of the Institute of Electrical Engineers of Japan*. 1999. 119(12). P. 756-759.
38. Su Y.-L., Yao S.H., Leu Z.L., Wei C.S. Comparison of Tribological Behavior of Three Films - TiN, TiCN and CrN - Grown by Physical Vapor Deposition. *Wear*. 1997. 213(1). P. 165-174.
39. Lee J.-W., Duh J.-G., Wang J.-H. Mechanical Property Evaluation of Cathodic Arc Plasma-Deposited CrN Thin Films on Fe-Mn-Al-C alloys. *Surface and Coatings Technology*. 2003. 168(2-3). P. 223-230.
40. Wang Q., Zhou F., Yan J. Evaluating Mechanical Properties and Crack Resistance of CrN, CrTiN, CrAlN and CrTiAlN Coatings by Nanoindentation and Scratch Tests. *Surface and Coatings Technology*. 2016. № 285. P. 203-213.
41. Datta S., Das M., Balla V.K., Bodhak S. Mechanical, Wear, Corrosion and Biological Properties of Arc Deposited Titanium Nitride Coatings. *Surface and Coatings Technology*. 2018. Vol. 344. P. 214-222.
42. Studies on the Effect of Arc Current Mode and Substrate Rotation Configuration on the Structure and Corrosion Behavior of PVD TiN Coatings. URL: <https://www.mdpi.com/2079-6412/7/4/50>.
43. Akbazadeh M., Shafyei A., Salimijazi H.R. Comparison of the CrN, TiN and (Ti, Cr)N PVD coatings deposited by cathodic arc evaporation. *Iranian Journal of Materials Science and Engineering*. 2015. 12(1). P. 43-53.

44. Growth Defects in PVD Hard Coatings. URL: https://www.researchgate.net/publication/248491548_Growth_defects_in_PVD_hard_coatings
45. Impact of Al and Cr Alloying in TiN-Based PVD Coatings on Cutting Performance During Machining of Hard to Cut Materials. URL: https://www.researchgate.net/publication/223911784_Impact_of_Al_and_Cr_alloying_in_TiN-based_PVD_coatings_on_cutting_performance_during_machining_of_hard_to_cut_materials
46. Barshilia H., Rajam K.S. Spectroscopy Studies on the Thermal Stability of TiN, CrN, TiAlN Coatings and Nanolayered TiN/CrN, TiAlN/CrN Multilayer Coatings. *Journal of Materials Research*. 2004. № 19. P. 3196.
47. Warcholinski B., Gilewicz A. Effect of Substrate Bias Voltage on the Properties of CrCN and CrN Coatings Deposited by Cathodic Arc Evaporation. *Vacuum*. 2013. 90(1). P.145–150.
48. Tlili B., Mustapha N., Nouveau C. et. al. Correlation Between Thermal Properties and Aluminum Fractions in CrAlN Layers Deposited by PVD Technique. *Vacuum*. 2010. Vol. 84, Is.9, № 19, P. 1067-1074.
49. Pengfei H., Bailing J. Study on Tribological Property of CrCN Coating Based on Magnetron Sputtering Plating Technique. *Vacuum*. 2011. 85(11). P. 994-998.
50. Polcar T., Cvrček L., Široký P., Novak R. Tribological Characteristics of CrCN Coatings at Elevated Temperature. *Wear*. 2005. 80(1). P. 113-116.
51. Gåhlin R., Bromark M., Hedenqvist P., Hogmark S. Properties of TiN and CrN Coatings Deposited at Low Temperature Using Reactive Arc-Evaporation. *Surface and Coatings Technology*. 1995. 76-77(1). P. 174-180.
52. Kalin M., Jerina J. The Effect of Temperature and Sliding Distance on Coated (CrN, TiAlN) and Uncoated Nitrided Hotwork Tool Steels Against an Aluminium Alloy. *Wear*. 2015. № 331. P. 371–379.

53. Perillo P. Properties of CrN Coating Prepared by Physical Vapour Deposition. *American Journal of Materials Science*. 2015. 3(2). P. 38–43.
54. Sivaraman V., Prakash S. Performance and evaluation of MoS₂ based machining using PVD-TiAlN coated tool. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2019. 33(9). P. 4383–4388.
55. Zuo J., Xie Y, Zhang J. et al. TiN coated stainless steel bracket: Tribological, corrosion resistance, biocompatibility and mechanical performance. *Surface and Coatings Technology*. 2015. 277. P. 227–233.
56. Huang J., Ouyang F., Yu G. Effect of Film Thickness and Ti Interlayer on the Structure and Properties of Nanocrystalline TiN Thin Films on AISI D2 Steel. *Surface and Coatings Technology*. 2007. 201(16). P. 7043–7053.
57. Olofsson J., Gerth J., Nyberg H. et al. On the Influence From Micro Topography of PVD Coatings on Friction Behaviour, Material Transfer and Tribofilm Formation. *Wear*. 2011. 271(10). P. 2046–2057.
58. Çaliskan H. Effect of test parameters on the micro-abrasion behavior of PVD CrN coatings. *Measurement*. 2014. 55. P. 444–451.
59. Hernández-Sierra M.T., Aguilera-Camacho L.D., [Ponce](#) A. et al. Tribological Performance of TiN and TiCN Coatings on a Working Tool Steel. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2018. 32(8). P. 3659–3666.
60. Kakas D., Škorić B., Mitrović S. et al., Influence of Load and Sliding Speed on Friction Coefficient of IBAD Deposited TiN. *Tribology in Industry*. 2009. 31(3–4). P. 3–10.
61. Grzesik W., Zalisz Z., Król S. Tribological Behaviour of TiAlN Coated Carbides in Dry Sliding Tests. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2006. 17(1–2). P. 181–184.
62. Debajyoti B., Kumar R., Jain A.K. On Tribological Behaviour and Application of TiN and MoS₂-Ti Composite Coating for Enhancing Performance of Monolayer cBN Grinding Wheel. *Wear*. 2010. 268(9-10). P. 1053–1065.

63. Торьяник И.Н., Береснев В.М., Сердюк И.В. Структура и физико-механические свойства нанокompозитных покрытий системы (Zr-Ti-Cr-Nb)N, полученных методом вакуумно-дугового испарения. *ВАИТ*. 2014. №1 (89). С. 88-91.
64. Mrkvica I., Neslušán M., Čep R., et. al. Properties and Comparison Of PVD Coatings. *Tehnički vjesnik*. 2016. Vol. 23. № 2. P. 569-574.
65. Dobrzański L.A., Śliwa A., Żukowska L.W., et. al. Structure and Mechanical Properties of PVD Coatings for Tool Materials. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2010. Vol. 42. № 1-2. P. 33-41.
66. Polok-Rubiniec M., Dobrzański L.A., Adamiak M. The properties and wear resistance of the CrN PVD coatings. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2008. Vol. 30, № 2. P. 165-171.
67. Santosh V. B., Hari N. K. Investigation of Tribological Behaviour of Nitrided and Coated AISI 4140 Steel. *Journal of Materials Science & Surface Engineering*. 2017. № 5(5). P.627-632.
68. Андреев А.А., Григорьев С.Н. Износостойкие вакуумно-дуговые покрытия на основе титана в инструментальном производстве. *СТИН (Станки Инструмент)*. 2006. № 2. С. 19-24.
69. Шулаев В.М., Андреев А.А. Сверхтвердые наноструктурные покрытия в ННЦ ХФТИ. *Физическая инженерия поверхности*. 2008. Т. 6, № 1-2. С. 4-19.
70. Андреев А.А., Шулаев В.М., Григорьев С.Н. Свойства, применение и особенности получения наноструктурных покрытий методами физического осаждения в вакууме. *Вестник машиностроения*. 2005. № 9. С. 38-42.
71. Береснев В.М., Погребняк А.Д., Азаренков Н.А., та ін. Нанокристаллические и нанокompозитные покрытия, структура, свойства. *Физическая инженерия поверхности*. 2007. т. 5, № 1-2. С. 4-27.
72. Шулаев В.М., Андреев А.А., Горбань В.Ф., та ін. Сопоставление характеристик вакуумно-дуговых наноструктурных TiN покрытий, осаждаемых

при подаче на подложку высоковольтных импульсов. Физическая инженерия поверхности. 2007. т. 5. № 1-2. С. 94-97.

73. Tshinjan A., Klaasen H., Kübarseppet J., et. al. Wear Performance of PVD Coated Tool Steels. *Estonian Journal of Engineering*. 2012. Vol.18. № 3. P. 202–210.

74. Трефилова Н.В. Деформационно-термическая обработка как метод подготовки алюминиевых сплавов к нанесению ионно-плазменных покрытий. *Вестник ТГУ*. 2013. т.18, Вып.4. С. 1891-1820.

75. Лойко В.А., Ивашко В.С., Клименко С.А., Антонюк В.С., Хейвец М.Л. Вакуумно-плазменные технологии в ремонтном производстве : монография. Минск : БГАТУ, 2007. 192 с.

76. Wu L. Guo X., Zhang J. Abrasive Resistant Coatings – A Review. *Lubricants*. 2014. Vol. 2. P.66-89.

77. Cadena N. L., Cue-Sampedro R., Silleret H. R., et. al. Study of PVD AlCrN Coating for Reducing Carbide Cutting Tool Deterioration in the Machining of Titanium Alloys. *Materials*. 2013. Vol. 6. P. 2143-2154.

78. Табаков В.П., Чихранов А.В. Определение механических характеристик износостойких ионно-плазменных покрытий на основе нитрида титана. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2010. т. 12, № 4. С. 292-297.

79. Тарасенко Ю.П., Кривина Л.А., Царева И.Н. та ін. Оптимизация технологии нанесения ионно-плазменного покрытия нитрида титана на малогабаритные тонкостенные детали. *Известия Самарского государственного аэрокосмического университета*. 2011. №3(27). С. 170-174.

80. Fuentes G.G., Rodriguez R., Avelar-Batistaet J.C. et. al. Recent Advances in the Chromium Nitride PVD Process for Forming and Machining Surface Protection. *Journal of Materials Processing Technology*. 2005. Vol. 167. P. 415-421.

81. Balasubramanyam N., Prasanthi G., Yugandhar M. Study of Coated TiN and TiC on Cutting Tools for the PVD and CVD Coated Tungsten Carbide by Sand Blasting

Pretreatment of Nickel and Carbon. *International Journal of Advanced Science and Technology*. 2015. Vol. 75. P.51-58.

82. Podgornik B., Hogmark S. Hard PVD coatings and their perspectives in forming tool applications. URL:

https://www5.kau.se/sites/default/files/Dokument/subpage/2010/02/74_1053_1066_pdf_20011.pdf.

83. Осколкова Т.Н. Твёрдый сплав на основе карбида вольфрама с ионно-плазменным TiZrN покрытием. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2010. т 12. № 1(2). С. 476-478.

84. Шпак А.П., Наконечная О.И., Куницкий Ю.А. та ін. Механические свойства покрытий на основе титана. Киев : ИМФ НАНУ, 2005. 84 с.

85. Андреев А.А., Шулаев В.М., Горбань В.Ф. та ін. Осаждение сверхтвердых вакуумно-дуговых TiN покрытий. *Физическая инженерия поверхности*. 2006. т. 4. № 3-4. С. 201-206.

86. Дудник С.Ф., Сагалович А.В., Сагалович В.В. та ін. Исследование характеристик трения и износа ионно-плазменных покрытий, полученных на алюминиевом сплаве. *Физическая инженерия поверхности*. 2004. т. 2. № 1-2. С. 110-114.

87. Латушкина С.Д., Жижченко А.Г., Гапанович О.И., та ін. Способы управления структурным состоянием защитных вакуумно-дуговых покрытий. *Наука и техника: Нанотехнологии и наноматериалы*. 2013. № 4. С. 28-31.

88. Васильев В.А., Лучанинов А.А., Решетняк Е.Н., та ін. Структура и твердость T-N и Ti-S-N покрытий, осажденных из фильтрованной вакуумно-дуговой плазмы. *Вопросы атомной науки и техники*. 2009. № 2. С. 173-180.

89. Mitterer C., Mayrhofer P.H., Musil J. Thermal Stability of PVD Hard Coatings. *Vacuum*. 2005. Vol. 71. P. 279-284.

90. Park L.W., Kang D.S., Moore J.J. et. al. Microstructures, Mechanical Properties, and Tribological Behaviors of Cr-Al-N, Cr-Si-N, and Cr-Al-Si-N coatings by a hybrid coating system. *Surf. and Coat. Tech.* 2007. Vol. 201. P. 5223-5227.
91. Сергеев В. П., Федорищева М.В., Воронов А.В., та ін. Трибомеханические свойства и структура нанокомпозитных покрытий $Ti_{1-x}Al_xN$. *Известия Томского политехнического университета*. 2006. т. 309, № 2. С. 149-152.
92. Левашов Е.А., Штанский Д.В. Многофункциональные наноструктурированные пленки. *Успехи химии*. 2007. т. 76, № 5. С. 502-509.
93. Шулаев В.М., Андреев А.А. Высокотвердые наноструктурные Mo-N покрытия. *Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета*. 2006. Вып. 33. С. 57-59.
94. Кунченко Ю.В., Кунченко В.В., Картмазов Г.Н. та ін. О формировании микро-нанослойных покрытий методом вакуумно-дугового осаждения. *Физическая инженерия поверхности*. 2004. т.2. № 1. С. 102-108.
95. Cova Caiazza F. Sisti V., Trasatti S. Multilayer coatings based on CrN/Cr for molds of plastics. *La Metallurgia Italiana*. 2014. №.6. P. 3-8.
96. Bondar O.V., Stolbovoy V.A., Kylyshkanov M.K., et. al. Dependence of mechanical and tribotechnical properties of multilayered TiN/ZrN coatings on deposition. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2015. R. 91. № 12. P. 233 – 236.
97. Pogrebnyak A.D. Bondar O.V., Erdybaeva N.K. et. al. Influence of thermal annealing and deposition conditions on structure and physical-mechanical properties of multilayered nanosized TiN/ZrN coatings. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2015. R. 91. № 12. P. 228 – 232.
98. Kiss A., Braic M. T., Balaceanu M., et. al. Multilayer coatings of TiNiNb shape memory alloys. *RevAdvMaterSci*. 2007. № 15. P. 259-263.
99. Strnad G. Latest developments in PVD coatings for tooling. *Scientific Bulletin of the "Petru Maior" University of Targu Mures*. 2010. Vol. 7, № 1. P. 32-37.

100. Thamocharan J., Sarala R. Characterization of CrN/TiN PVD Coatings on 316L Stainless Steel. *International Journal of ChemTech Research*. 2014. Vol. 6, № 6. P. 3284-3286.
101. Sang Yong L., Sang Yul L. Comparative evaluation of TiN/CrN, AlN/CrN, TiAlN/CrN multilayer films for the use of semi-solid processing of Cu alloys. *Solid State Phenomena*. 2006. Vols. 116-117. P. 124-127.
102. Bejarano G.G., Gomez B.M., Osorio A. J. et. al. Tribological Properties and Corrosion Resistance Enhancement of H13 Hot Work Steel by Means of CrN/TiN Multilayers. *Journal of Materials Science and Engineering*. 2010. Vol. 4. № 6. P. 51-59.
103. Ulrich S., Ziebert C., Stqber M. et. al. Correlation between constitution, properties and machining performance of TiN/ZrN multilayers. *Surface and Coatings Technology*. 2004. Vols. 188-189. P.331-337.
104. Berger M., Wiklund U., Eriksson M. et. al Multilayer Effect in Abrasion-optimising the Combination of Hard and Tough Phases. *Surf. Coat. Technol*. 1999. Vols.116-119. P. 1138-1144.
105. Gómez M.A., Romero J., Lousa A., et. al. Tribological Performance of Chromium/Chromium carbide Multilayers Deposited by r.f. Magnetron Sputtering. *Surf. Coat. Technol*. 2005. Vols. 200. P. 1819-1824.
106. Береснев В.М., Погребняк А.Д., Швец О.М. та ін. Формирование многослойных покрытий TiN/Mo вакуумно-дуговым методом с использованием ВЧ-разряда. *Вісник Харківського університету. Серія фізична «Ядра, частинки, поля»*. 2007. № 777. Вип. 2. № 34. С. 93-96.
107. Табаков В.П., Смирнов М.Ю., Циркин А.В. Разработка многослойных покрытий для условий прерывистого резания. *Резание и инструмент в технологических системах*. 2005. № 69. С. 301-310.
108. Ortega-Saenz J.A., Hernandez-Rodriguez M.A.L., Ventura-Sobrevilla V. et. al. Tribological and corrosion testing of surface engineered surgical grade CoCrMo alloy. *Wear*. 2011. Vol. 271. Is. 9-10. P. 2125-2131.

109. Zeng X.T., Zhang S., Sun C.Q. et. al. Nanometric layered CrN/TiN thin films: mechanical strength and thermal stability. *Thin Solid Films*. 2003. № 424. P. 99–102.
110. Harish C.B. Anjana J., Rajam K.S. Structure, Hardness and Thermal Stability of Nanolayered TiN/CrN Multilayer Coatings. *Vacuum*. 2004. Vol. 72. P. 241–248.
111. Лобова Т.А., Волхонский А.О., Блинков И.В. Инновационные технологии получения износостойких и трибоадаптируемых покрытий в индустрии наносистем. *Инноватика и экспертиза*. 2013. Вып. 1. № 10. С. 76-81.
112. Igartua A., Fdez-pérez X., Conte M., et. al. Tribological Tests to Simulate Wear on Piston Rings. Condition Monitoring and Diagnostics Engineering Management : Book of Papers of the 24th International Congress. 2011. URL: https://www.researchgate.net/publication/309726749_Tribological_tests_to_simulate_wear_on_piston_rings.
113. Rahman M., Haider J., Dowling D.P. Deposition of Magnetron Sputtered TiN + MoS_x Coating with Ti–TiN Graded Interlayer. *Surface and Coatings Technology*. 2005. 200(1). P. 1071-1075.
114. Chen Y.-H., Polonsky I.A., Chung Y.-W., Keer L.M. Tribological Properties and Rolling-contact-fatigue Lives of TiN/SiN_x Multilayer Coatings. *Surface and Coatings Technology*. 2002. 154(2-3). P. 152-161.
115. Ezazi M.A., Quazi M.M., Zalnezhad E. et. al. Enhancing the Tribo-mechanical Properties of Aerospace AL7075-T6 by Magnetron-Sputtered Ti/TiN, Cr/CrN & TiCr/TiCrN Thin Film Ceramic Coatings. *Ceramics International*. 2014. Vol. 40, Is. 10, Part A. P. 15603-15615.
116. Naghibi S.A., Raeissi K., Fathi M.H. Corrosion and Tribocorrosion Behavior of Ti/TiN PVD Coating on 316L Stainless Steel Substrate in Ringer’s Solution. *Materials Chemistry and Physics*. 2014. 148(3). P. 614–623.
117. Upadhyay R.K., Kumaraswamidhas L.A. Investigation of monolayer-multilayer PVD nitride coating. *Surface Engineering*. 2015. 31(2). P. 123–133.

118. Warcholinski B., Gilewicz A. Mechanical properties of multilayer TiAlN/CrN coatings deposited by cathodic arc evaporation. *Surface Engineering*. 2011. 27(7). P. 491–497.
119. Dobrzański L.A., [Lukaszkoicz](#) K., [Zarychta](#) A. et al., Corrosion Resistance of Multilayer Coatings Deposited by PVD Techniques onto the Brass Substrate. *Journal of Materials Processing Technology*. 2005. № 164. P. 816–821.
120. Ananthakumar R., Subramanian B. Electrochemical corrosion and materials properties of reactively sputtered TiN/TiAlN multilayer coatings. *Ceramics International*. 2012. Vol. 38. P. 477-485.
121. Merklein M. Wear Behavior of PVD-Coatings. *Tribology in Industry*. 2012. Vol. 34. № 2. P. 51-56.
122. Клименко С.А., Береснев В.М., Копейкина М.Ю. та ін. Слоистые вакуумно-дуговые покрытия Ti-NBN-Al₂O₃, Nb-NBN-Al₂O₃ на инструментах, оснащенных поликристаллическими сверхтвёрдыми материалами на основе кубического нитрида бора. *ФІП ФІІІ PSE*. 2007. т. 5. № 1-2. С. 57-61.
123. Surzhenkov A., Põdra P., Sergejev F., et. al. Comparative Study of the PVD Coatings on the Plasma Nitrided Steel. *Materials Science*. 2012. Vol. 18. № 1. P. 40-44.
124. Береснев В.М., Копейкина М.Ю., Клименко С.А. Многокомпонентные и многослойные вакуумнодуговые покрытия для режущего инструмента. *Вопросы атомной науки и техники. № 1. Серия: Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники*. 2008. Вып. 17. С. 152-158.
125. Polok-Rubiniac M., Dobrzański L.A., Adamiak M. Comparison of the Adhesion and Wear Resistance of the PVD Coatings. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2007. Vol. 20, № 1-2. P. 279-282.
126. Погребняк А.Д., Шпак А.П., Азаренков Н.А., та ін. Структура и свойства твердых и сверхтвёрдых нанокompозитных покрытий. *Успехи физических наук*. 2009. т. 179. № 1. С. 35-64.

127. Smolik J., Słomka Z., Paćkoet D., et. al. Cr-CrN and CrN-TiC Multilayer Coatings Manufactured by Means of Vacuum Arc Method. *Maintenance problems*. 2006. Vol. 4. P. 91-104.
128. Решетняк Е.Н., Стрельницкий В.Е. Синтез упрочняющих наноструктурных покрытий. *Вопросы атомной науки и техники № 2, Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение*. 2008. № 92. С. 119-130.
129. Tlili B., Nouveau C., Benlatrecheet Y., et. al. Hardness and scratch response of PVD multilayer coatings. *Conception et Modélisation des Systèmes Mécaniques : 3^{ième} Congrès International CMSM'2009*. Hammamet, 2009. P. 1-7.
130. Okumiya M., Griepentrog M. Mechanical Properties and Tribological Behavior of TiN–CrAlN and CrN–CrAlN Multilayer Coatings. *Surf. & Coat. Technol.* 1999. Vol. 112. P. 123-128.
131. Lanzoni E., Martini C., Poli G. Tribological Behaviour of ACD Ni-P/PVD Nitride/DLC Multilayered Coatings URL: http://www.oetg.at/fileadmin/Dokumente/oetg/Proceedings/WTC_2001_files/html/M-53-P54-465-LANZONI.pdf.
132. Maury F., Douard A., Delcloset S., et. al. Multilayer Chromium Based Coatings Grown by Atmospheric Pressure Direct Liquid Injection CVD. *Surface and Coatings Technology*. 2009. Vol. 204, № 6-7. P. 983-987.
133. Погребняк А.Д., Береснев В.М., Бондар О.В. Влияние толщины наноразмерного слоя на структуру и свойства многослойных покрытий TiN/MoN. *Письма в ЖТФ*. 2014. Т. 40. Вып. 5. С. 59-66.
134. Belov D.S., Volkhonsky A.O., Blinkovet I.V., et. al. Multilayer Nanostructured Wear-Resistant Coatings with Increased Thermal Stability, Adapted to Varying Friction Conditions. *Proceedings Of The International Conference Nanomaterials: Applications And Properties*. 2013. Vol. 2 № 2. P. 1-4.
135. Major Ł., Lackner J.M., Morgiel J. TEM Investigations of Wear Mechanisms of Single and Multilayer Coatings. URL: <http://cdn.intechopen.com/pdfs/34884.pdf>.

136. Pawlak W., Wendler B. Multilayer, Hybrid PVD Coatings on Ti6Al4V Titanium Alloy. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2009. Vol. 37. № 3. P. 660-667.
137. Schulze M., Seidlitz H., König F. et. al. Tribological Investigations of PVD Coated Multi-Layer Constructions. *Journal of Materials Science Research*. 2016. Vol. 5. № 1. P.97-106.
138. Saini D. P., Ali M. New Generation Coatings for High Speed Cutting Tools. *Manufacturing Excellence : Materials of ICME 9th International Conference*. 2003. P. 1-12.
139. Соболев О.В., Андреев А.А., Григорьев С.Н., и др. Закономерности структурообразования при вакуумно-дуговом осаждении многослойных наноструктурных TiN-MoN покрытий. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий: Прикладная физика и материаловедение*. 2011. № 6/5(54). С. 4-8.
140. Koshy R.A., Graham M.E., Marks L.D. Synthesis and Characterization of CrN/Mo₂N Multilayers and Phases of Molybdenum Nitride. *Surf. Coat. Tech.* 2007. № 202. С. 1123-1128.
141. Андреев А.А., О.В. Соболев, В.Ф. Горбань та ін. Исследование фазового состава, структуры и свойств многослойных вакуумно-дуговых нанокристаллических покрытий Ti-Mo-N. *ФИП*. 2010. т. 8, №1. С. 28-35.
142. Андреев А.А., Саблев Л.П., Шулаев В.М. та ін. Вакуумно-дуговые устройства и покрытия. Харьков : ННЦ ХФТИ, 2005. 240 с.
143. Гришкевич А.Д. Наноструктурированные покрытия как альтернатива гальваническому хромированию внутренних поверхностей. *Техн. механика*. 2013. № 3. С. 117-127.
144. Коротаев А.Д., Мошков В.Ю., Овчинников С.В. та ін. Наноструктурные и нанокомпозитные сверхтвердые покрытия. *Физическая мезомеханика*. 2005, т. 8. № 5. С. 103-116.

145. Tien Ch. K., Duh J.G., Lee J.W. Oxidation Behavior of Sputtered CrN/AlN Multilayer Coatings During Heat Treatment. *Surf. and Coat. Tech.* 2007. Vol. 201. P. 5138-5142.
146. Barshilia H.C., Rajam K.S. Structure and Properties of Reactive DC Magnetron Sputtered TiN/NbN Hard Superlattices. *Surf. and Coat. Tech.* 2004. Vol. 183. P. 174-183.
147. Погребняк А.Д., Дробышевская А.А., Береснев В.М., та ін. Микро- и нанокompозитные защитные покрытия TiAlN/Ni-Cr-Fe-SiB, их структура и свойства. *ЖТФ*. 2011. т. 81. Вып. 7. С. 124-131.
148. Погребняк А.Д., Даниленок М.М., Дробышевская А.А., та ін. Исследование структуры и физико-механических свойств нанокompозитных комбинированных покрытий на основе TiCrN/Ni-Cr-Fe-SiB. *Известия вузов. Физика*. 2009. т. 52. № 12. С. 61-68.
149. Азаренков Н.А., Соболев О.В., Погребняк А.Д. та ін. Инженерия вакуумно-плазменных покрытий. Харьков : ХНУ имени В.Н. Каразина, 2011. 344 с
150. Wang M.X., Zhang J.J., Yang J. et. al. Influence of Ar/N₂ Flow Ratio on Structure and Properties of Nanoscale ZrN/WN Multilayered Coatings. *Surf. and Coat. Tech.* 2007. Vol. 201. P. 5472-5476.
151. Расчет поршневого кольца. URL: <https://injazashita.com/raschet-porshnevogo-kolca.html>.
152. Скобло Т.С., Клочко О.Ю., Белкин Е.Л. Определение микротвердости структурных составляющих высокохромистых чугунов в результате математической обработки их изображений. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Проблеми надійності машин та засобів механізації с/г виробництва*. 2014. Вип. 151. С.183-189.
153. Скобло Т.С., Клочко О.Ю., Белкин Е.Л. Применение компьютерного анализа металлографических изображений при исследовании структуры высокохромистого чугуна. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2012. т. 78. № 6. С. 35–42.

154. Скобло Т.С., Ключко О.Ю., Белкин Е.Л. та ін. Оценка степени неоднородности карбидов гетерогенных сплавов методом оптико-математического анализа при помощи изменчивости условных цветов. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві*. 2016. Вип. 168. С. 174–186.
155. Скобло Т.С., Ключко О.Ю., Белкин Е.Л. Исследование структуры высокохромистого комплекснолегированного чугуна с применением методов математического анализа. *Сталь*. 2012. № 3. С.46–52.
156. Тришевский О.И., Скобло Т.С., Ключко О.Ю., та ін. Исследования микроструктур гетерогенных сплавов методом математического анализа при помощи сочетаний условных цветов и абсолютных значений лапласианов. *Промышленность в фокусе*. 2015. №7(31). С.52–56.
157. Скобло Т.С., Ключко О.Ю., Белкин Е.Л. Исследование структуры высоколегированных сплавов математическим методом. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2015. № 5. С. 31-37.
158. Скобло Т. С. Обоснование применения понятий уравнений гидродинамики Навье-Стокса для анализа металлографических изображений. URL: http://www.rusnauka.com/12_ENXXI_2011/Tecnic/8_85541.doc.htm
159. Скобло Т.С., Ключко О.Ю., Белкин Е.Л., А.И. Сидашенко. Исследование структуры высокохромистых чугунок. *Заводская лабораторія. Диагностика материалов*. 2017. Т.83. № 5. С. 27-38.
160. Скобло Т.С., Белкин Е.Л., Романюк С.П. Методика математической оценки анализа фазового состава стали. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві*. 2014. Вип. 146. С. 8–24.
161. Ключко О.Ю. Теоретичне та експериментальне моделювання і прогнозування структуроутворення та властивостей хромовмісних сплавів та покриттів : дис. д-ра технічних наук : 05.02.01. Харків, 2019. 404 с.

162. Аулін В.В., Лисенко С.В., Солових Є.К., Жулай О.Ю. Формування та швидкість нарощування шару міді на поверхнях тертя при електротрибохімічному процесі. *Проблеми трибології*. 2006. № 1. С. 164-172.
163. Чувствительность чугунов к концентрации напряжений. URL: <http://mash-xxl.info/info/544001>.
164. Концентрация напряжений. URL: <https://inzhener-info.ru/razdely/konstruirovanie/tsiklicheskaya-prochnost/kontsentratsiya-napryazhenij.html>
165. Эффекты второго порядка и принцип Сен-Венана в задаче кручения нелинейно-упругого стержня. URL: <http://www.sibran.ru/upload/iblock/e3c/e3c2e51ba6e64e0b53ef244424f84df6.pdf>.
166. Принцип Сен-Венана и гипотеза плоских сечений. URL: http://scask.ru/book_rbt.php?id=18.
167. Нарита К. Кристаллическая структура неметаллических включений в стали. Москва : Металлургия, 1969. 191 с.

ДОДАТКИ

Перелік опублікованих робіт за темою дисертації

У фахових виданнях

1. Скобло Т.С., Сидашенко А.И., Сатановский Е.А., Олейник А.К., Мальцев Т.В. Особенности изнашивания маслосъемных поршневых колец с покрытием олова при стендовых испытаниях на трение и износ. *Физико-химическая механика материалов*. 2017. № 4. С. 71-77. (Scopus)
2. Мальцев Т.В. Комплексная оценка остаточных напряжений в поршневых кольцах. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2017. № 10. С. 80-87.
3. Skoblo T.S., Sidashenko A.I., Garkusha I.E., Taran A.V., Muratov R.M., Maltsev T.V. Influence of Increased Sliding Speed on The Structure and Properties of Piston Rings with Ion-Plasma Coating. *Problems of Atomic Science and Technology. Series: Plasma Physics*. 2018. № 6 (118). P. 304-307. (Scopus)
4. Skoblo T.S., Sidashenko A.I., Maltsev T.V., Romanchenko V.N. Assessment of the Properties of Hardened by Nanocoating Oil Scraper Piston Rings by an Optic-Mathematical Method. *Problems of Tribology*. 2019. 92 (2). P. 20-24
5. Скобло Т.С., Сидашенко А.И., Гаркуша И.Е. Таран В.С., Муратов Р.М., Мальцев Т.В. Оптико-математический анализ моделирования структуризации упрочнённых поверхностей поршневых колец при эксплуатации. *Металлофизика и новейшие технологии*. 2019. Том 41, Вып. 3. С. 349-362. (Scopus)
6. Skoblo T.S., Sidashenko O.I., Garkusha I.E., Taran V.S., Muratov R.M., Satanovskiy E.A., Oleynik O.K., Maltsev T.V., Romanchenko V.M., Martynenko O.D. Structure and Properties of Piston Rings with Ion-Plasma Multilayer Nanohardening. *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології*. 2019. т. 17, № 4. P. 661–678. (Scopus)

У закордрних виданнях

7. Скобло Т.С., Сидашенко А.И., Мальцев Т.В., Таран А.В., Муратов Р.М. Ионно-плазменное упрочнение поршневых колец. *Сварочное производство*. 2019. № 9. С.46-53.

У інших виданнях

8. Мальцев Т.В. Методы повышения эксплуатационных свойств чугуновых поршневых колец и перспективы применения упрочняющих ионно-плазменных нанопокрывтий и тонких пленок. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві*. Харків, 2017. Вип. 183. С. 88-103.

9. Скобло Т.С., Мальцев Т.В., Таран А.В., Таран В.С., Муратов Р.М., Сатановський Є.А., Романченко В.М. Нова технологія зміцнення поршневих кілець багатошаровим наноструктурним покриттям. *Промисловість в фокусі*. 2020. № 8(91). С. 56-57.

Матеріали і тези конференцій

10. Maltsev T., Yemelyanova Ye.S. Complex improving performance of thin parts by using multilayer thin films and nanostructured coatings. *Young Researches in The Global World : Vistas and Challenges: Book of abstracts of II Forum for young Researches*. Kharkiv, 2016. P. 203-204

11. Скобло Т.С., Сидашенко А.И., Сатановський Е.А., Мальцев Т.В. Метод оценки напряженно-деформированного состояния поршневых колец упрочненных ионно-плазменным покрытием. *Фізичні та комп'ютерні технології : Матеріали 22-ї міжнародної науково-практичної конференції*. Харків, 2016. С. 241-244

12. Maltsev T. Quality control method of piston rings that hardened by film coatings. *Welding and Related Technologies : Abstracts of IX International Conference of Young Scientists*. Kyiv, 2017. P. 236.

13. Skoblo T.S., Romanyuk C.P., Maltsev T.V. Application of nanotechnology in mechanical engineering. *Системи розроблення та постановлення продукції на виробництво. Індустрія 4.0. Сучасний напрямок автоматизації та обміну даними у виробничих технологіях : Матеріали II Міжнародна науково-практична конференція*. Суми, 2017. P. 62.

14. Скобло Т.С., Романюк С.П., Мальцев Т.В. Использование оптико-математического метода для оценки структурной неоднородности деталей. *Энергосбережение и эффективность в технических системах* : Материалы IV Международной научно-технической конференция студентов, молодых ученых и специалистов. Тамбов (РФ), 2017. С. 429-430.

15. Skoblo T.S., Sidashenko A.I., Garkusha I.E. Taran A.V., Muratov R.M., Maltsev T.V. Influence of Increased Sliding Speed on the Structure and Properties of Piston Rings with Ion-Plasma Coating. *School on Plasma Physics and Controlled Fusion* : Book of Abstracts of International Conference. Kharkiv, 2018. P. 180.

16. Мальцев Т.В. Багатошарове іонно-плазмове нанозміцнення поршневих кілець. Молодь і сільськогосподарська техніка у XXI сторіччі : Матеріали XVII-го міжнародного форуму молоді. Харків, 2021. С. 136.

Патенти

17. Спосіб контролю якості поршневих кілець, зміцнених плівковими покриттями: пат 110145 Україна: МПК (2016.01), G01N27/00, G01N3/317. № u 2016 03524; заявл. 04.04.2016; опубл. 26.09.2016, Бюл. 18. 4 с.

18. Спосіб прогнозування довговічності ефективної товщини багатошарового зміцнюючого покриття поршневих кілець: пат. 117673 Україна: МПК (2017.01), F16J 9/00. № u 2016 11183; заявл. 07.11.2016; опубл. 10.07.2017, Бюл. 13. 4 с.

19. Спосіб підвищення експлуатаційної стійкості поршневих кілець, зміцнених багатошаровими нанопокриттями: пат. 120464 Україна: МПК (2017.01), C23C 4/10 (2016.01), G01N 3/56 (2006.01), B82Y 30/00. № u 2017 00018; заявл. 03.01.2017; опубл. 10.11.2017, Бюл. № 21. 4 с.

20. Спосіб прогнозування дифузії компонента основи поршневих кілець в іонно-плазмове покриття при різних параметрах тертя: пат. 130854 Україна: МПК (2018.01), G01N 3/56 (2006.01), G01N 13/00, F16J 9/00. № u 2018 07425; заявл. 02.07.2018; опубл. 26.12.2018, Бюл. № 24. 4 с.

Акт промислової апробації

ПОГОДЖЕНО:

Проректор з наукової роботи
ХНТУСГ імені Петра Василенка


 Мельник В.І.

ЗАТВЕРДЖЕНО:

Головний інженер
ДП «Завод імені В.О. Малишева»


 Литвин Б.Я.

АКТ

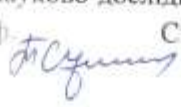
**промислової апробації технології зміцнення багат шаровим іонно-плазмовим
нанопокриттям TiN/CrN маслоз'ємного поршневого кільця**

На основі стендових випробувань, виконаних на базі ДП «Завод імені В.О. Малишева» встановлено, що поршневі кільця вихідного стану порівняно зі зміцненими багат шаровим нанопокриттям TiN/CrN забезпечують підвищення стійкості в умовах, які відповідають експлуатаційним, від 12 до 15,7 разів в залежності від швидкості ковзання. При цьому, схильність до пластичної деформації робочої поверхні зміцненого кільця знизилась в 4 рази.

Собівартість поршневого кільця з сірого чавуну для техніки спеціального призначення складає 179 грн. Додаткове зміцнення іонно-плазмовим покриттям складає 300 грн. Тому, загальна вартість зміцнених кілець складає 479 грн. Враховуючи зміну вартості кільця нового типу, економічний ефект від впровадження такої технології для одного двигуна складе 14 220 грн.

Виконавець

від ХНТУСГ імені Петра Василенка

Керівник науково-дослідної роботи
к.т.н., проф. Скобло Т.С.


Виконавець

від ДП «Завод імені В.О. Малишева»

Начальник ЦЗЛ
к.т.н., с.н.с.

 Є.А. Сатановський

Начальник

лабораторії ІМК


 Т.В. Мальцев

Нагороди





ДИПЛОМ

ПЕРШОГО СТУПЕНЯ

нагороджується

колектив авторів: Сатановський Є.А.,
Олійник О.К., Мальцев Т.В. та інш.

переможець Всеармійського конкурсу
“Кращий винахід року”
у номінації

“Бронетанкова техніка та озброєння”

Патент України № 110145

Начальник Центрального науково-дослідного інституту
озброєння та військової техніки Збройних Сил України

генерал-майор
“___” листопада 2019 року



Ігор ЧЕПКОВ



ДИПЛОМ

ДРУГОГО СТУПЕНЯ

нагороджується

колектив авторів: Сатановський Є.А.,
Олійник О.К., Мальцев Т.В. та інші.

переможець Всеармійського конкурсу
“Кращий винахід року”
у номінації

“Бронетанкова техніка та озброєння”

Патент України № 130854

Начальник Центрального науково-дослідного інституту
озброєння та військової техніки Збройних Сил України

генерал-майор
“___” листопада 2019 року



Ігор ЧЕПІКОВ

Патенти







УКРАЇНА



ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 120464

СПОСІБ ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ СТІЙКОСТІ
ПОРШНЕВИХ КІЛЕЦЬ, ЗМІЦНЕНИХ БАГАТОШАРОВИМИ
НАНОПОКРИТТЯМИ

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі 10.11.2017.

Заступник міністра економічного розвитку і торгівлі України

М.І. Тігарчук





УКРАЇНА



ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 130854

СПОСІБ ПРОГНОЗУВАННЯ ДИФУЗІЇ КОМПОНЕНТА
ОСНОВИ ПОРШНЕВИХ КІЛЕЦЬ В ІОННО-ПЛАЗМОВЕ
ПОКРИТТЯ ПРИ РІЗНИХ ПАРАМЕТРАХ ТЕРТЯ

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі **26.12.2018.**

Заступник міністра економічного розвитку і торгівлі України

Ю.П. Бровченко



Результати оцінки структуроутворення та зносостійкості поршневих кілець після випробувань на тертя та зношування

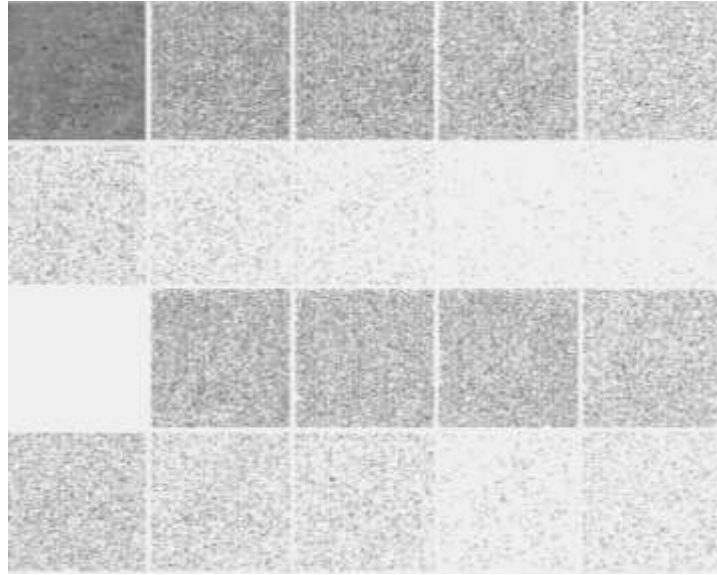


Рис. 1 – Фотографія похилої (прилеглої до робочої) поверхні серійного поршневого кільця (1,3 м/с)

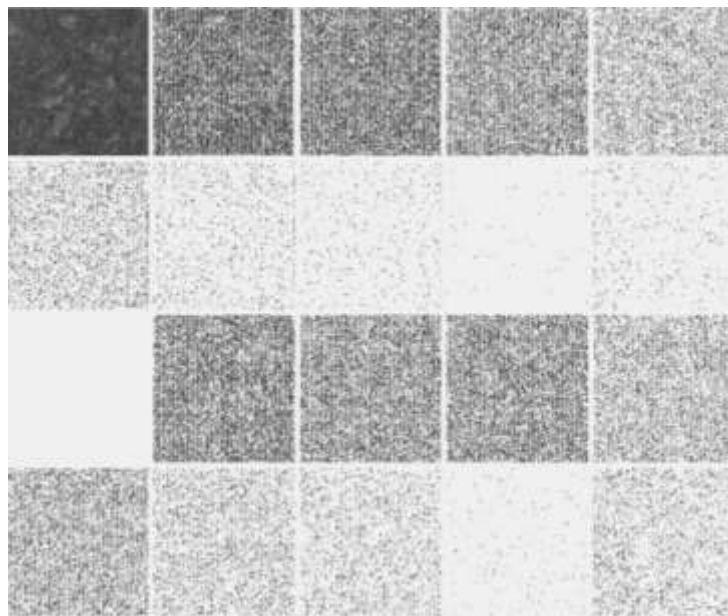


Рис. 2 – Фотографія похилої (прилеглої до робочої) поверхні поршневого кільця з покриттям TiN/CrN (1,3 м/с)

Таблиця 1 – Розрахунок гістограм абсолютних величин нейтральності похилої поверхні і зони тертя поршневих кілець

Зона тертя		Похила поверхня, прилегла до зони тертя	
Серійне поршневе кільце	Кільце з покриттям TiN/CrN	Серійне поршневе кільце	Кільце з покриттям TiN/CrN
15.1	15.2	12.7	13.1
18.5	16.5	14.5	16.2
14.2	13.4	11.7	12.7
14.0	13.0	11.7	12.8
09.3	08.7	09.2	09.0
07.9	08.1	09.0	08.3
06.4	06.4	06.8	06.8
04.9	05.1	06.1	05.7
03.3	03.8	04.7	04.4
02.1	02.7	03.7	03.1
01.4	02.1	02.7	02.5
00.9	01.6	02.2	01.7
00.8	01.1	01.5	01.3
00.5	00.9	01.3	01.0
00.3	00.6	00.8	00.6
00.2	00.5	00.6	00.4
00.1	00.3	00.4	00.3
00.0	00.1	00.2	00.1
00.0	00.0	00.0	00.0

Таблиця 2 – Відносна зміна абсолютних величин нейтральності згідно гістограм різних зон поршневих кілець

Серійне поршневе кільце	Кільце з покриттям TiN/CrN	Критерій порівняння
Похила поверхня	Похила поверхня	00.027
Зона тертя	Зона тертя	00.000

Таблиця 3 – Значення періодів і, відповідних їм функціоналів, на фотографії вихідної поверхні серійного кільця

По стовпцям		По рядкам	
період	функціонал	період	функціонал
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
2	0466	2	0883
3	0461	3	0866
154	0456	123	0855
5	0448	4	0813
114	0438	5	0807
59	0433	120	0791
17	0432	139	0779
53	0432	104	0771
158	0430	167	0765
21	0429	173	0764

Таблиця 4 – Значення періодів і, відповідних їм функціоналів, на фотографії вихідної поверхні зміцненого кільця

По стовпцям		По рядкам	
період	функціонал	період	функціонал
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
3	0559	2	0805
172	0514	3	0805
2	0502	127	0763
173	0500	200	0749
176	0497	89	0739
4	0489	157	0738
127	0486	5	0733
132	0483	4	0730
16	0481	18	0717
59	0478	65	0717

Таблиця 5 – Значення періодів і, відповідних їм функціоналів, на фотографії поверхні тертя серійного кільця

По стовпцям		По рядкам	
період	функціонал	період	функціонал
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
2	0540	3	0848
3	0526	2	0837
176	0508	4	0795
170	0499	152	0752
131	0491	93	0733
166	0474	5	0731
75	0471	95	0725
130	0468	136	0725
12	0467	164	0721
4	0465	33	0718

Таблиця 6 – Значення періодів і, відповідних їм функціоналів, на фотографії поверхні тертя зміцненого кільця

По стовпцям		По рядкам	
період	функціонал	період	функціонал
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
3	0380	3	0877
193	0375	2	0831
5	0373	159	0767
94	0365	7	0764
47	0364	6	0760
2	0362	5	0742
177	0362	138	0740
125	0359	4	0728
185	0359	134	0722
178	0355	9	0718

Таблиця 7 – Значення періодів і, відповідних їм функціоналів на загальній фотографії серійного кільця після експлуатації

По стовпцям		По рядкам	
період	функціонал	період	функціонал
3	1311	2	0969
2	1256	159	0922
5	1152	3	0921
4	1138	5	0881
139	1131	4	0853
89	1122	105	0846
7	1108	6	0832
156	1097	128	0824
13	1093	7	0823
114	1087	115	0820

Таблиця 8 – Значення періодів і, відповідних їм функціоналів на загальній фотографії зміцненого кільця після експлуатації

По стовпцям		По рядкам	
період	функціонал	період	функціонал
3	1323	3	0973
2	1232	2	0932
4	1177	188	0896
5	1172	4	0867
175	1172	119	0857
182	1166	22	0849
103	1155	87	0848
7	1110	111	0840
116	1109	180	0839
114	1107	135	0835

Таблиця 9 – Показники середньої нейтральності серійних кілець, випробуваних при швидкості ковзання 1,3 м/с та 1,0 м/с

Дослідна поверхня	Лапласіан основний	Лапласіан під кутом 90°	3-й лапласіан	4-й лапласіан	Дивергенція
Швидкість ковзання 1,3 м/с					
Вихідна	0,705	0,775	0,616	0,563	0,787
Зона тертя	0,772	0,823	0,715	0,672	0,710
Швидкість ковзання 1 м/с					
Вихідна	0,712	0,797	0,638	0,582	0,787
Зона тертя	0,755	0,805	0,711	0,671	0,700

Таблиця 10 – Різниця показників середньої нейтральності між поверхнями серійних кілець, випробуваних при швидкостях ковзання 1,3 м/с та 1,0 м/с (див. Додаток Б, Таблиця 9)

Дослідна поверхня	Лапласіан основний	Лапласіан під кутом 90°	3-й лапласіан	4-й лапласіан	Дивергенція
Швидкість ковзання 1,3 м/с					
Вихідна	0,067	0,048	0,099	0,109	0,077
Зона тертя					
Швидкість ковзання 1 м/с					
Вихідна	0,043	0,008	0,073	0,089	0,087
Зона тертя					

Таблиця 11 – Середня нейтральність зміцненого кільця, випробуваного при швидкості тертя 1,3 м/с

Дослідна поверхня	Лапласіан основний	Лапласіан під кутом 90°	3-й лапласіан	4-й лапласіан	Дивергенція
Вихідна	0,742	0,817	0,665	0,611	0,753
Зона тертя	0,744	0,813	0,676	0,629	0,755

Таблиця 12 – Різниця показників середньої нейтральності між поверхнями зміцненого кільця, випробуваного при швидкості тертя 1,3 м/с (Додаток Б, таблиця 11)

Дослідна поверхня	Лапласіан основний	Лапласіан під кутом 90°	3-й лапласіан	4-й лапласіан	Дивергенція
Вихідна	0,002	0,004	0,011	0,018	0,002
Зона тертя					

Таблиця 13 – Середня локальна однорідність серійних кілець, випробуваних при швидкостях ковзання 1,3 м/с та 1,0 м/с

Дослідна поверхня	По рядкам	По стовпцям
Швидкість ковзання 1,3 м/с		
Вихідна	0,981	0,942
Зона тертя	0,985	0,970
Швидкість ковзання 1 м/с		
Вихідна	0,979	0,932
Зона тертя	0,980	0,955

Таблиця 14 – Різниця по середній локальній однорідності вихідної поверхні і зони тертя серійних кілець, випробуваних при швидкостях ковзання 1,3 м/с та 1 м/с (див. Додаток Б, таблиця 13)

Дослідна поверхня	По рядкам	По стовпцям
Швидкість ковзання 1,3 м/с		
Вихідна	0,004	0,028
Зона тертя		
Швидкість ковзання 1 м/с		
Вихідна	0,001	0,023
Зона тертя		

Таблиця 15 – Середня локальна однорідність зміцненого кільця, випробуваного при швидкості 1,3 м/с

Дослідна поверхня	По рядкам	По стовпцям
Вихідна	0,977	0,939
Зона тертя	0,980	0,914

Таблиця 16 – Різниця по середній локальній однорідності зміцненого кільця, випробуваного при швидкості 1,3 м/с (див. Додаток Б, таблиця 15)

Дослідна поверхня	По рядкам	По стовпцям
Вихідна	0,003	0,025
Зона тертя		

Таблиця 17 – Середні функції показників серійних поршневих кілець, випробуваних при швидкостях 1,0 та 1,3 м/с

Дослідна поверхня	Колір	Середньоквадратичне відхилення	Узагальнений градієнт	Загальний лапласіан	3-й лапласіан	4-й лапласіан	Дивергенція
Швидкість ковзання 1,3 м/с							
Вихідна	7,9	1,4	1,4	4,1	6,9	13,0	2,3
Зона тертя	5,3	0,7	0,7	2,2	3,8	7,2	1,2
Швидкість ковзання 1 м/с							
Вихідна	7,5	1,5	1,4	4,3	7,4	14,1	2,4
Зона тертя	4,2	0,7	0,7	2,2	3,9	7,5	1,2

Таблиця 18 – Різниця середніх функцій вихідної поверхні і зони тертя показників серійних поршневих кілець, випробуваних при швидкостях ковзання 1,0 та 1,3 м/с

Дослідна поверхня	Колір	Середньоквадратичне відхилення	Узагальнений градієнт	Загальний лапласіан	3-й лапласіан	4-й лапласіан	Дивергенція
Швидкість ковзання 1,3 м/с							
Вихідна	2,6	0,7	0,7	1,9	3,1	5,8	1,1
Зона тертя							
Швидкість ковзання 1 м/с							
Вихідна	3,3	0,8	0,7	2,1	3,5	6,6	1,2
Зона тертя							

Таблиця 19 – Середні функції показників зміцненого поршневого кільця, випробуваного при швидкості ковзання 1,3 м/с

Дослідна поверхня	Колір	Середньоквадратичне відхилення	Узагальнений градієнт	Загальний лапласіан	3-й лапласіан	4-й лапласіан	Дивергенція
Вихідна	4,8	1,0	1,0	2,9	5,1	9,6	1,6
Зона тертя	5,1	1,2	1,1	3,4	6,0	11,4	1,9

Таблиця 20 – Різниця середніх функцій показників вихідної поверхні і зони тертя зміцненого поршневого кільця, випробуваного при швидкості ковзання 1,3 м/с

Дослідна поверхня	Колір	Середньоквадратичне відхилення	Узагальнений градієнт	Загальний лапласіан	3-й лапласіан	4-й лапласіан	Дивергенція
Вихідна Зона тертя	0,3	0,2	0,1	0,5	0,9	1,8	0,3

Таблиця 21 – Середні функції, значення яких більше 255 для серійних кілець (швидкість ковзання 1,0 та 1,3 м/с)

Дослідна поверхня	Дивергенція	Лапласіан основний	3-й лапласіан	4-й лапласіан
Швидкість ковзання 1,3 м/с				
Вихідна	15,3	16,6	18,8	24,2
Зона тертя	15,8	20,5	20,6	20,0
Швидкість ковзання 1 м/с				
Вихідна	16,0	18,4	19,9	25,5
Зона тертя	16,3	18,5	20,3	20,8

Таблиця 22 – Середні функції, значення яких більше 255 для зміцненого кільця (швидкість ковзання 1,3 м/с)

Дослідна поверхня	Дивергенція	Лапласіан основний	3-й лапласіан	4-й лапласіан
Вихідна	15,8	17,8	18,7	21,9
Зона тертя	15,9	18,9	20,7	24,6

Таблиця 23 – Середні відношення до кольору серійних кілець (швидкість ковзання 1,0 та 1,3 м/с)

Дослідна поверхня	Узагальнений градієнт	Лапласіан основний	3-й лапласіан	4-й лапласіан	Дивергенція
Швидкість ковзання 1,3 м/с					
Вихідна	0,2	0,5	0,8	1,6	0,3
Зона тертя	0,1	0,4	0,7	1,3	0,2
Швидкість ковзання 1 м/с					
Вихідна	0,2	0,6	1,0	1,9	0,3
Зона тертя	0,1	0,5	0,8	1,6	0,3

Таблиця 24 – Середні відношення до кольору зміцненого кільця (швидкість ковзання 1,3 м/с)

Дослідна поверхня	Узагальнений градієнт	Лапласіан основний	3-й лапласіан	4-й лапласіан	Дивергенція
Вихідна	0,2	0,5	0,9	1,8	0,3
Зона тертя	0,2	0,6	1,1	2,1	0,3

Таблиця 25 – Поєднання кольорів в зонах тертя зміцнених і серійних варіантів серійних і зміцнених кілець при різних швидкостях ковзання (Додаток Б, рис. 3 – 5)

1-й номер кольору в поєднанні з 4-х кольорів	2-й номер кольору в поєднанні з 4-х кольорів	3-й номер кольору в поєднанні з 4-х кольорів	4-й номер кольору в поєднанні з 4-х кольорів	Процентний вміст поєднання	Середня кількість пікселів 1-го кольору	Середня кількість пікселів 2-го кольору	Середня кількість пікселів 3-го кольору	Середня кількість пікселів 4-го кольору	№ рисунка (Додаток Б)	№ рядка і стовпця рисунку
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
05	06	00	00	40.9	1.808	2.192	0.000	0.000	Рис. 5	1-й рядок 2-й стовбець
06	07	00	00	50.0	2.156	1.844	0.000	0.000	Рис. 3	1-й рядок 3-й стовбець

продовження таблиці 25

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>
06	00	00	00	15.9	4.000	0.000	0.000	0.000	Рис. 3	1-й рядок 4-й стовбець
05	00	00	00	18.9	4.000	0.000	0.000	0.000	Рис. 4	1-й рядок 5-й стовбець
04	05	00	00	35.2	1.667	2.333	0.000	0.000	Рис. 4	2-й рядок 1-й стовбець
07	00	00	00	05.1	4.000	0.000	0.000	0.000	Рис. 3	2-й рядок 2-й стовбець
05	07	00	00	01.5	2.015	1.985	0.000	0.000	Рис. 5	2-й рядок 3-й стовбець
0,3	04	00	00	01.5	1.948	2.052	0.000	0.000	Рис. 5	2-й рядок 4-й стовбець
07	08	00	00	04.5	2.479	1.521	0.000	0.000	Рис. 3	2-й рядок 5-й стовбець
04	00	00	00	01.6	4.000	0.000	0.000	0.000	Рис. 4	3-й рядок 1-й стовбець
06	08	00	00	01.4	2.191	1.809	0.000	0.000	Рис. 3	3-й рядок 2-й стовбець
04	06	00	00	01.2	1.945	2.055	0.000	0.000	Рис. 4	3-й рядок 3-й стовбець
02	03	00	00	01.1	1.989	2.011	0.000	0.000	Рис. 5	3-й рядок 4-й стовбець
08	09	00	00	01.0	2.130	1.870	0.000	0.000	Рис. 5	3-й рядок 5-й стовбець
05	06	07	08	00.9	1.000	1.000	1.000	1.000	Рис. 3	4-й рядок 1-й стовбець
04	05	06	07	00.6	1.000	1.000	1.000	1.000	Рис. 4	4-й рядок 2-й стовбець
07	09	00	00	00.4	2.200	1.800	0.000	0.000	Рис. 5	4-й рядок 3-й стовбець
06	07	08	09	00.4	1.000	1.000	1.000	1.000	Рис. 5	4-й рядок 4-й стовбець
07	09	00	00	00.2	2.322	1.678	0.000	0.000	Рис. 3	4-й рядок 5-й стовбець

Таблиця 26 – Поєднання кольорів вихідних поверхонь зміцнених і серійних варіантів кілець при різних швидкостях ковзання (Додаток Б, рис. 6 – 8)

1-й номер кольору в поєднанні з 4-х кольорів	2-й номер кольору в поєднанні з 4-х кольорів	3-й номер кольору в поєднанні з 4-х кольорів	4-й номер кольору в поєднанні з 4-х кольорів	Процентний вміст поєднання	Середня кількість пікселів 1-го кольору	Середня кількість пікселів 2-го кольору	Середня кількість пікселів 3-го кольору	Середня кількість пікселів 4-го кольору	№ рисунка (Додаток Б)	№ рядка і стовпця рисунку
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
05	06	00	00	37.7	2.112	1.888	0.000	0.000	Рис. 8	1-й рядок 2-й стовбець
08	09	00	00	19.8	1.733	2.267	0.000	0.000	Рис. 6	1-й рядок 3-й стовбець
07	08	00	00	24.7	1.847	2.153	0.000	0.000	Рис. 7	1-й рядок 4-й стовбець
09	10	00	00	23.5	2.185	1.815	0.000	0.000	Рис. 6	1-й рядок 5-й стовбець
06	07	00	00	13.4	2.220	1.780	0.000	0.000	Рис. 8	2-й рядок 1-й стовбець
04	05	00	00	16.0	1.514	2.486	0.000	0.000	Рис. 8	2-й рядок 2-й стовбець
05	00	00	00	12.3	4.000	0.000	0.000	0.000	Рис. 8	2-й рядок 3-й стовбець
09	00	00	00	07.4	4.000	0.000	0.000	0.000	Рис. 6	2-й рядок 4-й стовбець
08	00	00	00	07.0	4.000	0.000	0.000	0.000	Рис. 7	2-й рядок 5-й стовбець
10	11	00	00	05.0	2.243	1.757	0.000	0.000	Рис. 6	3-й рядок 1-й стовбець
06	00	00	00	05.4	4.000	0.000	0.000	0.000	Рис. 8	3-й рядок 2-й стовбець
08	10	00	00	02.7	1.934	2.066	0.000	0.000	Рис. 6	3-й рядок 3-й стовбець
07	00	00	00	02.6	4.000	0.000	0.000	0.000	Рис. 7	3-й рядок 4-й стовбець

продовження таблиці 26

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>
07	09	00	00	01.8	1.814	2.186	0.000	0.000	Рис. 6	3-й рядок 5-й стовбець
07	08	09	10	01.9	1.000	1.000	1.000	1.000	Рис. 6	4-й рядок 1-й стовбець
08	09	10	11	02.0	1.000	1.000	1.000	1.000	Рис. 6	4-й рядок 2-й стовбець
09	11	00	00	01.8	2.260	1.740	0.000	0.000	Рис. 6	4-й рядок 3-й стовбець
06	08	00	00	01.1	2.298	1.702	0.000	0.000	Рис. 8	4-й рядок 4-й стовбець
06	07	08	09	01.3	1.000	1.000	1.000	1.000	Рис. 6	4-й рядок 5-й стовбець

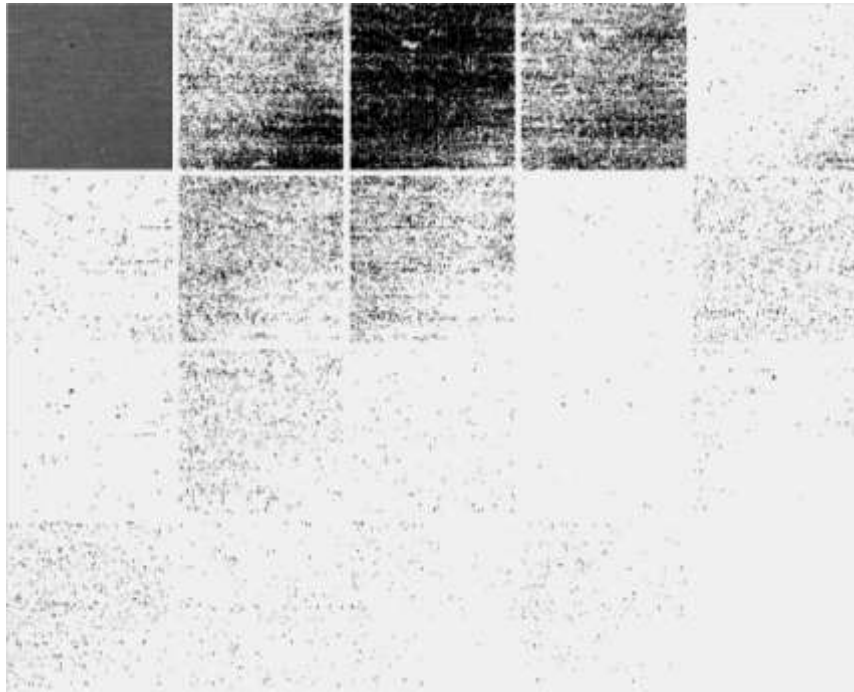


Рис. 3 – Зона тертя серійного кільця, випробуваного при швидкості ковзання 1,3 м/с (Додаток Б, таблиця 25)

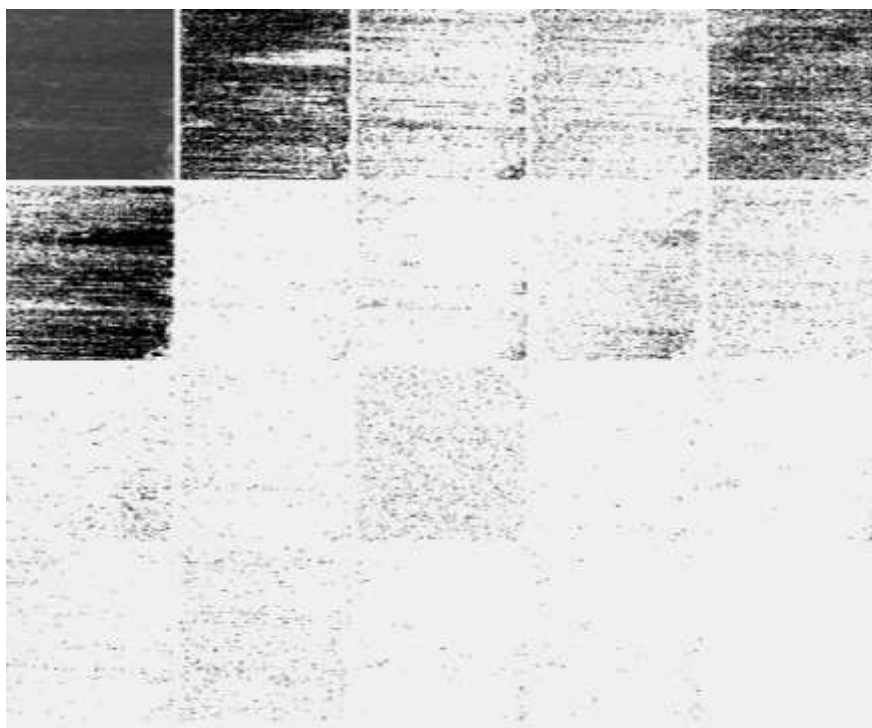


Рис. 4 – Зона тертя серійного кільця, випробуваного при швидкості ковзання 1 м/с
(Додаток Б, таблиця 25)

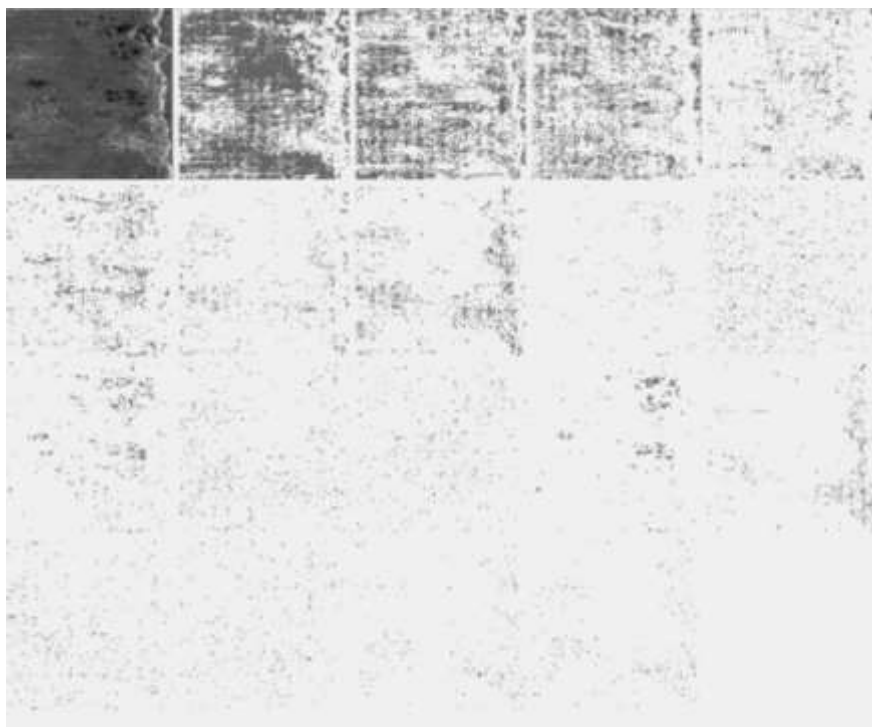


Рис. 5 – Зона тертя зміцненого кільця, випробуваного при швидкості ковзання 1,3 м/с (Додаток Б, таблиця 25)

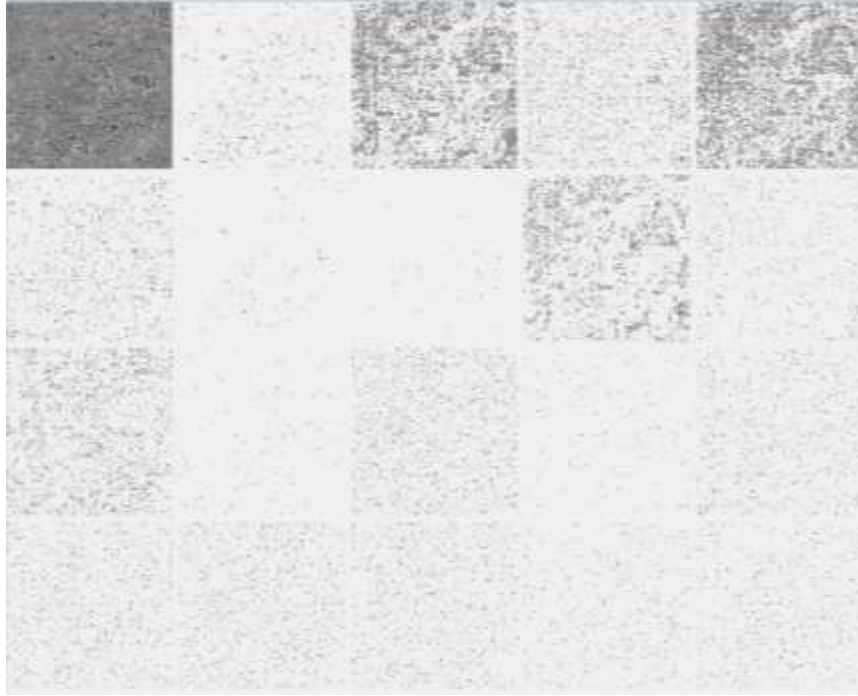


Рис. 6 – Вихідна поверхня серійного кільця, випробуваного при швидкості ковзання 1,3 м/с (Додаток Б, таблиця 26)

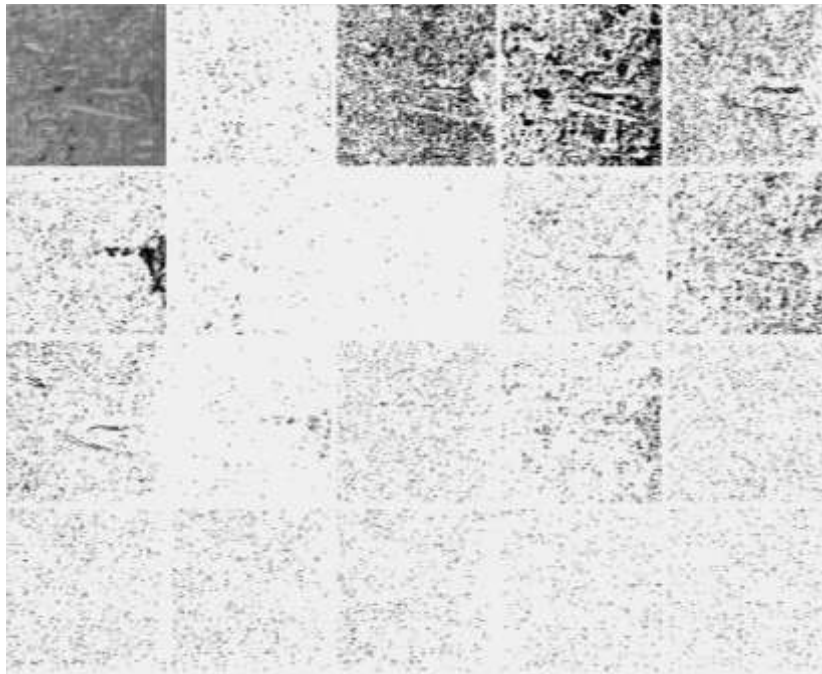


Рис. 7 – Вихідна поверхня серійного кільця, випробуваного при швидкості ковзання 1 м/с (Додаток Б, таблиця 26)

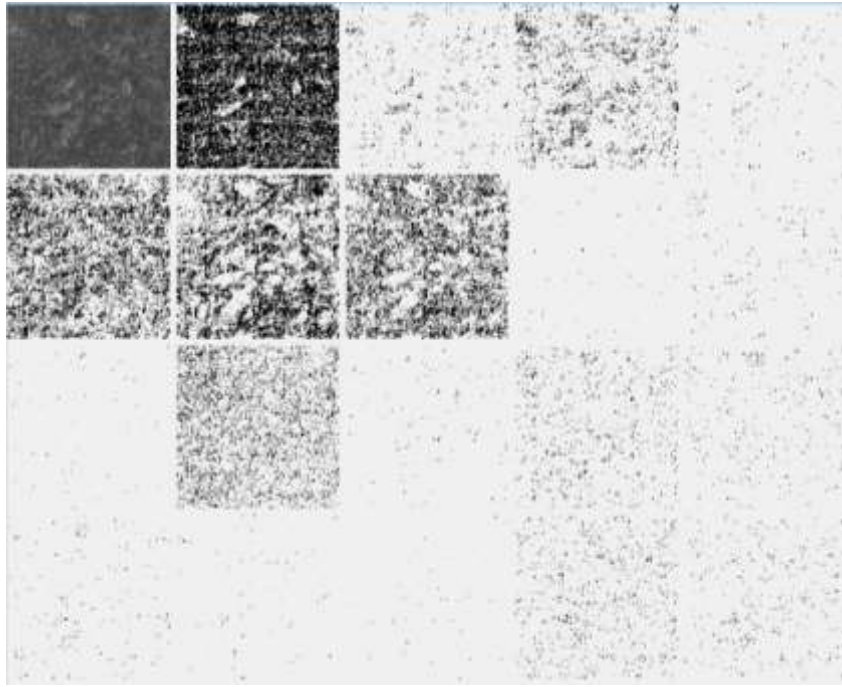

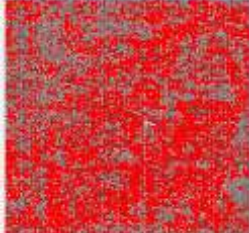

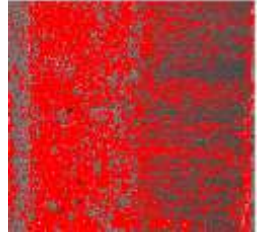


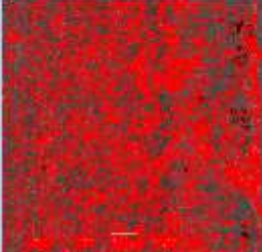
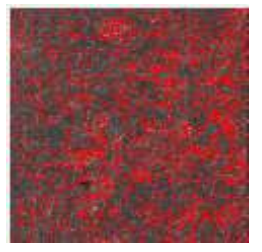
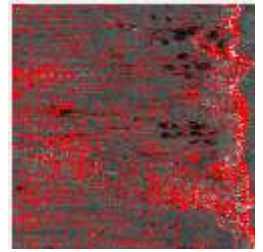


Рис. 8 – Вихідна поверхня зміцненого кільця, випробуваного при швидкості ковзання 1,3 м/с (Додаток Б, таблиця 26)

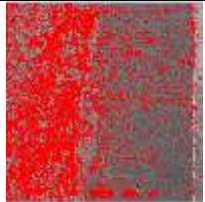

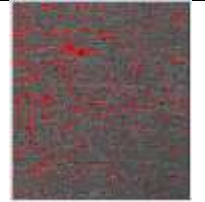



Таблиця 27 – Структурні зміни поверхонь кілець в умовах різних швидкостей ковзання при потужності більше 12 %

Загальний вигляд кільця		Вихідна поверхня		Зона тертя	
фото	Відсоток дислокацій, %	фото	Відсоток дислокацій, %	фото	Відсоток дислокацій, %
1	2	3	4	5	6
Серійне кільце (швидкість 1,3 м/с)					
	9.132		15.345		4.485

продовження таблиці 27

1	2	3	4	5	6
Серійне кільце (швидкість 1 м/с)					
	8.194		13.244		3.988
Змінене кільце (швидкість 1,3 м/с)					
	6.405		5.251		6.343

Таблиця 28 – Структурні зміни відповідних поверхонь при різних швидкостях ковзання і потужності дисипації більше 20 %

Загальний вигляд кільця		Вихідна поверхня		Зона тертя	
фото	Відсоток дислокацій, %	фото	Відсоток дислокацій, %	фото	Відсоток дислокацій, %
1	2	3	4	5	6
Серійне кільце (швидкість 1,3 м/с)					
	4.854		9.065		1.589
Серійне кільце (швидкість 1 м/с)					
	4.433		7.791		1.458

продовження таблиці 28

1	2	3	4	5	6
Зміцнене кільце (швидкість 1,3 м/с)					
	3.130		2.215		2.914

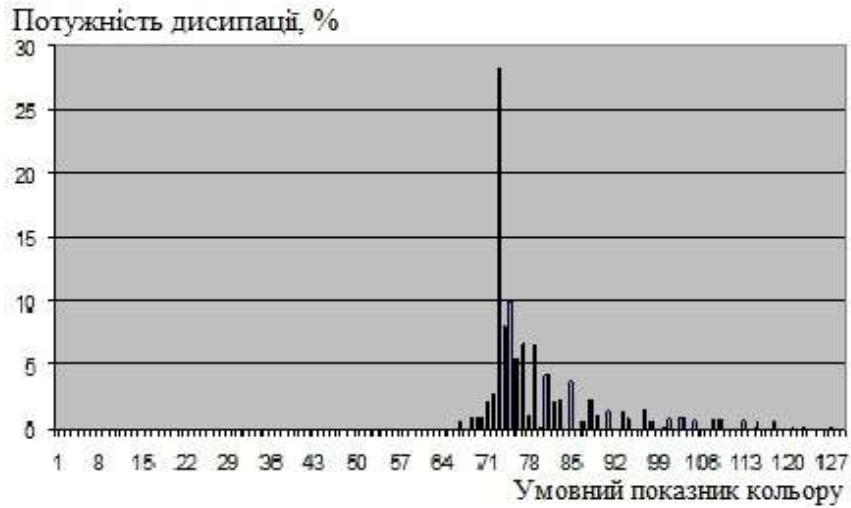


Рис. 9 – Розподіл потужностей дисипації вихідної поверхні серійних кілець, які в подальшому випробовувалися при швидкості ковзання 1,3 м/с

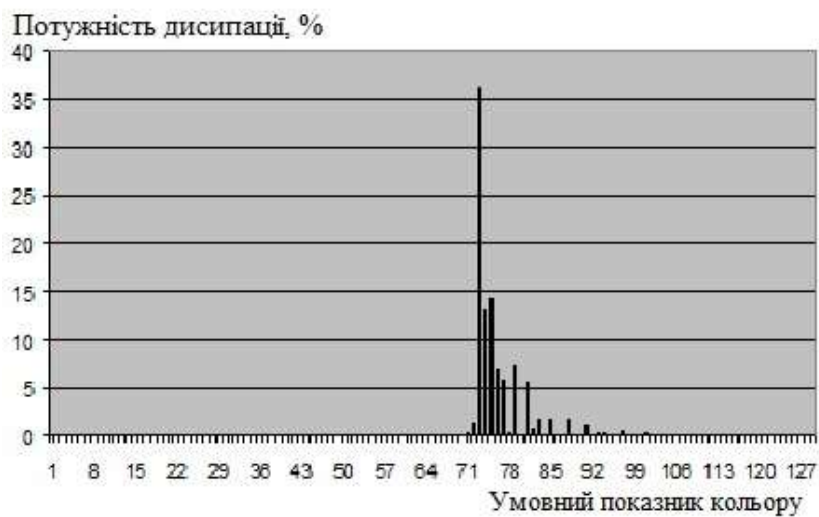


Рис. 10 – Розподіл потужностей поверхні тертя серійного кільця, випробуваного при швидкості ковзання 1,3 м/с



Рис. 11 – Розподіл потужностей дисипації на вихідній поверхні серійних кілець, які в подальшому випробовувалися при швидкості ковзання 1 м/с

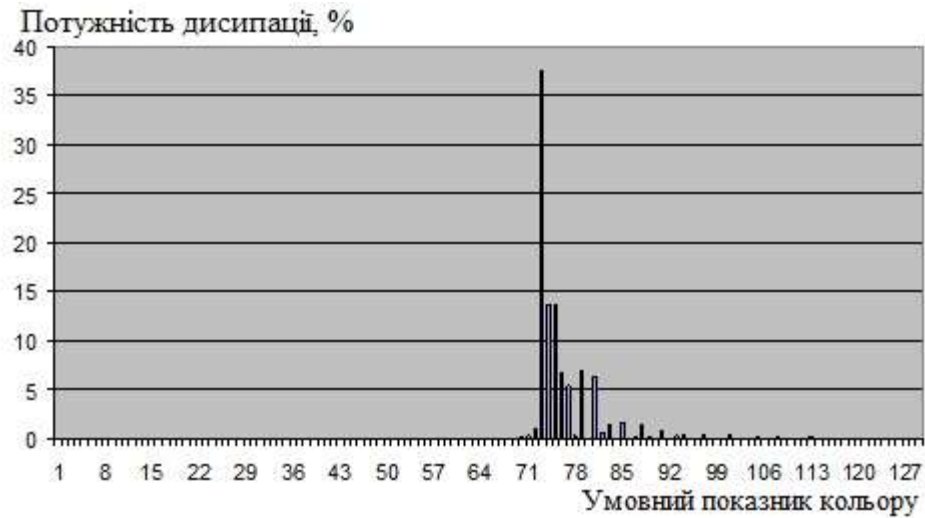


Рис. 12 – Розподіл потужностей дисипації поверхні тертя серійних кілець, випробуваних при швидкості ковзання 1 м/с

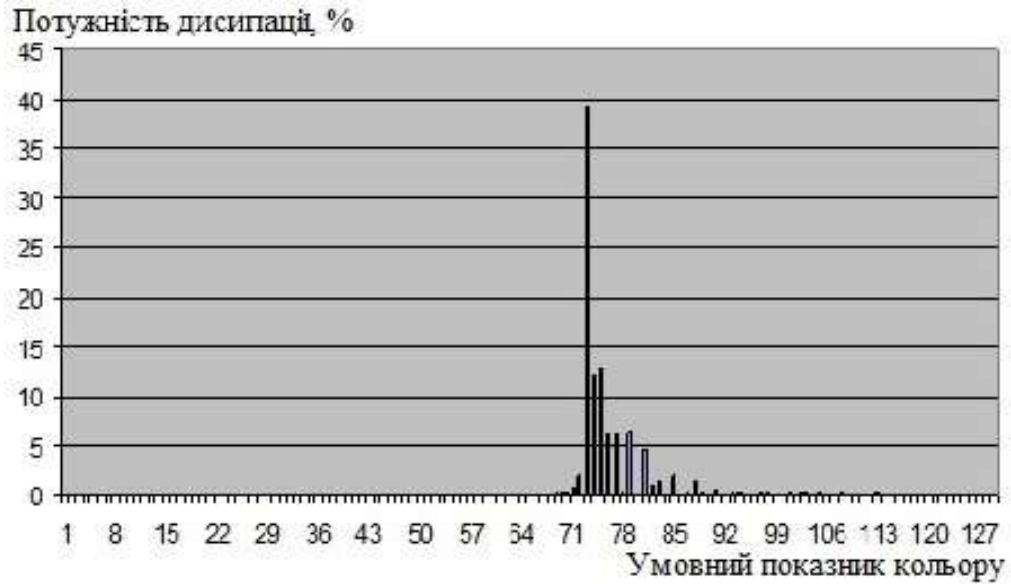


Рис. 13 – Розподіл потужностей дисипації вихідної поверхні зміцнених кілець, які в подальшому випробовувалися при швидкості ковзання 1,3 м/с

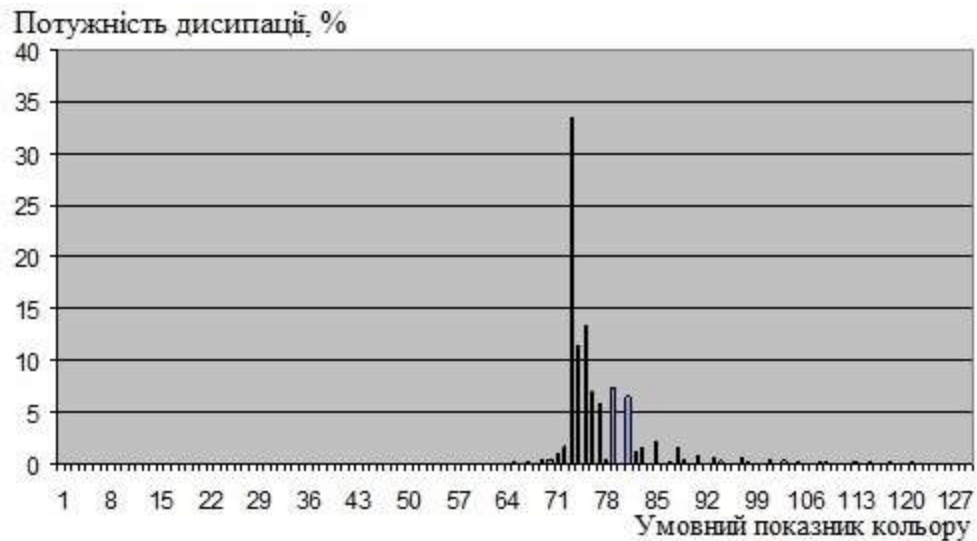


Рис. 14 – Розподіл потужностей дисипації зони тертя зміцнених кілець, випробуваних при швидкості ковзання 1,3 м/с

Таблиця 29 – Порівняння гістограм потужностей дисипації поршневих кілець за критерієм Колмогорова

Порівнюваний варіант кільця 1	Порівнюваний варіант кільця 2	Критерій порівняння
Серійне кільце; швидкість ковзання 1,3 м/с; (загальний знімок)	Серійне кільце; швидкість ковзання 1 м/с; (загальний знімок)	0,237
Серійне кільце; швидкість ковзання 1,3 м/с; (загальний знімок)	Зміцнене кільце; швидкість ковзання 1,3 м/с; (загальний знімок)	0
Серійне кільце; швидкість ковзання 1 м/с; (загальний знімок)	Зміцнене кільце; швидкість ковзання 1,3 м/с; (загальний знімок)	0,014
Серійне кільце; швидкість ковзання 1,3 м/с; (вихідна поверхня)	Серійне кільце; швидкість ковзання 1 м/с; (вихідна поверхня)	0,53
Серійне кільце; швидкість ковзання 1,3 м/с; (вихідна поверхня)	Зміцнене кільце; швидкість ковзання 1,3 м/с; (вихідна поверхня)	0
Серійне кільце; швидкість ковзання 1 м/с; (вихідна поверхня)	Зміцнене кільце; швидкість ковзання 1,3 м/с; (вихідна поверхня)	0
Серійне кільце; швидкість ковзання 1,3 м/с; (зона тертя)	Зміцнене кільце; швидкість ковзання 1,3 м/с; (зона тертя)	0
Серійне кільце; швидкість ковзання 1,3 м/с; (зона тертя)	Серійне кільце; швидкість ковзання 1 м/с; (зона тертя)	0,546
Серійне кільце; швидкість ковзання 1 м/с; (зона тертя)	Зміцнене кільце; швидкість ковзання 1,3 м/с; (зона тертя)	0,011
Серійне кільце; швидкість ковзання 1,3 м/с; (вихідна поверхня)	Серійне кільце; швидкість ковзання 1,3 м/с; (зона тертя)	0
Серійне кільце; швидкість ковзання 1 м/с; (вихідна поверхня)	Серійне кільце; швидкість ковзання 1 м/с; (зона тертя)	0
Зміцнене кільце; швидкість ковзання 1,3 м/с; (вихідна поверхня)	Зміцнене кільце; швидкість ковзання 1,3 м/с; (зона тертя)	0,905

Таблиця 30 – Кількість точок сполучень кольорів, які оцінюються відповідно до гістограмами Бозе на вихідній поверхні серійного кільця, випробуваного при швидкості ковзання 1,3 м/с

4 точки різних кольорів, %	2 точки одного кольору і 2 точки – різних, %	2 точки одного кольору і 2 точки – іншого, %	3 точки одного кольору і 1 точка – іншого, %	4 точки одного кольору, %
00.0	00.0	00.0	00.0	00.0
00.0	00.0	00.0	00.0	00.0
00.0	00.0	00.0	00.0	00.0
00.2	00.3	00.1	00.1	00.0
00.5	01.2	00.3	00.4	00.1
01.0	02.6	00.8	01.0	00.2
01.5	04.4	01.2	01.6	00.2
01.9	07.4	03.4	04.4	00.7
01.9	09.1	05.6	10.5	04.5
01.8	07.5	03.9	05.5	01.1
01.3	03.8	01.1	01.3	00.2
00.8	01.6	00.3	00.4	00.0
00.4	00.7	00.1	00.1	00.0
00.2	00.3	00.1	00.1	00.0
00.0	00.0	00.0	00.0	00.0
00.0	00.0	00.0	00.0	00.0
00.0	00.0	00.0	00.0	00.0
Сумарне поєднання кольорів, %				
11.5	39.0	17.0	25.5	07.0

Таблиця 31 – Кількість точок оцінюваних відповідно до поєднань кольорів гістограм Бозе (зона тертя серійного кільця, випробуваного при швидкості ковзання 1,3 м/с)

4 точки різних кольорів, %	2 точки одного кольору і 2 точки – різних, %	2 точки одного кольору і 2 точки – іншого, %	3 точки одного кольору і 1 точка – іншого, %	4 точки одного кольору, %
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
00.0	00.0	00.0	00.0	00.0

Таблиця 35 – Кількість точок, оцінених відповідно до поєднань кольорів гістограм Бозе (зона тертя зміцненого кільця, випробуваного при швидкості ковзання 1,3 м/с)

4 точки різних кольорів, %	2 точки одного кольору і 2 точки – різних, %	2 точки одного кольору і 2 точки – іншого, %	3 точки одного кольору і 1 точка – іншого, %	4 точки одного кольору, %
00.0	00.1	00.0	00.1	00.0
00.1	00.3	00.2	00.4	00.3
00.2	00.7	00.5	00.7	00.2
00.3	01.7	01.0	01.2	00.3
00.5	04.2	07.6	09.2	02.5
00.6	05.4	09.6	16.6	10.0
00.6	04.4	03.7	04.5	01.2
00.6	02.1	01.0	01.0	00.2
00.4	01.1	00.4	00.4	00.1
00.3	00.7	00.2	00.2	00.0
00.2	00.4	00.1	00.1	00.0
00.2	00.3	00.1	00.1	00.0
00.1	00.2	00.0	00.0	00.0
00.1	00.1	00.0	00.0	00.0
00.1	00.1	00.0	00.0	00.0
00.0	00.1	00.0	00.0	00.0
00.0	00.0	00.0	00.0	00.0
Сумарне поєднання кольорів, %				
04.3	21.8	24.5	34.6	14.7

Таблиця 36 – Розрахунок гістограм Бозе з урахуванням кольору точок лапласіанів вихідної поверхні серійного кільця, випробуваного при швидкості ковзання 1,3 м/с

2 точки одного кольору і 2 точки різних кольорів, %	2 точки одного кольору і 2 точки іншого, %	3 точки одного кольору і 1 точка іншого, %	4 точки одного кольору, %
1	2	3	4
10.5	15.0	15.4	02.5
08.4	01.8	02.5	00.2

продовження таблиці 36

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
10.5	15.0	15.6	02.7
Сума лапласіанів, %			
29.4	31.8	33.5	05.4

Таблиця 37 – Розрахунок гістограм Бозе з урахуванням кольору точок лапласіанів зони тертя серійного кільця, випробуваного при швидкості ковзання 1,3 м/с

2 точки одного кольору і 2 точки різних кольорів, %	2 точки одного кольору і 2 точки іншого, %	3 точки одного кольору і 1 точка іншого, %	4 точки одного кольору, %
11.6	15.9	11.8	01.2
09.6	02.9	03.9	01.0
12.0	16.3	12.5	01.3
Сума лапласіанів, %			
33.2	35.1	28.2	03.5

Таблиця 38 – Розрахунок гістограм Бозе з урахуванням кольору точок лапласіанів вихідної поверхні серійного кільця, випробуваного при швидкості ковзання 1 м/с

2 точки одного кольору і 2 точки різних кольорів, %	2 точки одного кольору і 2 точки іншого, %	3 точки одного кольору і 1 точка іншого, %	4 точки одного кольору, %
10.6	15.0	15.1	02.3
08.4	02.0	02.7	00.2
10.6	15.0	15.4	02.5
Сума лапласіанів, %			
29.6	32.0	33.2	05.0

Таблиця 39 – Розрахунок гістограм Бозе з урахуванням кольору точок лапласіанів зони тертя серійного кільця, випробуваного при швидкості ковзання 1 м/с

2 точки одного кольору і 2 точки різних кольорів, %	2 точки одного кольору і 2 точки іншого, %	3 точки одного кольору і 1 точка іншого, %	4 точки одного кольору, %
12.2	15.7	11.7	01.1
10.0	02.9	04.6	01.3
12.0	15.7	11.6	01.1
Сума лапласіанів, %			
34.2	34.3	27.9	03.5

Таблиця 40 – Розрахунок гістограм Бозе з урахуванням кольору точок лапласіанів вихідної поверхні зміцненого кільця, випробуваного при швидкості ковзання 1,3 м/с

2 точки одного кольору і 2 точки різних кольорів, %	2 точки одного кольору і 2 точки іншого, %	3 точки одного кольору і 1 точка іншого, %	4 точки одного кольору, %
12.6	13.9	12.4	01.7
10.6	02.7	03.7	00.6
13.0	14.3	13.2	01.4
Сума лапласіанів, %			
36.2	30.9	29.3	03.7

Таблиця 41 – Розрахунок гістограм Бозе з урахуванням кольору точок лапласіанів зони тертя зміцненого кільця, випробуваного при швидкості ковзання 1,3 м/с

2 точки одного кольору і 2 точки різних кольорів, %	2 точки одного кольору і 2 точки іншого, %	3 точки одного кольору і 1 точка іншого, %	4 точки одного кольору, %
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
11.2	15.9	13.5	01.7
08.9	02.6	03.8	01.0
10.8	15.6	13.1	01.8

продовження таблиці 41

1	2	3	4
Сума лапласіанів, %			
30.9	34.1	30.4	04.5

Таблиця 42 – Розрахунок гістограм Бозе з урахуванням кольору точок дивергенції вихідної поверхні серійного кільця, випробуваного при швидкості ковзання 1,3 м/с

2 точки одного кольору і 2 точки різних кольорів, %	2 точки одного кольору і 2 точки іншого, %	3 точки одного кольору і 1 точка іншого, %	4 точки одного кольору, %
12.2	10.0	13.7	03.6
10.6	04.2	05.5	00.8
12.1	09.9	13.7	03.8
Сума дивергенції, %			
34.9	24.1	32.9	08.2

Таблиця 43 – Розрахунок гістограм Бозе з урахуванням кольору точок дивергенції зони тертя серійного кільця, випробуваного при швидкості ковзання 1,3 м/с

2 точки одного кольору і 2 точки різних кольорів, %	2 точки одного кольору і 2 точки іншого, %	3 точки одного кольору і 1 точка іншого, %	4 точки одного кольору, %
14.7	10.5	08.3	00.8
13.6	06.2	08.0	03.5
14.9	10.6	08.3	00.8
Сума дивергенції, %			
43.2	27.3	24.6	05.1

Таблиця 44 – Розрахунок гістограм Бозе з урахуванням кольору точок дивергенції вихідної поверхні серійного кільця, випробуваного при швидкості ковзання 1 м/с

2 точки одного кольору і 2 точки різних кольорів, %	2 точки одного кольору і 2 точки іншого, %	3 точки одного кольору і 1 точка іншого, %	4 точки одного кольору, %
12.5	09.8	12.8	03.4
10.9	04.6	05.9	01.1
12.5	09.8	12.9	03.6
Сума дивергенції, %			
35.9	24.2	31.6	08.1

Таблиця 45 – Розрахунок гістограм Бозе з урахуванням кольору точок дивергенції зони тертя серійного кільця, випробуваного при швидкості ковзання 1 м/с

2 точки одного кольору і 2 точки різних кольорів, %	2 точки одного кольору і 2 точки іншого, %	3 точки одного кольору і 1 точка іншого, %	4 точки одного кольору, %
14.7	10.2	08.1	00.9
13.6	05.9	08.6	04.5
14.6	10.2	08.0	00.8
Сума дивергенції, %			
42.9	26.3	24.7	6.2

Таблиця 46 – Розрахунок гістограм Бозе з урахуванням кольору точок дивергенції вихідної поверхні зміцненого кільця, випробуваного при швидкості ковзання 1,3 м/с

2 точки одного кольору і 2 точки різних кольорів, %	2 точки одного кольору і 2 точки іншого, %	3 точки одного кольору і 1 точка іншого, %	4 точки одного кольору, %
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
13.9	08.6	10.0	02.1
12.9	06.1	08.0	02.5

продовження таблиці 46

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
14.1	09.1	10.7	01.9
Сума дивергенції, %			
40.9	23.8	28.7	06.5

Таблиця 47 – Розрахунок гістограм Бозе з урахуванням кольору точок дивергенції зони тертя зміцненого кільця, випробуваного при швидкості ковзання 1,3 м/с

2 точки одного кольору і 2 точки різних кольорів, %	2 точки одного кольору і 2 точки іншого, %	3 точки одного кольору і 1 точка іншого, %	4 точки одного кольору, %
11.2	15.9	13.5	01.7
08.9	02.6	03.8	01.1
10.8	15.6	13.1	01.8
Сума дивергенції, %			
30.9	34.1	30.4	04.6

Таблиця 48 – Розрахунок гістограм Бозе по оцінці ступеня неоднорідності поворотів і мінливості кольорів відносно початкової поверхні серійного кільця, випробуваного при швидкості ковзання 1,3 м/с

2 точки одного кольору і 2 точки різних кольорів, %	2 точки одного кольору і 2 точки іншого, %	3 точки одного кольору і 1 точка іншого, %	4 точки одного кольору, %
02.8	11.8	31.0	22.7
02.0	11.3	13.8	01.1
01.7	00.5	01.2	00.0
Сума показників, %			
06.5	23.6	46.0	23.8

Таблиця 49– Розрахунок гістограм Бозе по оцінці ступеня неоднорідності поворотів і мінливості кольорів щодо зони тертя серійного кільця, випробуваного при швидкості ковзання 1,3 м/с

2 точки одного кольору і 2 точки різних кольорів, %	2 точки одного кольору і 2 точки іншого, %	3 точки одного кольору і 1 точка іншого, %	4 точки одного кольору, %
00.8	14.5	29.3	18.5
00.6	14.5	17.2	03.9
00.5	00.1	00.3	00.0
Сума показників, %			
01.9	29.1	46.8	22.4

Таблиця 50 – Розрахунок гістограм Бозе по оцінці ступеня неоднорідності поворотів і мінливості кольорів відносно початкової поверхні серійного кільця, випробуваного при швидкості ковзання 1 м/с

2 точки одного кольору і 2 точки різних кольорів, %	2 точки одного кольору і 2 точки іншого, %	3 точки одного кольору і 1 точка іншого, %	4 точки одного кольору, %
02.5	12.2	30.8	21.9
01.8	11.8	14.3	01.5
01.6	00.5	01.1	00.0
Сума показників, %			
05.9	24.5	46.2	23.4

Таблиця 51 – Розрахунок гістограм Бозе по оцінці ступеня неоднорідності поворотів і мінливості кольорів відносно зони тертя серійного кільця, випробуваного при швидкості ковзання 1 м/с

2 точки одного кольору і 2 точки різних кольорів, %	2 точки одного кольору і 2 точки іншого, %	3 точки одного кольору і 1 точка іншого, %	4 точки одного кольору, %
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
00.8	14.3	28.7	17.9
00.6	14.3	17.6	04.9
00.5	00.1	00.3	00.0

продовження таблиці 51

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
Сума показників, %			
01.9	28.7	46.6	22.8

Таблиця 52 – Розрахунок гістограм Бозе по оцінці ступеня неоднорідності поворотів і мінливості кольорів відносно початкової поверхні зміцненого кільця, випробуваного при швидкості ковзання 1,3 м/с

2 точки одного кольору і 2 точки різних кольорів, %	2 точки одного кольору і 2 точки іншого, %	3 точки одного кольору і 1 точка іншого, %	4 точки одного кольору, %
01.6	15.1	29.6	15.8
01.2	14.9	17.1	03.0
01.0	00.2	00.5	00.0
Сума показників, %			
03.8	30.2	47.2	18.8

Таблиця 53 – Розрахунок гістограм Бозе по оцінці ступеня неоднорідності поворотів і мінливості кольорів відносно зони тертя зміцненого кільця, випробуваного при швидкості ковзання 1,3 м/с

2 точки одного кольору і 2 точки різних кольорів, %	2 точки одного кольору і 2 точки іншого, %	3 точки одного кольору і 1 точка іншого, %	4 точки одного кольору, %
01.5	13.0	29.1	21.0
01.2	12.7	15.9	03.6
01.0	00.3	00.6	00.0
Сума показників, %			
03.7	26.0	45.7	24.6

ДОДАТОК В

Результати розрахунків гістограм Бозе з урахуванням М-трийок

Таблиця 1 – Розрахунок гістограм Бозе і особливих М-трийок (%) в різних зонах серійного кільця, випробуваного при швидкості ковзання 1,3 м/с

Поєднання кольорів	Частка гістограм Бозе на загальній фотографії	Частка особливих М-трийок на загальній фотографії	Частка гістограм Бозе вихідної поверхні	Частка особливих М-трийок вихідної поверхні	Частка гістограм Бозе зони тертя	Частка особливих М-трийок зони тертя
5 точок різних кольорів	01.849	00.077	04.014	00.163	00.206	00.013
2 точки одного кольору, 3 точки різних кольорів	11.754	00.000	22.148	00.000	03.747	00.000
2 точки одного кольору, 2 іншого, 1 третього	15.723	00.407	20.968	00.561	11.884	00.288
3 точки одного кольору, 1 іншого, 1 третього	17.346	01.831	20.723	01.763	14.891	01.958
3 точки одного кольору, 2 іншого	23.659	00.000	15.543	00.000	30.083	00.000
4 точки одного кольору, 1 точка іншого	22.340	00.000	13.458	00.000	28.751	00.000
5 точок одного кольору	07.328	07.328	03.143	03.143	10.235	10.235

Таблиця 2 – Розрахунок гістограм Бозе і особливих М-трийок (%) в різних зонах серійного кільця, випробуваного при швидкості ковзання 1 м/с

Поєднання кольорів	Частка гістограми Бозе на загальній фотографії	Частка особливих М-трийок на загальній фотографії	Частка гістограми Бозе вихідної поверхні	Частка особливих М-трийок вихідної поверхні	Частка гістограми Бозе зони тертя	Частка особливих М-трийок зони тертя
5 точок різних кольорів	01.764	00.066	03.555	00.133	00.259	00.009
2 точки одного кольору, 3 точки різних кольорів	10.559	00.000	19.270	00.000	03.343	00.000
2 точки одного кольору, 2 іншого, 1 третього	13.959	00.360	18.705	00.526	10.187	00.212
3 точки одного кольору, 1 іншого, 1 третього	15.952	01.669	18.768	01.648	13.541	01.675
3 точки одного кольору, 2 іншого	25.070	00.000	19.148	00.000	29.962	00.000
4 точки одного кольору, 1 точка іншого	24.024	00.000	16.014	00.000	30.363	00.000
5 точок одного кольору	08.656	08.656	04.327	04.327	12.121	12.121

Таблиця 3 – Розрахунок гістограм Бозе і особливих М-трийок (%) в різних зонах зміцненого кільця, випробуваного при швидкості ковзання 1,3 м/с

Поєднання кольорів	Частка гістограм Бозе на загальній фотографії	Частка особливих М-трийок на загальній фотографії	Частка гістограм Бозе вихідної поверхні	Частка особливих М-трийок вихідної поверхні	Частка гістограм Бозе зони тертя	Частка особливих М-трийок зони тертя
5 точок різних кольорів	01.114	00.044	00.811	00.049	01.310	00.042
2 точки одного кольору, 3 точки різних кольорів	08.458	00.000	07.596	00.000	08.503	00.000
2 точки одного кольору, 2 іншого, 1 третього	14.545	00.430	15.342	00.479	13.140	00.363
3 точки одного кольору, 1 іншого, 1 третього	16.633	01.828	17.359	02.101	15.612	01.486
3 точки одного кольору, 2 іншого	25.912	00.000	25.989	00.000	26.858	00.000
4 точки одного кольору, 1 точка іншого	24.547	00.000	24.513	00.000	25.012	00.000
5 точок одного кольору	08.556	08.556	08.189	08.189	08.902	08.902

Таблиця 4 – Розрахунки гістограм Бозе (%) з урахуванням знаків лапласіанів серійного кільця, випробуваного при швидкості ковзання 1,3 м/с

Поєднання кольорів	Частка гістограми Бозе на загальній фотографії	Частка особливих М-трийок на загальній фотографії	Частка гістограми Бозе вихідної поверхні	Частка особливих М-трийок вихідної поверхні	Частка гістограми Бозе зони тертя	Частка особливих М-трийок зони тертя
5 точок різних кольорів	0.418	0.582	0.425	0.575	0.440	0.560
2 точки одного кольору, 3 точки різних кольорів	0.487	0.513	0.484	0.516	0.511	0.489
2 точки одного кольору, 2 іншого, 1 третього	0.454	0.546	0.442	0.558	0.475	0.525
3 точки одного кольору, 1 іншого, 1 третього	0.316	0.684	0.349	0.651	0.275	0.725
3 точки одного кольору, 2 іншого	0.502	0.498	0.496	0.504	0.503	0.497
4 точки одного кольору, 1 точка іншого	0.493	0.507	0.505	0.495	0.470	0.530
5 точок одного кольору	0.000	1.000	0.000	1.000	0.000	1.000

Таблиця 5 – Розрахунки гістограм Бозе (%) з урахуванням знаків лапласіанів серійного кільця, випробуваного при швидкості ковзання 1 м/с

Поєднання кольорів	Частка гістограми Бозе на загальній фотографії	Частка особливих М-трійок на загальній фотографії	Частка гістограми Бозе вихідної поверхні	Частка особливих М-трійок вихідної поверхні	Частка гістограми Бозе зони тертя	Частка особливих М-трійок зони тертя
5 точок різних кольорів	0.425	0.575	0.426	0.574	0.529	0.471
2 точки одного кольору, 3 точки різних кольорів	0.493	0.507	0.489	0.511	0.535	0.465
2 точки одного кольору, 2 іншого, 1 третього	0.458	0.542	0.443	0.557	0.482	0.518
3 точки одного кольору, 1 іншого, 1 третього	0.302	0.698	0.337	0.663	0.258	0.742
3 точки одного кольору, 2 іншого	0.503	0.497	0.495	0.505	0.509	0.491
4 точки одного кольору, 1 точка іншого	0.501	0.499	0.496	0.504	0.495	0.505
5 точок одного кольору	0.000	1.000	0.000	1.000	0.000	1.000

Таблиця 6 – Розрахунки гістограм Бозе (%) з урахуванням знаків лапласіанів зміцненого кільця, випробуваного при швидкості ковзання 1,3 м/с

Поєднання кольорів	Частка гістограми Бозе на загальній фотографії	Частка особливих М-трийок на загальній фотографії	Частка гістограми Бозе вихідної поверхні	Частка особливих М-трийок вихідної поверхні	Частка гістограми Бозе зони тертя	Частка особливих М-трийок зони тертя
5 точок різних кольорів	0.454	0.546	0.509	0.491	0.416	0.584
2 точки одного кольору, 3 точки різних кольорів	0.524	0.476	0.554	0.446	0.496	0.504
2 точки одного кольору, 2 іншого, 1 третього	0.467	0.533	0.473	0.527	0.460	0.540
3 точки одного кольору, 1 іншого, 1 третього	0.277	0.723	0.255	0.745	0.301	0.699
3 точки одного кольору, 2 іншого	0.501	0.499	0.495	0.505	0.508	0.492
4 точки одного кольору, 1 точка іншого	0.489	0.511	0.462	0.538	0.515	0.485
5 точок одного кольору	0.000	1.000	0.000	1.000	0.000	1.000