

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ТЕХНІЧНОЇ ТЕПЛОФІЗИКИ НАН УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Харченко Сергій Дмитрович

УДК 621.891

**«МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ДЕТАЛЕЙ
АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ ЗА РАХУНОК ВИКОРИСТАННЯ
ДЕТОНАЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ Cr-Si-B»**

Спеціальність 05.02.04 – тертя та зношування в машинах

Галузь знань 13 – механічна інженерія

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

_____ С.Д. Харченко

Науковий керівник: Щепетов Віталій Володимирович, доктор технічних наук,
професор

Київ – 2019

АНОТАЦІЯ

Харченко С.Д. Методи підвищення зносостійкості деталей авіаційної техніки за рахунок використання детонаційних покриттів Cr-Si-W. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.04 „Тертя та зношування в машинах” (13 – Механічна інженерія). – Національний авіаційний університет, Київ, 2019.

Робота присвячена підвищенню зносостійкості деталей авіаційної техніки, які працюють за умов відсутності мастильного матеріалу, а також в режимі граничного тертя.

Створено і випробувано композиційні зносостійкі покриття, властивості яких базуються на раціональному використанні недефіцитних легуючих елементів, які, розчиняючись в матеріалі основи Cr, взаємодіючи з ним і між собою, утворюють стійкі зміцнюючі фази, а на активних поверхнях формують захисні вторинні структури, різні по типу, будові та властивостям. В якості легуючих елементів, які сприяють твердорозчинному зміцненню матричної фази та реалізації механізмів зміцнення за рахунок утворення тугоплавких фаз в роботі застосовано Si, окрім того висока структурна і фазова стабільність досягається введенням W.

Досліджено закономірності процесів тертя та зношування розроблених композиційних покриттів, що не містять високовартісних та дефіцитних компонентів. Встановлено у всьому діапазоні випробувань, наближених до реальних умов експлуатації, високі зносостійкі властивості зазначених покриттів у порівнянні із зразками, отриманими на базі карбіду вольфраму та покриттів на основі нікелю.

Показано, що нормальне механохімічне зношування характеризується певним станом поверхні тертя і експериментально встановлено, що оксидні плівки, які утворюються на поверхні тертя в умовах структурної пристосованості являють собою складний складноактивуємий комплекс вторинних структур у виді простих оксидів та з'єднань типу шпінелі на основі Cr, Si.

При дослідженнях в умовах підвищених температур встановлено визначальну роль поверхневих оксидних плівок, які блокують молекулярно-адгезійну взаємодію поверхонь та перешкоджають розвитку процесів контактного скріплення та за стехіометричним складом являють дрібнодисперсну суміш оксидів компонентів складу покриття.

Досліджено за допомогою сучасної електронної мікроскопії і рентгенофазового аналізу структурний склад досліджуваних покриттів, в результаті чого встановлено однорідність градієнту хімічного складу по глибині від поверхні. Показано, що рівномірність розподілу зміцнюючих фаз обумовлює високу зносостійкість.

Вивчено триботехнічні процеси структуроутворення зносостійких поверхневих плівок в мастильних середовищах, виявлено механізм впливу поверхнево-активних речовин і показано, що опір зносу визначається характером розподілу хімічних елементів, обумовленого агрегацією легуючих добавок, що входять як до складу покриттів, так і дифундуючи із мастил. Це приводить до збільшення межі текучості, підвищенню поверхневої міцності і сприяє формуванню зносостійких структур у вигляді надтонких поверхневих плівок.

Вивчено особливості сумісності розроблених покриттів у парах тертя з антифрикційними і конструкційними сталями, що дозволило вирішити важливу практичну задачу заміни традиційних антифрикційних матеріалів на основі кольорових металів.

Проведені атестаційні випробування, які показали, що запропоновані покриття для поверхневого зміцнення деталей при порівнянні з матеріалами, які застосовуються при відновленні рухомих складових авіаційної техніки, мають підвищену зносостійкість в 1,5-2 рази.

На підставі проведених досліджень розроблено технологію нанесення досліджуваних покриттів та рекомендації щодо підвищення експлуатаційної надійності деталей, зміцнених покриттями системи Cr-Si-B.

Ключові слова: композиційні покриття, граничне тертя, тертя, зношування, технологічні та експлуатаційні параметри, пари тертя, тертя зношування.

Основні результати дисертаційних досліджень опубліковані в 16 наукових працях.

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Недайборщ С.Д. Закономерности и механизм изнашивания детонационных покрытий Cr-Si-B при нагружении трением в отсутствии смазки / С.Д. Недайборщ // Проблемы тертя та зношування. – 2010. – №54. – С.163-170.

2. Недайборщ С.Д. Закономерности изнашивания детонационных покрытий системы Cr-Si-B в условиях граничной смазки / С.Д. Недайборщ, С.С. Бись // Вісник ХНУ. – 2010. – №5. – С.154-157.

3. Недайборщ С.Д. Физические аспекты совместимости детонационных покрытий с триботехническими материалами / С.Д. Недайборщ, В.В. Щепетов // Проблемы тертя та зношування. – 2011. – №1. – С.189-197.

4. Недайборщ С.Д. Повышение эксплуатационных характеристик при восстановлении деталей авиационной техники / С.Д. Недайборщ, В.В. Щепетов // Проблемы техніки. – 2011. – №1. – С.145-148.

5. Недайборщ С.Д. Влияние элементоорганических присадок на процессы трения и изнашивания детонационных покрытий /С.Д. Недайборщ, В.В.Щепетов, О.В. Харченко // Проблемы техніки. – 2012. – №1. – С.57-65.

6. Недайборщ С.Д. Сопротивление износу детонационных покрытий Cr-Si-B в экстремальных условиях трения / С.Д. Недайборщ, С.С. Бись // Вісник ХНУ. – 2013. – №6. – С.20-24.

7. Недайборщ С.Д. Износостойкость детонационных покрытий Cr-Si-B при нагружении трением в условиях повышенных температур / С.Д. Недайборщ, В.В. Щепетов // Порошковая металлургия. – 2014. – №1/2. – С.81-89. SCOPUS

8. Бабак В.П. Математичне моделювання формування детонаційних покриттів / В.П. Бабак, В.В. Щепетов, В.І. Мірненко, С.Д. Недайборщ // Технологические системы. – 2016. – № 2(75). – С. 82-88. COPERNIKUS

9. Babak V.P. Wear resistance under vacuum of nanocomposite coatings with dry lubricant / V.P Babak, V.V. Shchepetov, S.D. Nedayborshch // Scientific bulletin of NMU. – 2016. – № 1. – P.47-52. SCOPUS

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

10. Недайборщ С.Д. Структурування зносостійких детонаційних покриттів системи Cr-Si-B / С.Д. Недайборщ // Матеріали XI МНТК “АВІА-2013”. – 2013. – Т3. – С. 15.1-15.4.

11. Недайборщ С.Д. Влияние присадок на процессы трения и изнашивания детонационных покрытий системы Cr-Si-B / С.Д. Недайборщ // Матеріали 4-ї МК HighMatTech. – 2013. – С. 331.

12. Недайборщ С.Д. Износостойкость детонационных покрытий Cr-Si-B в тяжело нагруженных узлах трения / С.Д. Недайборщ // Матеріали МНТК „Сучасні проблеми машинознавства”. – 2013. – С.10.

13. Недайборщ С.Д. Износостойкость детонационных покрытий Cr-Si-B в экстремальных условиях трения / С.Д. Недайборщ // Матеріали 8-ї МК «Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследования, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий». – 2014. – С.93.

14. Nedaiborshch S.D. Resistance to wear of detonation coatings Cr-Si-B in a vacuum which contains molybdenum disulfide / S.D. Nedaiborshch // Конгрес „Авіація у ХХІ столітті”. – 2014. – С.1.1.60-1.1.63.

15. Недайборщ С.Д. Износостойкость детонационных наноконпозиционных покрытий Cr-Si-B в условиях высоких температур / С.Д. Недайборщ // Матеріали 5-ї МК HighMatTech. – 2015. – С. 160.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

16. Патент №65010 України. Композиційний зносостійкий матеріал на основі Cr-Si-B для поверхневого зміцнення деталей; С22С 29/14 / С.Д. Недайборщ, І.О. Єгоров, В.В. Щепетов, А.Д. Панасюк, І.О. Подчерняєва, О.В. Харченко // Заявл. від 20.04.2011; Бюл. №22.

ANNOTATION

Kharchenko S.D. Methods of improving the wear resistance of parts of aviation equipment due to the use of detonation coatings Cr-Si-B. – The manuscript.

Thesis for obtaining a candidate of technical sciences in major 05.02.04 - friction and wear and tear in machines. - National Aviation University. - Kyiv, 2019.

The work is devoted to increasing the wear resistance of parts of aviation technology, which operate in the absence of lubricant, as well as in the mode of friction. Created and tested composite wear-resistant coating, whose properties are based on the rational use of non-deficient alloying elements are dissolved in the material foundations Cr form stable reinforcing phase, and the active surfaces form a protective secondary structure, different in type, structure and properties. Si, B used as alloying elements, contributing to the solid-state strengthening of the matrix phase and the implementation of strengthening mechanisms due to the formation of refractory phases. The optimum technological parameters of detonation gas spraying of composite powders of the Cr-Si-B system have been selected.

The regularities of friction and wearing processes of developed composite coatings that do not contain high-value and scarce components are investigated. Installed throughout the range of tests, close to the actual operating conditions, high wear-resistant properties of these coatings compared with samples obtained on the basis of tungsten carbide and nickel-based coatings.

It is shown that normal mechanical and chemical deterioration is characterized by a certain state of the friction surface and it has been experimentally established that oxide films formed on the friction surface under conditions of structural adaptation represent a complex heavy-activated complex of secondary structures in the form of simple oxides and compounds based on Cr, Si.

In researches in high temperatures, the determining role of surface oxide films, which block the molecular-adhesion interaction of surfaces and hinder the development of contact bonding processes, is established and, according to the stoichiometric composition, is a fine-dispersed mixture of oxides of the components of the coating composition.

The structural structure of the investigated coatings was studied with the help of modern electron microscopy and X-ray diffraction analysis. The homogeneity of the chemical composition gradient in depth from the surface was established. It is shown that even distribution of hardening phases causes high wear resistance.

The tribotechnical processes of structuring of wear-resistant surface films in lubricating media were studied, the mechanism of influence of surfactants was revealed and the resistance of wear was determined by the character of the distribution of chemical elements due to the aggregation of dopant additives included in the coatings and diffused from the lubricants. This leads to an increase in the yield strength, an increase in surface strength and contributes to the formation of wear-resistant structures in the form of superfine surface films.

The features of compatibility of developed coatings in friction pairs with antifriction and structural steels were studied, which allowed to solve an important practical task of replacing traditional antifriction materials based on non-ferrous metals.

Certification tests have been carried out, which showed that the proposed coatings for surface hardening of parts when compared with materials used in the restoration of moving components of aviation technology, have a high wear resistance of 1,5-2 times.

Based on the research carried out, the technological processes of applying the coating coatings and recommendations for improving the operational reliability of the parts reinforced with Cr-Si-B coatings have been developed.

Keywords: composite coatings, extreme friction, friction, wear, technological and operational parameters, friction pairs, friction wear.

Scientific works, in which the main scientific results of the dissertation are published:

1. Nedaiborshch S.D. Regularities and mechanism of wear of Cr-Si-B detonation coatings under load-free friction / S.D. Nedaiborshch // Problems of friction and wear. – 2010 – №54. – P.163-170.

2. Nedaiborshch S.D. The regularities of the wear of detonating coatings of the Cr-Si-B system under the conditions of boundary lubrication / S.D. Nedaiborshch, S.S. Bys // Bulletin of the KhNU. – 2010. – №5. – P.154-157.

3. Nedaiborshch S.D. Physical aspects of compatibility of detonation coatings with tribotechnical materials / S.D. Nedaiborshch, V.V. Shchepetov // Problems of friction and wear. – 2011. – №1. – P.189-197.

4. Nedaiborshch S.D. Improvement of operational characteristics characteristics in the reconstruction of aviation equipment parts / S.D. Nedaiborshch, V.V. Shchepetov // Problems of technology. – 2011. – №1. – P.145-148.

5. Nedaiborshch S.D. The influence of elemental organic additives on the processes of friction and wear of detonating coatings / S.D. Nedaiborshch, V.V. Shchepetov, O.V. Kharchenko // Problems of technology. – 2012. – No. 1. – P.57-65.

6. Nedaiborshch S.D. Resistance to wear of detonating coatings Cr-Si-B under extreme conditions of friction / S.D. Nedaiborshch, S.S. Bys // Bulletin of the KhNU. – 2013. – №6. – C.20-24.

7. Nedaiborshch S.D. Wear resistance of Cr-Si-B detonation coatings under friction loading under high temperature conditions / S.D. Nedaiborshch, V.V.Shchepetov // Powder metallurgy. – 2014 – № 1/2. – P.81-89. SCOPUS

8. Babak V.P. Math modeling of detonation coatings formation / V.P. Babak, V.V. Shchepetov, V.I. Mirnenko, S.D. Nedaiborshch // Technological systems. – 2016 – №2 (75). – P.82-88. COPERNICUS

9. Babak V.P. Wear resistance under vacuum of nanocomposite coatings with dry lubricant / V.P Babak, V.V. Shchepetov, S.D. Nedaiborshch // Scientific bulletin of NMU. – 2016. – № 1. – P.47-52. SCOPUS

Scientific works which certify the approbation of the dissertation materials:

10. Nedaiborshch S.D. Structure formation of wear-resistant detonating coatings of Cr-Si-B / S.D. Nedaiborshch // Materials of XI ISTC "AVIA-2013". – 2013 – T3. – P.15.1-15.4.

11. Nedaiborshch S.D. Effect of additives on the processes of friction and wear of detonation coatings of the Cr-Si-B system / S.D. Nedaiborshch // Materials of the 4th IC HighMatTech. – 2013. – P. 331.

12. Nedaiborshch S.D. Wear resistance of Cr-Si-B detonation coatings in heavily loaded friction units / S.D. Nedaiborshch // Materials of the ISTC "Modern Problems and Mechanical Knowledge". – 2013. – P.10.

13. Nedaiborshch S.D. Wear resistance of Cr-Si-B detonation coatings under extreme conditions of friction / SD. Nedaiborshch // Materials of the 8th IC "Materials and coatings in extreme conditions: research, application, environmentally friendly technologies for the production and utilization of products." – 2014. – P.93.

14. Nedaiborshch S.D. Resistance to wear of detonation coatings Cr-Si-B in a vacuum which contains molybdenum disulfide / S.D. Nedaiborshch // Конгрес „Авіація у XXI столітті”. – 2014. – С.1.1.60-1.1.63.

15. Nedaiborshch S.D. Wear resistance of detonation nanocomposite Cr-Si-B coatings at high temperatures / S.D. Nedaiborshch // Materials of the 5th IC HighMatTech. – 2015. – P.160.

Scientific works that additionally reflect scientific results of the dissertation:

16. Patent №65010 of Ukraine. Composite wear-resistant material based on Cr-Si-B for surface hardening of parts; C22C 29/14 / S.D. Nedaiborshch, I.O. Egorov. V.V. Shchepetov, A.D. Panasyuk, I.O. Podchernyayeva, O.V. Kharchenko // Application dated 20.04.2011; Bul. № 22.

ЗМІСТ

ВСТУП

РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	12
1.1. Проблема зносостійкості в практиці відновлення деталей авіаційної техніки.....	17
1.2. Основні поняття про механізм тертя і зношування матеріалів.....	21
1.3. Формування покриттів із порошкових матеріалів.....	25
1.4. Обґрунтування мети і задач досліджень.....	33
Висновки по розділу 1.....	36
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЗАСОБИ ВИПРОБУВАНЬ.....	38
2.1. Methodика і обладнання для напилення детонаційних покриттів.....	38
2.2. Науково-методичні положення вивчення закономірностей зносу при терті.....	40
2.3. Фізико-хімічні і структурні методи дослідження властивості детонаційних покриттів.....	50
2.4. Математичне моделювання процесу формування детонаційних покриттів.....	52
Висновки по розділу 2.....	50
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРТЯ ТА ЗНОШУВАННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ В УМОВАХ ВІДСУТНОСТІ МАСТИЛЬНОГО МАТЕРІАЛУ.....	58
3.1. Вплив швидкості ковзання на зношування поверхонь тертя.....	59
3.2. Особливості зносу в умовах важконавантаженого контакту.....	63
3.3. Формування зносостійких покриттів в умовах підвищених температур.....	69
Висновки по розділу 3.....	
РОЗДІЛ 4. ТЕРТЯ ТА ЗНОШУВАННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ В УМОВАХ ГРАНИЧНОГО МАЩЕННЯ.....	80
	82

4.1. Роль трибохімічних процесів в формуванні зносостійких поверхневих структур.....	82
4.2. Зносостійкість покриттів за наявності мастильного матеріалу в контакті.....	84
4.3. Вплив елементоорганічних присадок на процеси тертя та зношування.....	92
Висновки по розділу 4.....	99
РОЗДІЛ 5. СУМІСНІСТЬ ПОКРИТТІВ З АНТИФРИКЦІЙНИМИ І КОНСТРУКЦІЙНИМИ МАТЕРІАЛАМИ.....	101
5.1. Аналіз та вибір пар тертя з конструкційних і антифрикційних матеріалів.....	101
5.2. Експлуатаційна стійкість детонаційних покриттів в парах тертя з антифрикційними та конструкційними матеріалами.....	103
Висновки по розділу 5.....	109
ВИСНОВКИ.....	11
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	113
ДОДАТКИ.....	125

ВСТУП

Значні можливості у вирішенні проблеми підвищення надійності і довговічності тертьових сполучень деталей машин і механізмів мають технології нанесення покриттів, у яких використовуються порошкові матеріали.

Проблема поверхневої міцності при терті є однією з найбільш складних науково-технічних задач і знаходиться на стику ряду фундаментальних галузей знань. Однак, через складність процесів, які синтезують в собі цілий комплекс механо-фізико-хімічних явищ, що обумовлюють поступову зміну розмірів при навантаженні тертям, дотепер відсутні єдині погляди і уявлення на його природу, характер і закономірності.

Актуальність теми. Технології нанесення покриттів, у яких використовуються порошкові матеріали, відкривають шлях вирішення проблеми підвищення надійності і довговічності тертьових сполучень деталей машин і механізмів.

Одним із сучасних перспективних технологічних методів, що дозволяє одержувати високоякісні покриття нанесенням порошкоподібного матеріалу, є детонаційно-газове напилення.

Однак, відсутність необхідного асортименту, кількості і якості порошоків для зносостійких покриттів перешкоджає широкому практичному застосуванню детонаційного методу та обумовлює необхідність проведення дослідних робіт, що ставлять за мету розробку ефективних порошкових матеріалів, які не містять дефіцитних і дорогих компонентів, зокрема, таких як вольфрам, кобальт, нікель і ін. Втім, широке застосування зносостійких детонаційних покриттів неможливе без усебічного дослідження їхніх властивостей.

Наявність великої кількості конструкційних вузлів тертя, різноманіття і специфіка їхньої експлуатації не дозволяють створити універсальне покриття або ряд покриттів, здатних вирішувати всі існуючі проблеми в машинобудуванні. Це призводить до того, що створення і дослідження детонаційних покриттів, що характеризуються високими триботехнічними властивостями, представляє

сьогодні складну самостійну наукову проблему, пов'язану з розвитком загального системного підходу до підвищення зносостійкості покриттів у різних умовах тертя. Роботи в цьому напрямі є актуальними і перспективними як з точки зору прикладних досліджень, так і в напрямку вирішення задач теоретичного характеру.

За даним напрямом значних теоретичних та практичних результатів досягли такі видатні вітчизняні вчені: Б.І. Костецький, Л.І.Бершадський, І.Г.Носовський, М.В.Кіндрачук, Р.Г.Мнацаканов, В.Ф.Лабунець, В.І.Дворук. Також вагомий внесок в розвиток сучасної трибології зробили Д.М.Гаркунок, М.О.Буше, В.П.Боуден, Д.Тейбор та інші.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація відповідає основним науковим напрямам фундаментальних досліджень у галузі природничих наук НАН України на 2015-2019 рр. і виконана в рамках тем відомчого замовлення НАН України: „Наукові підходи і технології підвищення зносостійкості та довговічності важконавантажених конструкційних елементів при циклічному контактному навантаженні” (2015-2017 рр., номер держреєстрації 0115U000226); „Наукові основи підвищення контактної витривалості та зносостійкості конструкційних елементів з покриттями при терті кочення” (2017-2019 рр., номер держреєстрації 0117U001167).

Мета дослідження. Встановлення закономірностей тертя та зношування покриттів з композиційних порошків в парах тертя з вольфрамівмісними покриттями, сталями, бронзами при відсутності мастильного матеріалу та в умовах граничного режиму мащення.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні **завдання:**

1. Розробити оптимальні технологічні параметри детонаційно-газового напилення композиційних порошків системи Cr-Si-B.

2. Дослідити параметри тертя і зношування композиційних покриттів при відсутності мастильного матеріалу та їх вплив на діапазони прояву нормального механохімічного зношування в умовах зміни навантажувально-швидкісних і температурних режимів випробування.

3. Вивчити вплив трибохімічних процесів в умовах граничного мащення на явище структурної пристосованості при терті композиційних покриттів.

4. Встановити предметні сфери застосування досліджуваних покриттів із композиційних порошоків для умов роботи в повітряному середовищі за відсутності та за наявності мастильних матеріалів.

Об'єкт дослідження – процеси трансформування вторинних структур, що визначають трибостійкість покриттів.

Предмет дослідження – закономірності формування зносостійких поверхневих структур покриттів системи Cr-Si-B при навантаженні тертям.

Методи дослідження. Проведені дослідження базуються на сучасних фізико-хімічних методах аналізу мікро- і макроструктур, основних положеннях триботехнічного матеріалознавства, математичного моделювання з урахуванням експлуатаційних і технологічних факторів, з позиції структурно-енергетичної теорії тертя.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше визначено структурно-фазовий склад розроблених покриттів, їхні міцнісні і фізико-механічні властивості та вплив на опір зносу в різних умовах експлуатації, що відкриває можливість його застосування в якості конкурентноздатного матеріалу закордонним аналогам.

2. Набув подальшого розвитку метод дослідження трибостійкості покриттів за відсутності мастильних матеріалів, що дозволило встановити закономірності протікання трибофізичних процесів утворення захисних поверхневих шарів вторинних структур у контактній зоні.

3. Вперше вивчено закономірності зношування покриттів системи Cr-Si-B в умовах граничного мащення, що дозволило визначити роль трибохімічних явищ у формуванні модифікованих шарів з високими зносостійкими властивостями.

4. Вперше досліджені питання сумісності розроблених покриттів із широким спектром антифрикційних і конструкційних матеріалів, в результаті чого встановлені області оптимального практичного їхнього використання для захисту вузлів тертя від зносу.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблено композиційне покриття системи Cr-Si-B, напилене детонаційно-газовим методом, з підвищеними триботехнічними характеристиками для поверхневого зміцнення та відновлення вузлів і деталей, працюючих в умовах тертя (Акт впровадження результатів науково-дослідної роботи від 25.11.2016р.).

Розроблена технологія нанесення композиційних порошкових матеріалів системи Cr-Si-B, отриманих на основі ресурсно-сировинної бази країни.

Розроблено рекомендації щодо практичного застосування детонаційних покриттів, які характеризуються низькою вартістю та недефіцитністю компонентів. Встановлені та рекомендовані діапазони швидкості, навантаження, температури, які дозволяють реалізувати високу зносостійкість покриттів, підібрати оптимальні пари тертя для конкретних умов експлуатації.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові й теоретичні положення та практичні результати дисертаційної роботи, які виносяться на захист, одержані здобувачем особисто. Без співавторів опубліковано наукові праці – [1].

З наукових праць, опублікованих у співавторстві, використовуються результати, отримані особисто здобувачем, а саме: визначена інтенсивність зношування контактних поверхонь в умовах граничного тертя – [2]; встановлено закономірності сумісності покриттів Cr-Si-B з триботехнічними матеріалами – [3]; досліджено формування поверхневого шару покриттів – [4]; досліджено вплив присадки на адсорбційну активність оливи в трибоконтаті – [5]; встановлено закономірності зношування покриттів при відсутності мастильного матеріалу в умовах підвищених навантажень – [6]; визначена інтенсивність зношування пар тертя в умовах високих температур – [7]; розроблено математичну модель формування детонаційних покриттів – [8]; встановлено опір зносу покриттів в екстремальних режимах тертя – [9]. Здобувач приймав участь у розробці досліджуваного матеріалу, а саме визначення оптимального вмісту компонентів в запропонованому композиційному матеріалі – [16].

Формулювання теми, постановка задач, вибір об'єктів дослідження, обговорення отриманих результатів виконувались сумісно з науковим керівником.

Апробація роботи. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на науково-технічних конференціях і семінарах, у тому числі: 3-ій Міжнародній науково-технічній конференції „*HighMatTech*” (м. Київ, 2013 р.); Міжнародній науково-технічній конференції „Сучасні проблеми машинознавства” (м. Київ, 2013 р.); Міжнародній науково-технічній конференції „Авіа-2013” (м. Київ, 2013 р.); 8-ій Міжнародній конференції „Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследования, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий” (м. Київ, 2014 р.); Конгрес „Авіація у ХХІ столітті” (м. Київ, 2014 р.); 5-ій Міжнародній науково-технічній конференції „*HighMatTech*” (м. Київ, 2015 р.).

Публікації. Основні результати дисертаційного дослідження викладено в 16 наукових працях, у тому числі: 6 статей у фахових виданнях переліку МОН України, 3 статті у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз; 6 матеріалів та тез доповідей на науково-технічних конференціях; 1 патент.

Обсяг і структура дисертації. Дисертація складається із анотації, вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел зі 135 найменувань та 3 додатків. Робота викладена на 135 сторінках, в тому числі містить 35 рисунки та 11 таблиць.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Сучасний розвиток авіаційної техніки висуває нагальну потребу удосконалення організації і засобів відновлення зношених деталей, впровадження нових ресурсозберігаючих технологій і обладнання, що дозволить з науковою обґрунтованістю і техніко-економічною доцільністю вирішувати експлуатаційні питання при забезпеченні в межах робочих обмежень високого рівня зносостійкості і довговічності вузлів і деталей, які підлягають ремонту.

Як об'єкт ремонту, авіаційна техніка є складним інженерним комплексом, який після відновлення повинен володіти високими експлуатаційними характеристиками, що відповідають рівневі вимог заводів виробників.

Однак, технологічне забезпечення підприємств, засноване на широкому використанні традиційних методів відновлення, незважаючи на безперервне їх удосконалювання, не відповідає сучасним вимогам і ресурс відновлених деталей у багатьох випадках залишається низьким. Це у свою чергу приводить до передчасного відбраковування відновлених деталей, тим самим створює дефіцит, і, як результат, підвищує вартість ремонту, збільшує його тривалість і побічно призводить до зниження безпеки експлуатації.

1.1. Проблема зносостійкості в практиці відновлення деталей авіаційної техніки

Вивчення ситуації, яка склалась на Україні, підтверджує, що ефективна експлуатація систем авіаційної техніки повинна забезпечуватися як високим рівнем її технічного обслуговування, наявністю необхідного числа запасних частин, так і необхідною якістю відновлювального ремонту, що у свою чергу докорінно залежить від рівня використовуваних технологій [1].

Надійність і безвідмовність авіаційної техніки є однією з основних умов її готовності, ефективності застосування і безпеки експлуатації [2,3]. Для виконання

поставлених задач сучасні літальні апарати оснащені потужними силовими установками, злітно-посадковою механізацією, технічними засобами, працездатність яких в основному залежить від безвідмовного функціонування рухомих сполучень, що включають різні по конструкції і призначенню пари тертя. Трибосополучення в процесі експлуатації в результаті дії високих навантажень, швидкостей переміщення і температур, впливу агресивних середовищ і вібрацій піддаються неминучому зносу, що проявляється в зміні їхніх геометричних розмірів і виявляється у виді вм'ятин, налипання, забоїн, залишкової деформації матеріалів [4,5].

В технічній та науковій літературі широко і детально розглянуті питання конструювання, принципи дії агрегатів і систем літальних апаратів, двигунів та їх агрегатів, але не в значній мірі розглянуті причини і ознаки появи експлуатаційних несправностей в них, пов'язаних з зносом.

При підвищенні інтенсивності зношування, що призводить до руйнування або схоплювання рухомих сполучень, відбувається відмова деталі або агрегату, і як наслідок постає необхідність дострокового зняття з експлуатації. При всьому великому виборі конструкційних форм і функціональних особливостей пар тертя, вимога зносостійкості є загальним параметром, який визначає безвідмовність їхньої роботи.

Статистичні дані розподілу кількості відбракованих деталей в залежності від характеру несправності, отримані на підставі аналізу звітів авіапідприємств, представлені на рис 1.1.

З наведеної діаграми випливає, що в процесі експлуатації діють як мінімум три основних фактори, в результаті яких значно зменшується ресурс. Це, перш за все, зношування, яке підвищує ймовірність схоплювання, небезпеку витікання паливно-мастильних матеріалів та гідравлічних рідин, знижує керованість і безпеку. По-друге, порушення регулювання внаслідок вібрації і зношування ущільнювачів монтажних місць та нерухомих сполучень. По-третє, розвиток контактних втомлювальних пошкоджень, що призводять до руйнування робочих

поверхонь в результаті багаторазової дії навантаження при одночасному проковзуванні сполучених поверхонь.

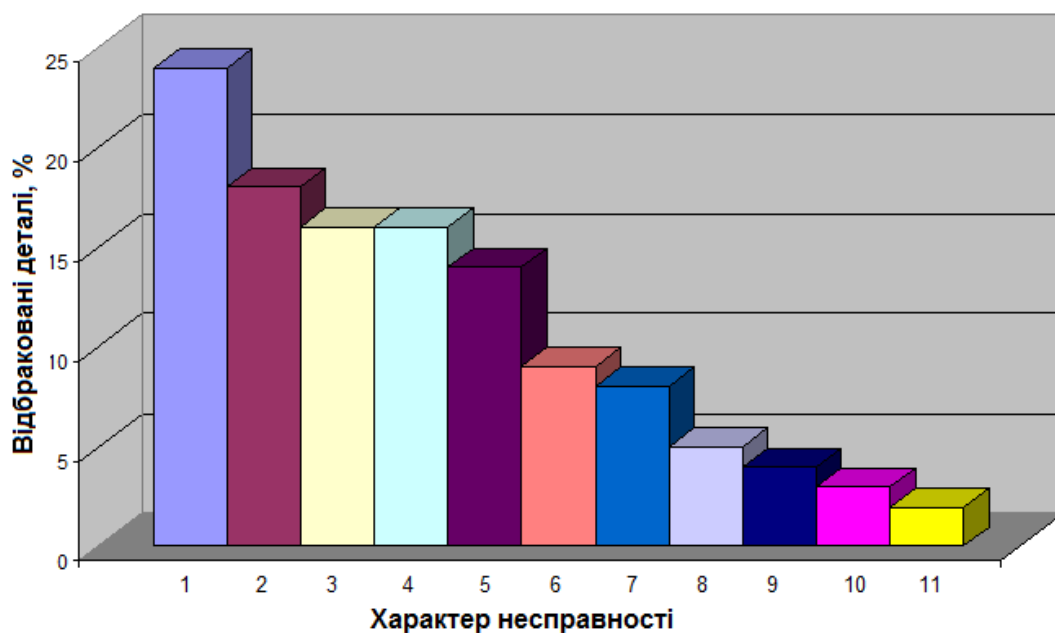


Рис. 1.1. Статистичні дані розподілу кількості відбракованих деталей в залежності від характеру експлуатаційної несправності: 1 – підвищене зношування, збільшення зазорів; 2 – вм'ятини, деформації; 3 – тріщини; 4 – руйнування поверхні; 5 – перегрів, прогар; 6 – заміна конструкції; 7 – не відповідність ваговому методу; 8 – зрив різьби; 9 – корозія; 10 – відпрацювання ресурсу; 11 – пошкодження при демонтажі.

В результаті встановлено, що зношування є головним фактором, який знижує надійність і строк служби як окремих вузлів і агрегатів, так і всього літального апарату в цілому. Таким чином, характерним пошкодженням, що обумовлює найбільшу кількість відбракованих деталей, є пошкодження внаслідок зносу пар тертя.

Через зношування знімаються з експлуатації відповідальні деталі, виготовлені із дефіцитних високовартісних матеріалів, і відновлення, повернення їм необхідних експлуатаційних властивостей, є важливою виробничою задачею авіаремонтних підприємств. До переліку основних деталей, які відбраковуються, відносяться деталі та агрегати авіаційного двигуна Д-36, ТГ-16, РУ-19, зокрема:

шестерня приводу маслонасоса, шестерня приводу гідронасоса, шестерня приводу повітряного стартера, вал ротора вентилятора, шестерні паливних агрегатів, шестерня приводу центробіжного суфлера, вал ротора компресора низького тиску, вал передній та проміжний (рис.1.2.).

Отже, незважаючи на особливості конструкції вузлів тертя систем літальних апаратів і двигунів, технологію їх виробництва та ремонту, характер експлуатації та специфіку несправності, питанням керування їхньою поверхневою міцністю, забезпечення умов розвитку процесів нормального тертя до останнього часу приділялась недостатня увага. Одним із напрямів вирішення даної проблеми є застосування ефективних та недорогих композиційних порошкових матеріалів, а також використання ефективного методу їх нанесення.



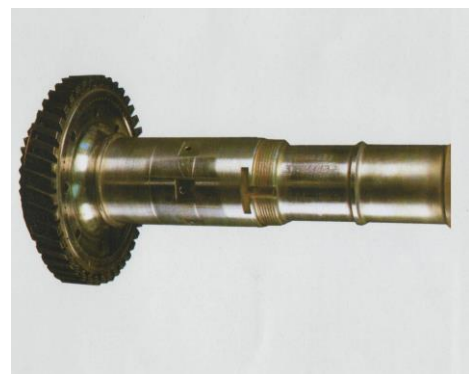
а)



б)



в)



г)

Рис. 1.2. Деталі агрегатів двигуна Д-36: а – шестерня приводу масло насоса; Б – шестерня приводу гідронасоса; в – шестерня приводу повітряного стартера; г – ведуча шестерня вільної турбіни.

На підставі аналізу отриманих результатів можна відзначити, що певна частина деталей відновлюється шляхом застосування технології електричного осадження і наплавлення, але значна кількість деталей бракується через неприпустимо великий знос і відсутність у практиці авіаремонтних підприємств технологій їхнього надійного відновлення. Причиною масового браку є локальний знос, усунути який, використовуючи при відновленні традиційні технології електричного осадження металів і наплавлення матеріалів з наступною їх термічною обробкою, і забезпечити при цьому зносостійкість і стійкість до ушкоджень, необхідні для збереження розмірів деталей у припустимих межах протягом встановленого терміну служби, неможливо. Також ресурс відновлених деталей у порівнянні з новим залишається низьким [6].

Таким чином, підвищення якості повинно вирішуватися шляхом впровадження нових матеріалів та сучасних високопродуктивних технологічних процесів зміцнення і відновлення зношених деталей, що є сьогодні актуальною задачею, рішення якої дозволить значно заощаджувати енергетичні, матеріальні і трудові ресурси, підвищити ефективність виробництва, додавши йому якісно новий рівень.

1.2. Основні поняття про механізм тертя і зношування матеріалів.

Проблеми тертя, мащення і зношування елементів машин відносяться до числа найбільш складних проблем техніки. Це пов'язано з тим, що процеси тертя, мащення і зношування залежать від багатьох факторів: властивостей матеріалу тертьових сполучень, робочих середовищ, режимів навантаження, теплових явищ у зоні контакту та ін.

Початкові дослідження природи тертя і зносу ґрунтувалися на переважаючих у той час механічних уявленнях. Надалі почали розвиватися ідеї про молекулярну природу тертя, озасновані на уявленнях про дію атомних сил притягування і відштовхування. При цьому використовувалися моделі ідеальної атомно-молекулярної будови твердих тіл [7].

Вперше молекулярна теорія тертя була запропонована І. Дезагюльє, що вважав, що між поверхнями тіл, які труться, існує сила молекулярного зчеплення – когезії та адгезії, тому зі зменшенням шорсткості сила тертя повинна зростати. Подальший розвиток молекулярна теорія одержала у роботах Б.В. Дерягіна, у яких він виходив із уявлень про дискретну атомно-молекулярну будову матеріалів. Механічний вплив враховувався як результат роботи атомно-молекулярних зв'язків [7].

У роботах Г.І. Єпіфанова розвивалися погляди на тертя як процес зсувоутворення, що протікає в тонких поверхневих шарах третьових тіл. Ф. Боуден і Д. Тейбор запропонували теорію, що пояснює процес тертя точковим зварюванням під дією температури тертя і руйнуванням точок зварювання. Робота тертя витрачається на зріз металевих зв'язків, що утворилися, і на дряпання м'якої поверхні виступами більш твердої [7].

Широкий розвиток одержала молекулярно-механічна теорія тертя і зносу в роботах І.В. Крагельського, яка базується на уявленні про дискретність контакту при взаємодії третьових поверхонь, а сила тертя представляється як сума опорів, що виникають у результаті молекулярної і механічної взаємодії. Взаємодія газів і рідин з поверхнями твердих тіл у процесі тертя формує „третє тіло”, що істотно змінює молекулярну складову тертя. Ця взаємодія може носити характер або фізичної адсорбції, або хемосорбції [8, 9].

Основною причиною зношування матеріалів при терті, на думку І.В. Крагельського, є пружна і пластична деформації, що приводять в остаточному підсумку до втомного характеру зношування, тому що внаслідок цих деформацій виникають зміни в мікроскопічній будові приповерхневих шарів, аналогічні при зміні втоми матеріалів.

Відповідно до молекулярно-механічної концепції, І.В. Крагельським розроблена класифікація видів зносу, побудована на розгляді трьох послідовних етапів: 1) взаємодія поверхонь, яка відбувається при ковзанні; 2) їх зміни; 3) руйнування поверхонь. При цьому, відповідно до видів руйнування фрикційних

зв'язків, спостерігаються п'ять видів зносу, які проявляються при зовнішньому терті:

1. Пружне відшарування матеріалу виступами контртіла. Руйнування матеріалу відбувається в результаті фрикційної втоми.

2. Пластичне відшарування матеріалу. Знос є результатом малоциклічної втоми.

3. Мікрорізання. Руйнування відбувається при перших актах взаємодії.

4. Адгезійне руйнування фрикційного зв'язку.

5. Когезійний відрив, що приводить до глибинного вириву матеріалу.

Метою молекулярно-механічного підходу до процесів зношування є розробка інженерних методів розрахунку на тертя і знос. Однак головні труднощі таких методів полягають у відсутності простої залежності процесу поверхневого руйнування від об'ємних механічних і фізико-хімічних властивостей вихідних матеріалів пар тертя. Крім того, представлення про фізику процесу деформування і руйнування при високих тисках, наявності ударних хвиль, виключають можливість використання традиційних механізмів об'ємної міцності і руйнування при тлумаченні подальшого рішення задач поверхневого руйнування [8, 9].

Необхідно відзначити, що молекулярно-механічна теорія тертя, побудована на основі заздалегідь заданої моделі контактуючих поверхонь. Фізичного обґрунтування процесів, які відбуваються в контакті, даною теорією не передбачається.

Головним етапом у розвитку науки про тертя, мащення і знос є поява робіт П.А. Ребіндера [10], а також сучасників цього напрямку [11, 12, 13], у яких відзначалася необхідність енергетичного підходу до проблеми тертя і зношування.

Структурно-енергетична теорія тертя і зношування, що розвивається школою Б.І. Костецького [14-22], розглядає процес тертя як процес перетворення зовнішньої механічної енергії в енергію внутрішніх процесів, а закономірності цього перетворення визначаються структурним станом матеріалів при терті. При

цьому все різноманіття процесів, які виникають при терті, розподілено на дві основні групи: нормальні і неприпустимі в практиці явища пошкоджуваності. На підставі великої кількості робіт встановлена загальна закономірність тертя і зношування, а також експериментально доведено, що для усіх відомих матеріалів існують діапазони навантажень і швидкостей переміщень, у яких показники тертя і зношування стійкі і на кілька порядків нижчі, ніж поза цими діапазонами.

Фізичним механізмом загальної закономірності є універсальне явище структурної пристосованості матеріалів при терті [18]. Сутність явища структурної пристосованості полягає в тому, що при нормальному терті в зоні контакту утворюються стійкі упорядковані дисипативні структури, які мають властивості мінімального виробництва ентропії.

Механізм руйнування поверхневих шарів третьових матеріалів при реалізації структурної пристосованості полягає в наступному [19]. Стан поверхневих шарів, які активуються тертям, є термодинамічно нестійким, тому вони прагнуть до взаємодії із середовищем. Кінетичні можливості взаємодії поверхневих шарів характеризуються константами швидкостей процесів на кілька порядків вище, ніж без тертя. У результаті продукт взаємодії – вторинні структури, утворюється практично миттєво, що призводить до стрибкоподібної локальної зміни вільної енергії поверхні. Об'єктом руйнування при нормальному механохімічному зношуванні є вторинні структури, що утворилися в результаті взаємодії поверхонь тертя із середовищем.

Необхідною умовою нормалізації процесів тертя і поверхневого руйнування є динамічна рівновага процесів активації і пасивації, при яких ефективна енергія активування знаходиться в межах значень енергії, необхідної для утворення вторинних структур [19]. Таким чином, усі процеси поверхневої взаємодії і руйнування являють собою підсумок енергетичної та кінетичної конкуренції трибоактивації і пасивації, а їхнє саморегулювання має єдину енергетичну природу, суть якої полягає або в рівновазі активації і пасивації (при цьому відбуваються нормальний механохімічний знос), або в його порушенні (вихід на пошкоджуваність).

Структурно-енергетичний підхід ставить задачу дослідження взаємозв'язку між енергетичними характеристиками тертя і зношування, механізмами структурних перетворень у поверхневих шарах тертьових матеріалів, а також інтенсивністю поверхневого руйнування.

Енергетичний і структурно-енергетичний підходи останнім часом залучають усе більше уваги дослідників. Однак необхідно відзначити, що основна увага в цих роботах приділяється енергетичній стороні питання, у той час як вирішення проблеми створення нових зносостійких матеріалів може поєднати як енергетичний, так і підхід з точки зору матеріалознавства, що і відзначив у своїй роботі Г. Фляйшер [23].

1.3. Формування покриттів із порошкових матеріалів.

В загальному комплексі методів, спрямованих на подовження ресурсу деталей, що працюють в умовах тертя, важливе значення мають технології поверхневого зміцнення, тому що явища зносу, що обмежують терміни експлуатації, виникають і розвиваються в поверхневих шарах. Раціональний вибір і застосування зміцнюючих технологій у більшості виявляється єдино можливим і найбільш вигідним рішенням ряду виробничих задач, пов'язаних не тільки з можливістю відновлення зношених деталей, але і спрямованих на подовження терміну їхньої служби, крім того, для формування високоміцного зносостійкого поверхневого шару потрібно значно менше дорогих і дефіцитних легуючих елементів, ніж для легування всього об'єму. Сьогодні практично у всіх промислово-розвинутих країнах зацікавленість до технічних можливостей різних технологічних методів створення захисних поверхневих покриттів для зміцнення і відновлення зношених деталей безупинно зростає.

Арсенал технологічних способів, що використовуються або можуть бути використані для виконання операцій при ремонті деталей і агрегатів авіаційної техніки, досить великий, і їхнє застосування повинно забезпечити відновлення не тільки початкової геометрії, але і ресурсу деталей. Як правило, з технологічними

методами по відновленню зношених деталей поєднуються операції по додаванню необхідних фізико-механічних властивостей поверхневому шару. Найбільш широко при цьому застосовуються поверхнєве пластичне деформування, термічна обробка, особливо місцеве загартування струмами високої частоти і хіміко-термічна обробка [24].

Однією із задач, при експлуатації машин і агрегатів, є забезпечення надійності і стабільності робочих характеристик їхніх пар тертя. У роботах [25,26] запропонований технологічний процес нанесення зносостійких і антифрикційних покриттів методом плазмового і індукційного наплавлення як при виготовленні нових деталей, так і при їхньому ремонті. Однак при загальній позитивній оцінці і порівняльній простоті методів, їм характерні істотні недоліки, що обмежують області застосування при ремонті техніки, найбільш істотними з яких є деформація виробів, що обумовлена високою погонною енергією наплавлення, нерівномірність властивостей матеріалів які наплавляються, обмежений вибір їхніх поєднань, значна пористість та ін.

У роботі [27] розглянутий метод електроконтактного наплавлення, що представляє собою технологію зміцнення і відновлення зношеного шару шляхом примусового формування нагрітого до пластичного стану присадного металу і поверхневого шару деталі. Цей вид наплавлення відноситься до числа твердофазних процесів і характеризується багатьма перевагами, у порівнянні з традиційними способами. Практика його використання показала, що він також має істотні недоліки, зокрема, розходження властивостей покриттів які наносяться, великою різницею значень міцності зчеплення, зносостійкості, можливістю наносити шар покриття тільки на поверхні тіл обертання.

Відомі роботи Б.А. Мовчана, І.С. Малашенко, А. Гладкова по застосуванню вакуумних технологій та жаростійких матеріалів у газотурбінобудуванні, однак з ними пов'язують прогрес, головним чином, теплозахисних покриттів [29].

Метод акомодатії зернограничного ковзання, розроблений І.А. Кравцом і запропонований для відновлення зношених вузлів, полягає в тому, що до пари тертя прикладається електрична напруга, а масопередача здійснюється через

мастильне середовище, яке отримує при терті електричні властивості і заліковування (відновлення) найбільш інтенсивно здійснюється на активованих поверхневих шарах, зокрема ювенільно-деформованих після зносу [30].

У роботі [31] зниження матеріальних витрат і підвищення якості ремонту запропоновано шляхом електричного нанесення по епюрі нерівномірного зносу дискретних покриттів. Розроблена методика нанесення покриттів дискретної структури при відновленні бронзових деталей.

У роботах [32] відзначається застосування у вітчизняній і закордонній практиці відновлення зношених деталей різних модифікацій розпиленням металопокриттів. Формування металізованого покриття здійснюється за рахунок механічних і чисто молекулярних зв'язків з основним матеріалом, нанесене покриття являє собою пористий, тонкий шар порівняно високої твердості, що добре поглинає мастильний матеріал і в умовах невеликих навантажень характеризується достатньою зносостійкістю. Однак при підвищених навантаженнях на зсув і стиснення, а також при відсутності змащення, металізовані покриття різко втрачають захисні властивості [33], що обмежує їхнє застосування при ремонті вузлів і механізмів авіаційної техніки.

Найбільш діючим методом відновлення розмірів зношених сталевих деталей при ремонті техніки є електролітичне хромування. Хромові покриття корозійностійкі, мають високу твердість і зносостійкість, високі антифрикційні властивості, що у значній мірі залежать від технологічних режимів осадження. Для підвищення механічних властивостей хромових покриттів попередньо наносять підшари міді і нікелю, продуктивність і поліпшення якості покриттів забезпечується шляхом стабілізації електричного процесу [34, 35].

З питань хромування є багато літератури, де описані властивості електролітичних хромових покриттів і області їх застосування, викладені теоретичні основи і технології хромування, розкритий зв'язок між їхніми властивостями та умовами експлуатації.

Відновлення розмірів зношених деталей відбувається розмірним хромуванням або хромуванням на трохи більший розмір з наступним

шліфуванням. Істотним недоліком процесу хромування є його вплив на втомну міцність, величина якої значно залежить від товщини покриттів, температури електроліту і марки шару, яким покривається. Таким чином, витривалість хромових деталей різко падає зі збільшенням товщини шару, який наноситься. Максимальна товщина хромового шару допускається до 0,2 - 0,3 мм на сторону, що не дозволяє відновлювати деталі, що мають великий знос [36-38].

У ремонтній практиці застосовується кілька основних видів хромових покриттів. Гладкий хром найбільш ефективний для деталей, що працюють в умовах достатнього змащування при невеликих швидкостях ковзання. Коли ж поверхня тертя працює при недостатньому мащенні і високих швидкостях ковзання, гладкі хромові покриття виявляються малоприсадними, для таких умов застосовують пористий хром [39].

Однак, незважаючи на широке впровадження в ремонтну практику електролітичних покриттів і вирішення на їх основі важливих задач відновлення деталей авіаційної техніки, їм властивий ряд загальних недоліків, обумовлених моральним зношуванням самої технології процесу, а звідси і невідповідністю робочих характеристик покриттів сучасним вимогам експлуатації і ремонту. Основним фактором, що знижує експлуатаційні можливості електролітичних покриттів, є негативний вплив товщини на втомну міцність, а звідси зниження витривалості основного металу. Крім того, негерметичність покриттів, низька продуктивність, низька здатність електроліту і екологічні проблеми є перешкодами щодо застосування даних покриттів. Також їх застосування обмежується зносом, величина якого, за технічними умовами не повинна перевищувати припустимих значень (до 200 мкм), і працездатність їх значною мірою залежить від умов припрацьовуваності, змащення і зовнішніх впливів. Усе це призвело до того, що в даний час на авіаремонтних підприємствах до 70% дорогих деталей бракується через підвищений знос і відсутність сучасних технологічних методів відновлення [40, 41].

Розглянуті технології ремонту мають ряд істотних експлуатаційних недоліків і вирішують, головним чином, окремі питання відновлення зношених

деталей, при цьому вибір типу матеріалів не має достатнього фізичного обґрунтування і здійснюється дотепер емпірично.

Розвиток авіаційної техніки, необхідність її модернізації вимагає удосконалення та ускладнення технологічних процесів і обладнання для її відновлення, що, природно, призводить до підвищення вимог якості ремонту. Ця проблема висуває першочергові задачі перед науковими підрозділами і охоплює всі сторони діяльності ремонтних підприємств. Зміна існуючого положення вимагає творчого критичного підходу і глибокого аналізу досвіду удосконалювання систем технічної експлуатації і ремонту авіаційної техніки як у нашій країні, так і за кордоном. Застосування нових сучасних матеріалів, що визначають якість ремонту, повинне базуватися на всебічному теоретичному аналізі, закріпленому практичними досягненнями, і повинне забезпечити підвищення ефективності ремонтних робіт і безпеки польотів, скорочення простоїв, пов'язаних з ремонтом, зниження усіх видів витрат на виконання ремонтних робіт, максимальне зменшення в оборотному фонді деталей і запасних частин, збільшення питомого об'єму робіт. В зв'язку з цими значними можливостями в рішенні поставлених задач характеризуються технології, що використовують порошкові матеріали для поверхневого зміцнення нових і відновлення зношених деталей, серед яких динамічно розвиваючимися є методи газотермічного напилення, унаслідок високої продуктивності і універсальності як по асортименту нанесених матеріалів, так і по номенклатурі ремонтваних виробів, при цьому відновлюються зношені частини деталей будь-якої конфігурації і технологія дозволяє одержувати покриття товщиною 2,0 - 4,5 мм як у локально зношених ділянках, так і по всій робочій поверхні [42].

Визначальними технологічними параметрами газотермічних методів напилення є температура і швидкість газового потоку, що забезпечують відповідні енергетичні характеристики напилюваним часткам порошку, а також хімічний склад робочої суміші, що обумовлює характер його взаємодії з напилюваним матеріалом.

Основними методами газотермічного напилення, широко застосовуваними у даний час, є газополуменевий, плазмовий і детонаційний, котрі розрізняються між собою як фізико-хімічними процесами робочих циклів, так і технологічним обладнанням, закономірностями взаємодії напилюваних матеріалів з газовими середовищами й особливостями формування покриттів, їх властивостями, а отже, і можливостями практичного застосування [42-45].

Широко відомі зносостійкі покриття, одержувані при газополуменовому напилюванні. Джерелом нагрівання часток напилюваного матеріалу є полум'я газових сумішей, а джерелом прискорення – струмінь стиснутого повітря [43].

При формуванні теплового потоку використовується енергія, що виділяється при згорянні суміші кисень – горючий газ. У якості останнього, використовуються газоподібні вуглеводи, наприклад, пропан, бутан і т.п. Однак найбільш інтенсивний тепловий потік забезпечує ацетилено-оксидне полум'я, і йому в більшості випадків віддається перевага.

Обов'язкова присутність у потоці газу кисню різко обмежує номенклатуру напилюваних матеріалів. Матеріал, використовуваний для газополуменового напилення покриттів, не повинний розкладатися і спалахувати в полум'ї. У процесах газополуменового напилення матеріали, що розпилюються, можуть використовуватися у виді дроту, прутків, порошків, або гнучких шнурів, оболонка яких складається з органічного полімеру. Швидкість польоту часток при газополуменовому напиленні коливається в інтервалі 50 - 250 м/с у залежності від тиску газів і розмірів часток. При газополуменовому напиленні покриття звичайно виходять пористими (20%) і мають низьку міцність зчеплення з підложкою. Товщина покриттів складає 0,5 - 5 мм (звичайні 1 - 2 мм), температура нагрівання поверхні напилюваної деталі коливається в інтервалі 50 - 250 °С, продуктивність установок – 4 - 8 кг/г і більше [43].

До основних недоліків газополуменового напилення можна віднести недостатній рівень міцності зчеплення покриттів з основою, наявність пористості, що перешкоджає застосуванню покриттів у корозійних середовищах без

додаткової обробки і невисокий коефіцієнт використання енергії газополуменевого струменя нагрівання порошкового матеріалу.

Газополуменеві покриття в основному використовуються для захисту чорних матеріалів від корозії, відновлення розмірів зношених легконавантажених деталей, підвищення антифрикційних властивостей пар тертя [46].

Логічним розвитком методу газополуменевого формування захисних покриттів є плазмове напилення. Застосовуючи плазму як високоентальпійне і високотемпературне джерело нагрівання, наносять покриття практично з усіх відомих тугоплавких матеріалів, що у плазмовому струмені не сублимують і не дають інтенсивного розпаду[47, 48].

Потік низькотемпературної плазми як джерело тепла характеризується тим, що його теплоенергетичні і газодинамічні параметри (температура, швидкість, склад, тиск і ін.) можна регулювати в широких межах. Це дозволяє наносити плазмовим методом широкий спектр матеріалів, у тому числі високотемпературні оксиди і безкисневі тугоплавкі з'єднання. Плазмові покриття характеризуються суцільною арковою структурою, що виникає внаслідок сильної деформації і дуже швидкої кристалізації напилюваних часток. Вміст кисню й азоту в покритті може досягати десятих часток відсотка і більше.

Зносостійкість покриттів у значній мірі визначається якістю підготовки поверхні для напилення, з метою забезпечення максимальної її шорсткості і хімічної активності. Основу операції підготовки складає газоерозійна обробка з використанням кварцового піску, корунду або сталевих крихт [49].

Слід зазначити, що при плазмовому напиленні навіть інертні плазмоутворюючі гази не утворюють щільну захисну атмосферу на всій траєкторії польоту часток напилюваного матеріалу, тому властивості покриттів відрізняються від властивостей вихідного матеріалу.

Пористість плазмових покриттів (без додаткової наступної обробки) у залежності від матеріалу й умов напилення може коливатися до 25%, міцність зчеплення з підложкою (на відрив) 15 - 40 МПа в залежності від фізико-хімічних властивостей матеріалу покриттів і підложки [50].

Найбільш загальними факторами, що визначають властивості напилених матеріалів, є взаємодія напилюваного матеріалу з газовим середовищем, зниження міцності на границях між шарами покриттів, нанесених за один цикл, утворення пористості в результаті газовиділення і кристалізації часток з високими швидкостями, а також виникнення напружень в об'ємі напилюваного матеріалу.

Технологія плазмового напилення застосовується в промисловості. Покриття на основі вольфраму, молібдену, оксидів деяких тугоплавких з'єднань інтерметалідів дозволили вирішити ряд найважливіших технічних задач. Однак через пористість і незначну міцність зчеплення плазмові покриття не завжди дають позитивний ефект. Одним з можливих напрямків підвищення властивостей напилюваних покриттів, якими є їхня щільність і міцність зв'язку з підложкою, може бути збільшення кінетичної енергії, тобто швидкості напилюваних часток. Відповідно до теоретичних уявлень у природі фізико-хімічного впливу матеріалів у процесі напилення, основні властивості покриття-щільність, твердість, адгезія визначаються, головним чином, температурою і тиском, що виникає при ударі часток об підложку, тривалістю взаємодії і станом напилюваної поверхні. У першому наближенні процес утворення міцних з'єднань у момент зіткнення напилюваних часток з підложкою можна розглядати як послідовність елементарних фізико-хімічних перетворень, плин яких залежить від енергетичного стану системи. Можливості плазмового способу в цьому відношенні обмежені швидкісними параметрами, що не завжди можна компенсувати підвищенням температури.

Газотермічний метод нанесення покриттів, що забезпечує найбільшу швидкість часток напилюваного матеріалу, є детонаційно-газовий метод. Обмеження по температурі при детонаційному методі значною мірою компенсуються більш високою швидкістю часток. Збільшення швидкості обумовлює їхню активну взаємодію з основою, що забезпечує високу міцність зчеплення і щільність напилюваних покриттів [51].

Плазмовий метод напилення покриттів забезпечує більш високе нагрівання часток, чим детонаційний, однак при детонації швидкість і загальна енергія

напилюваних часток (теплова і кінетична) вищі. Завдяки цьому детонаційні покриття, в порівнянні з плазмовими, мають більш високу щільність (98 - 99%) [52].

Характерною рисою методу є його імпульсно-циклічний режим, обумовлений вибуховим характером поширення детонації. При цьому за кожен повний цикл утворюються одиничні точки напилення, сполучення яких по заданій програмі, забезпечує створення рівномірних по товщині покриттів.

Для детонаційного напилення придатні практично всі неорганічні матеріали у виді порошків – метали, сплави, композиційні матеріали і т.п.

Високі енергетичні характеристики напилюваних часток можна варіювати в широких межах технологічними параметрами процесу напилення, що забезпечує необхідні експлуатаційні властивості покриттів, що часто неможливо одержати ніякими іншими методами [53].

1.4. Обґрунтування і задачі підвищення якості відновлення зношених деталей

Технології покриттів у даний час визнані як джерело поліпшення якості і великої потенційної економії коштів. Їхнє застосування пов'язане з одним із сучасних стратегічних напрямків у досягненні високої конструктивної міцності матеріалів. Гнучкість технологічних процесів, розроблених для нанесення покриттів, і висока ефективність визначили їхнє широке застосування як для захисту поверхонь тертя від різних видів руйнування, так і при відновленні зношених деталей.

Комплексний підхід до оцінки якості відновлених деталей показав, що ресурс у більшості випадках визначається довговічністю робочих поверхонь їхніх кінематичних пар, і для багатьох видів вузлів і деталей, першочергове значення має підвищення їхньої зносостійкості. І задача підвищення ресурсу деталей, працюючих в умовах тертя, продовжує залишатися актуальною для сучасної техніки, а звідси і зростаючі вимоги до зносостійкості. Виникає необхідність

розробки захисних покриттів, що відповідають сучасним вимогам експлуатації, робочі характеристики яких були б вище відповідних значень базових матеріалів. Вимоги до вихідних параметрів постійно ускладнюються, і можна сказати, що існуючі методи підвищення надійності і якості ремонту необхідні, але недостатні, тому що вони обмежені рівнем розвитку реалізованими їх областями техніки і технології.

Аналіз проблемної ситуації, а також досягнення науки і можливостей виробництва показує, що одним з перспективних і універсальних технологічних процесів, придатним для будь-яких підложок, різних сполук нанесених матеріалів і застосовуваних для поверхневого зміцнення нових і відновлення зношених деталей, є детонаційно-газове напилення покриттів. Детонаційні покриття найбільш ефективні в умовах підвищених навантажень і температур, інтенсивного зносу й агресивних середовищ, де інші види покриттів малоефективні. Основною перевагою детонаційних покриттів, що вигідно відрізняють їх від інших напилюваних матеріалів, є:

- міцність зчеплення з деталлю (підложкою), що досягає 90 - 180 МПа, яка перевищує міцність покриттів, нанесених іншими методами, в 5 - 9 разів. Така міцність зчеплення забезпечує їхню високу працездатність як в умовах граничного тертя, так і при відсутності змащування;

- пористість, що не перевищує 0,5 - 1,0%, що дозволяє застосовувати покриття для деталей, що працюють в агресивних середовищах;

- шорсткість напилюваної поверхні, що залежить від дисперсності порошку, рельєфу поверхні і режимів, не перевищує 15 - 40 мкм, що дозволяє застосовувати деталі з напиленими покриттям, без додаткової механічної обробки;

- товщина нанесеного шару, що практично не обмежується і може досягати до 1,5 - 5,0 мм, що дозволяє відновлювати нерівномірно зношені поверхні зі значними локальними руйнуваннями;

- температура нагрівання деталі, яка при напилюванні не перевищує 200 - 250 °С, що не створює істотного впливу на структуру матеріалу деталі і дозволяє

наносити покриття з різних порошків не тільки на метали і сплави, але і на вироби з пластмас, гуми, скла й ін.;

- застосування спеціальних видів підготовки поверхні деталі до напилення (дробоструменева, пікоструменева обробки та ін.) дозволяє не тільки зберегти вихідну втомну міцність, але і підвищити її;

- простота обладнання, при використанні якого не виникає труднощів у його налаштуванні та навчанні особового складу.

Незважаючи на накопичений досвід в області розробки, промислової перевірки і впровадження технології детонаційних покриттів, їхнє застосування у виробництві і ремонтній практиці здійснюється вкрай низькими темпами. Хоча і відзначена загальна позитивна оцінка і доцільність використання детонаційних покриттів при відновленні і для захисту вузлів тертя від зносу, їхня виробнича ефективність не досягла рівня, що міг бути визнаний задовільним, зроблено вкрай недостатньо в порівнянні з потребами практики.

Сучасні тенденції розвитку детонаційно-газового методу нанесення покриттів сповільнені в значній мірі через відсутність науково обґрунтованих можливостей керування їхнім складом і структурою. Емпіричні результати, що могли б бути основою системного дослідження закономірностей зношування не систематизовані, багато явищ і процесів, що істотно впливають на експлуатаційні властивості покриттів, у достатньому ступені не супроводжуються теоретичним аналізом і узагальненням. Відсутні однозначні відповіді на загальні принципи введення легуючих елементів, їхньої ролі при розробці і структуроутворенні зносостійких покриттів, крім того, від впливу легування на фазовий склад вторинних структур залежить їхня поверхнева міцність.

Сучасні роботи, які досліджують особливий структурний стан детонаційних покриттів пар тертя, практично відсутні, також наслідком відсутності вичерпної інформації з питань структурних аспектів зміцнення напилюваних покриттів, створення оптимальних сполук і актуальних напрямків підвищення зносостійкості є те, що існуючі дані не складаються в закінчену систему наукового знання, а їхній об'єм і зміст не дозволяють узагальнити їх з єдиних методологічних

положень. У результаті чого більшість покриттів впроваджувалися в ремонтну практику після вдалих одиничних іспитів, а не в результаті цілеспрямованих науково-дослідних робіт.

Враховуючи вище сказане, створення і дослідження детонаційних покриттів, що володіють високими зносостійкими властивостями, представляє сьогодні складну самостійну наукову проблему, і роботи в цьому напрямку є актуальними і перспективними як з погляду фундаментальних досліджень, так і для рішення задач прикладного характеру.

Детонаційні покриття мають кращі з погляду техніко-економічних показників області найбільш ефективного застосування й обґрунтований вибір матеріалів покриттів відповідно до умов експлуатації дозволяє сформулювати ряд прикладних задач сучасної техніки, основними з яких є:

- підвищення конструкційної міцності і зносостійкості вузлів тертя за рахунок раціонального нанесення на їхні робочі поверхні захисних композиційних покриттів;

- використання у вузлах тертя замість традиційно застосовуваних високолегованих сплавів легких і композиційних матеріалів за рахунок поверхневого зміцнення останніх детонаційними покриттями, що сприяє значній економії дефіцитних і дорогих матеріалів та обумовлює зниження загальної ваги конструкцій;

- заміна у вузлах тертя антифрикційних сплавів на основі міді й алюмінію на середньо-вуглецеві сталі з покриттями;

- цілеспрямоване застосування зносостійких покриттів у ремонтній практиці, відновлення зношених деталей зі значним збільшенням їхнього терміну служби, у тому числі виробів з кольорових металів і сплавів.

Висновки по розділу 1.

1. Вивчений стан і проведена якісна оцінка експлуатаційних пошкоджень у залежності від характеру несправностей дозволяють зробити висновок, що широка номенклатура рухомих сполучень бракується через підвищений знос і

відсутність технологічних рекомендацій з їх надійного і економічно доцільного відновлення.

2. Огляд існуючих теорій тертя і зносу, що враховують структуру, склад і властивості матеріалу, показує ефективність структурно-енергетичного підходу до створення нових зносостійких матеріалів. Дослідження взаємозв'язку між енергетичними характеристиками і закономірностями формування вторинних захисних структур на поверхні тертя матеріалів, зокрема, композиційних матеріалів, вивчення впливу хімічного складу матеріалу на типи і властивості вторинних структур, можуть дати необхідну теоретичну основу для створення нових зносостійких матеріалів.

3. На базі опрацьованого матеріалу встановлено, що застосування детонаційних покриттів дозволить з науковою обґрунтованістю і високою техніко-економічною доцільністю вирішити проблему відновлення зношених деталей при цьому значно підвищити показники якості продукції.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЗАСОБИ ВИПРОБУВАНЬ

Поставлені цілі і задачі досліджень вимагають вибору відповідної методики проведення експериментальних досліджень. У зв'язку з цим була застосована комплексна методика, яка включає в себе проведення досліджень складу, структури і властивостей поверхневих шарів покриття від візуальної оцінки до використання сучасних фізичних і хімічних методів аналізу, а також механічні випробування для встановлення фізико-механічних властивостей покриттів і трибологічні дослідження процесів тертя і зношування.

2.1. Науково-методичні положення та засоби вивчення закономірностей зносу при терті.

Комплексний підхід до оцінки якості зносостійких композиційних покриттів в комплексі з аналізом умов експлуатації є основою для обґрунтування вибору і розробки методик випробування. При цьому їх реалізація носить багаторівневий характер (рис. 2.1.), і узагальнені показники кожного рівня взаємообумовлені і розкривають закономірності поверхневої міцності і зносостійкості випробовуваних матеріалів покриттів з урахуванням їх структурних особливостей, фізико-механічних властивостей і експлуатаційних можливостей.

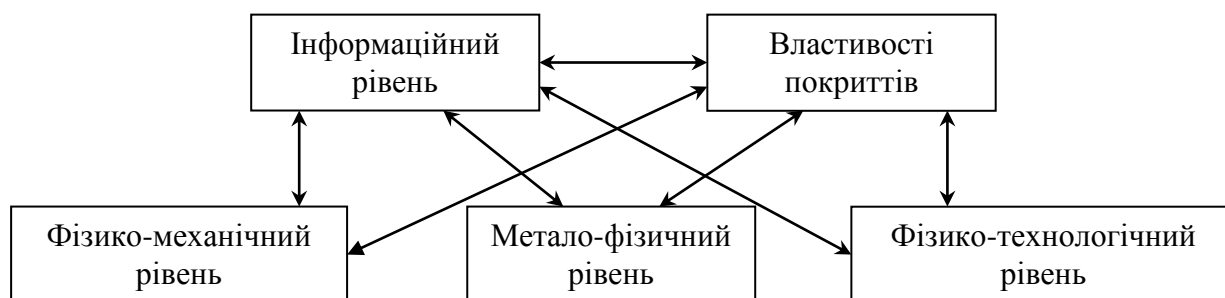


Рис. 2.1. Класифікація рівнів дослідження композиційних детонаційних покриттів.

Різноманітність умов проведення досліджень робочих поверхонь на знос за допомогою запропонованих методик дає всебічні уявлення про детонаційно-газове напilenня як про групу ефективних методів підвищення зносостійкості вузлів тертя. Поряд з цим експериментальні дослідження представляють науково-прикладне значення з позиції підвищення експлуатаційної надійності конкретних вузлів.

Фізико-механічний рівень. На вказаному рівні враховуються конструктивні різноманіття контактних поверхонь, навантажених тертям. При цьому оцінки якості зносостійких покриттів разом з аналізом умов експлуатації відображають показники довговічності. А саме, в якості кількісних показників, які відображають фізико-механічний рівень досліджень, були обрані: інтенсивність зношування (I_h) як показник опору зносу матеріалів; адгезійна міцність зчеплення ($\sigma_{щ}$) – показник впливу технологічних параметрів детонаційно-газового напilenня; мікротвердість поверхневих шарів покриттів (H_μ) – параметр, узагальнюючий міцнісні властивості матеріалу покриття. Даний рівень враховує вплив показників, які характеризують опір зносу матеріалу покриття, технологічні параметри напilenня, які відображають рівень адгезійної міцності при формуванні покриттів, і матеріалознавчі характеристики, обумовлені структурою і властивостями матеріалу: $R_{фм}=f(I_h, \sigma_{щ}, H_\mu)$.

Метало-фізичний рівень. При дослідженнях, що відображають даний рівень, з метою вивчення закономірностей структури і будови композицій, розкриття взаємодії між технологією і структурою, будовою і властивостями покриттів були використані сучасні методи мікрофазового аналізу, що включають оже- і рентгеноструктурну спектроскопію, растрову електронну мікроскопію, рентгенівський мікроаналіз, рентгенофазовий аналіз. Знання основи і можливостей вказаних фізико-хімічних методів аналізу робочих поверхонь є принциповою умовою успішної діяльності при розробці матеріалів для напilenня і дослідження отриманих результатів.

Експлуатаційні властивості покриттів, як відомо, визначаються можливостями внутрішньої будови матеріалу, а також величиною і розподілом діючих напружень ($\sigma_{вн}$), тонкою структурою (S) і будовою (CS): $R_{мф}=f(\sigma_{вн}, S, CS)$.

Фізико-технологічний рівень. Одним із методологічних напрямів в розробці порошкових матеріалів для детонаційно-газового напилення покриттів, які відрізняються високими триботехнічними характеристиками, є створення нанокompозитних порошкових конгломератів методом механохімічного синтезу. При цьому проведенні досліди показали, що в якості показника якості напилюваної суміші доцільно використовувати гранулометричний склад порошкових композицій (G). Гранулометричний фракційний склад, в свою чергу, може змінюватись в широких діапазонах і залежати від складу початкової шихти ($CP_{ш}$), режимів обробки ($r_{ш}$) і наступної обробки ($r_{обр}$): $R_{фт}=f(G)$, де $G=f(CP_{ш}, r_{ш}, r_{обр})$.

Інформаційний рівень. Розвиток і ускладнення методів досліджень, умов функціонування триботехнічних систем показує, що процес розробки детонаційних композицій з керованими властивостями має багато рішень. Виходячи з цього необхідно аналізувати і враховувати якість інформації (Q): важливість (imp), терміновість (e), рівень протиріч (dc). Окрім того, прийняття рішення також залежить від характеру досліджень (TE), ресурсного забезпечення ($гр$) та наукової доцільності (se), тобто: $R_i=f(Q, TE)$, де $Q=f(imp, e, dc)$, $TE=f(гр, se)$.

2.2. Методика і обладнання для отримання композиційних порошків і напилення детонаційних покриттів.

В якості об'єктів дослідження були обрані покриття із порошків на основі Cr , леговані елементами Si , B [54], нанесенні методом детонаційного напилення на деталі авіаційної техніки, які працюють в умовах підвищеного зносу, великих швидкісних навантажень та агресивних середовищ. Проведена оцінка впливу

структури і фазового складу покриття, отриманого методом детонаційного напилення, при різних умовах нанесення на їх надійність та довговічність.

Порошки для формування покриття системи Cr-Si-B отримували методом механохімічного легування. Механохімічне легування – процес отримання сполук різнорідних складових в формі порошку [55, 56]. Продуктом процесу є композиційний порошок, який складається з однорідної суміші всіх складових компонентів.

Отримання композиційних порошкових матеріалів Cr-Si-B із заданою структурою полягає в обробці вихідних сумішей порошків в високоенергетичних агрегатах – атриторі. Основною особливістю механічного легування є висока енергія, що підводиться в атриторі до частинок порошку. Атритор це кульовий млин, що складається з стаціонарної охолоджувальної водою вертикальної ємності з герметичною кришкою, яка фіксує встановлений по осі ущільнювальний вал-мішалку, що приводиться в обертання від електродвигуна. Обертаючись, мішалка перемішує кулі, доводячи їх кінематичну енергію до високого рівня, необхідного для здійснення реакції синтезу, що призводить до утворення композитних продуктів переважно округлої форми з досить рівномірним розподілом дрібнодисперсних компонентів в об'ємі.

Механічне легування в атриторі (рис. 2.2.) може здійснюватися в широкому діапазоні частот обертання. Однак занадто низька частота обертання супроводжується надмірним збільшенням часу процесу, а надто висока - хоча і скорочує час обробки - зазвичай призводить до надмірного нагрівання, зменшення кількості виробленого порошку, швидкого стирання ущільнень і, найважливіше, до забруднення порошкової суміші матеріалом подрібнюючих куль.

Лабораторний атритор типу „ІЕЗ-1-0,5”, на якому виконувалися дослідження, розроблений і виготовлений в ІЕЗ ім. Є.О. Патона. Атритор складається з вертикального нерухомого водоохолоджуваного барабана і мішалки (імпелера), виготовлених з нержавіючої сталі Х18Н9Т. У барабан завантажують розмельні кулі Ø 8 мм із шарикопідшипникової сталі ШХ-15.

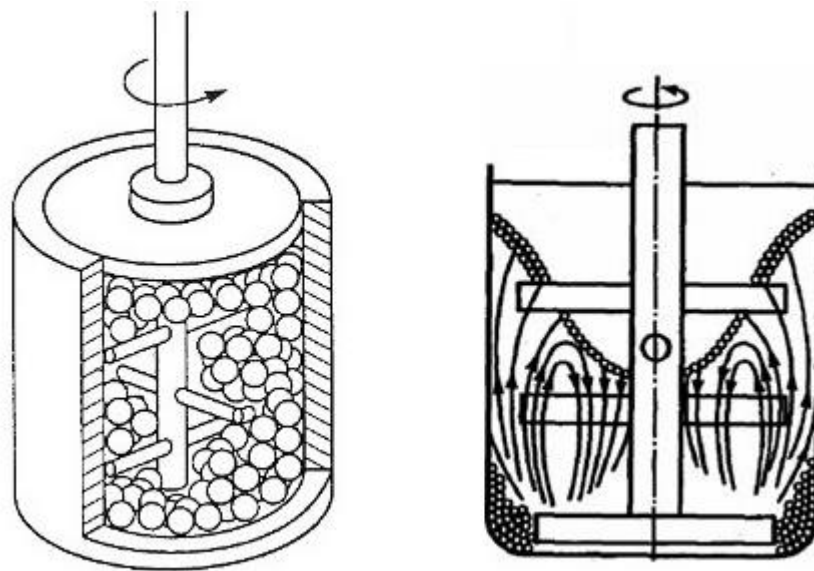


Рис. 2.2. Принципова схема роботи атритора.

Імпелер приводиться в рух за допомогою електродвигуна потужністю 2,2 кВт клиноремінною передачею. Наявність дев'ятишвидкісної коробки швидкостей дозволяє регулювати швидкість обертання імпелера. При обертанні імпелера в рух приводиться вся маса куль, що знаходяться в робочій камері. Безпосередньо імпелер приводить в обертання відносно невелику кількість куль, інші приводяться в рух шляхом естафетної передачі імпульсів від кулі до кулі, доводячи їх кінетичну енергію до високого рівня, достатнього для подрібнення гранул до потрібної фракції. Характеристика установки приведена в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1.

Характеристики лабораторного атритора типу „ІЕЗ-1-0,5”

Швидкість обертання імпелера, об/хв	63 - 1300	
Об'єм робочої камери, мл	1000	
Потужність електродвигуна, кВт	2,2	
Завантаження барабанів	шари, г	2000
	порошок, г	200 - 400

Для порівняльного аналізу триботехнічних характеристик покриттів, отриманих методом детонаційного напилення, проводились дослідження сталі 45, властивості якої широко вивчені [56, 57]. Сталь 45, яка використовується в якості

моделі, широко застосовується в авіаційній промисловості в якості матеріалу для виготовлення деталей: вал-шестерня, колінчаті та розподільні вали, шестерні, шпинделі, бандажі, кулачки та інші нормалізовані, покращенні та піддані термообробці деталі, від яких вимагається підвищена міцність та які працюють в умовах тертя і впливу циклічних навантажень.

Для визначення закономірності структуроутворення та зносостійкості детонаційних покриттів та впливу легованих елементів на діапазони і рівні механічного зносу та втомної міцності було використано покриття системи Cr-Si-B. Даний матеріал забезпечує мінімізацію коефіцієнту тертя, інтенсивності зношування та підвищення міцності покриттів шляхом додавання хрому і кремнію при оптимальному співвідношенні компонентів. Запропонований матеріал може використовуватися як матеріал деталей машин і механізмів триботехнічного призначення, що працюють в умовах тертя при підвищених швидко-навантажувальних параметрах, а також як шихта для нанесення зносостійких покриттів [54].

В якості матеріалу контртіла використовувалась сталь 45, термооброблена до твердості 40 - 42 HRC. Робоча поверхня шліфуванням доводилась до шорсткості $R_a = 0,125 - 0,25$ мкм.

Для дослідження механізму зношування детонаційних покриттів проводились навантаження тертям при відсутності мастила, а також в умовах граничного мащення. В якості мастильних матеріалів використовувалась мінеральна олива МС-20. Використання мінеральної оливи МС-20 в якості мастильного матеріалу обумовлено як парком авіатехніки, яка використовує даний мастильний матеріал, так і широкими можливостями його виробництва вітчизняною нафтопереробною промисловістю.

Для нанесення покриттів системи Cr-Si-B при випробуваннях на зносостійкість, використовувались зразки, виготовлені з сталі 45 кільцевого типу, зовнішній діаметр 25 мм, висота 6 мм (рис.2.3).



Рис. 2.3. Зразок з нанесеним покриттям Cr-Si-B.

Основною особливістю методу детонаційного наплення є циклічний характер подачі порошку на поверхню деталі зі швидкістю, перевищуючою швидкість звуку [58, 59]. Циклічний процес наплення отримують за допомогою детонаційної установки, принципова схема якої представлена на рис. 2.4.

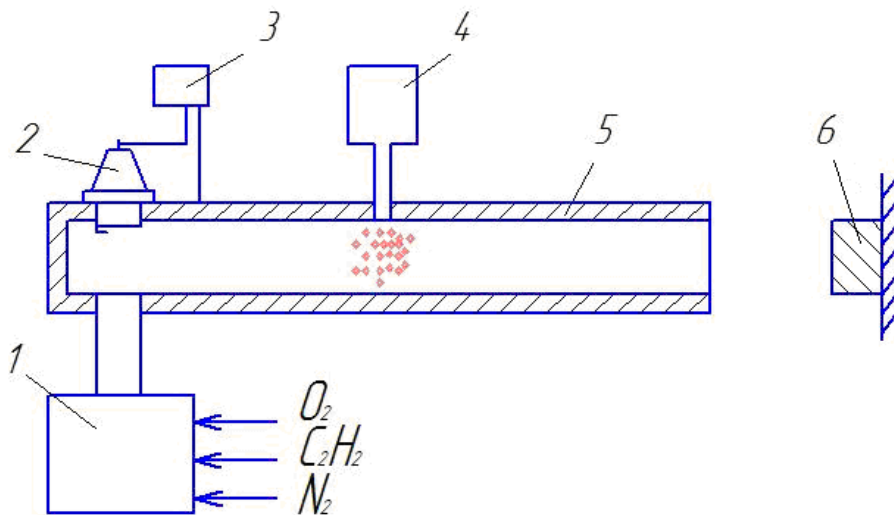


Рис. 2.4. Принципова схема детонаційної установки:

1 – блок сумішоутворення, 2 – запалювач, 3 – блок запалювача, 4 – блок подачі порошку, 5 – ствол, 6 – зразок для нанесення покриття.

Метод детонаційного напилення реалізується за наступним принципом. З блоку 1 газова суміш подається в ствол 5. Одночасно з блока 4 заданими порціями вдувають газом (азот або повітря) дрібнодисперсний порошок в газову суміш безпосередньо перед її запаленням, потім запалювач 2 підпалює газову суміш. В результаті запалювання і переміщення по каналу горючої суміші відбувається її вибух з виділенням значної кількості теплоти та утворенням детонаційної хвилі, яка прискорює та переносить через ствол на поверхню деталі 6 напилюванні частинки зі швидкістю, яка залежить від геометрії ствола та складом газової суміші (рис. 2.5.) [60].

Важливим аспектом детонаційно-газового напилення, є вибір оптимальної температури горіння паливної суміші, оскільки даний фактор впливає на процес розплавлення матеріалу в потоці при горінні паливної суміші, а також суттєво впливає на адгезійні властивості при формуванні покриттів на поверхні відновлювальної деталі.



Рис. 2.5. Принцип формування детонаційних покриттів.

Детонаційне напилення композиційного матеріалу системи Cr-Si-B проводили на модернізованій установці „Днепр-3” (рис. 2.6.), товщина покриття 0,11 - 0,20 мм. Технічні характеристики установки наведені в таблиці 2.2.



Рис. 2.6. Детонаційна установка „Днепр-3” з пультом керування.

Для детонаційного методу характерно дискретне напылення покриття, пов'язане зі згорянням порції горючої газової суміші в режимі детонації. Швидкість частинок, прискорених потоками продуктів згоряння, досягає 600...1000 м/с. У зв'язку з високою кінетичною енергією напылюваних частинок при детонаційному напыленні формування шару покриття може відбуватися при температурі напылюваних частинок нижче температури плавлення їх матеріалу. Необхідність використання кисню в складі газової суміші може викликати окислення частинок напылюваного порошку.

Таблиця 2.2.

Технічні характеристики установки наведені „Дніпр-3”

Тиск робочого середовища, атм	Кисень - 2,0 Ацетилен - 2,0 Азот, повітря - 3,0
Діаметр стволу, мм	22
Швидкострільність, цикл/с	3
Дистанція напылення, мм	160 - 170
Товщина покриття за один цикл, мкм	5 - 30
Коефіцієнт витрати порошку, %	50 - 70
Потужність, ВА	300
Живлення	50 Гц, 200 В
Продуктивність по напыленому матеріалу, кг/год	до 38
Габарити установки, мм	2000 x 1050 x 400
Маса, кг	90

Особливістю процесів, що протікають при детонаційному напиленні, є їх надзвичайно мала тривалість. Так, детонація вибухової суміші, що заповнює ствол, завершується приблизно через $0,5 \cdot 10^{-3}$ с після її ініціювання; тривалість динамічного і теплового впливу газового потоку на порошок зазвичай не перевищує $3 \cdot 10^{-3}$ с; час ударної деформації частинок напилюваного матеріалу в момент формування покриття становить $\sim 10^{-7}$ с.

При детонаційному напиленні покриттів реалізація нанесення покриття здійснюється дискретно при кожному „пострілі” детонаційної установки. Період проходження „пострілів” зазвичай становить 0,2...0,5 с. Дискретність процесу дозволяє систематизувати за тимчасовим принципом і згрупувати чинники, які є вирішальними на різних етапах напилення і які впливають, в кінцевому підсумку, на умови формування покриттів.

Можна виділити три основні етапи технології напилення детонаційних покриттів. Перший етап - підготовчий. Він включає в себе операції по заповненню ствола вибуховою сумішшю і порошком напилюваного матеріалу. У промислових детонаційних установках виконання цих операцій здійснюється за допомогою робочих механізмів, пневмоклапанів, змішувача і порошкового дозатора. Їх циклічна робота є результатом впливу електричних імпульсів, які проходять з певними часовими інтервалами і надходять від пульта автоматичного керування детонаційною установкою. Підготовчий етап завершується в момент ініціювання вибуху газової суміші. Для цього в іскровому зазорі свічі запалювання, введеної в канал ствола, збуджують електричний розряд, який викликає детонацію.

На другому етапі відбувається передача теплової і кінетичної енергії утворених продуктів детонації газової суміші частинкам порошку напилюваного матеріалу під час їх руху в стволі і на ділянці між напилюваною поверхнею і дульним зрізом ствола. Третій етап - формування детонаційного покриття на поверхні.

Визначальними факторами першого етапу є: склад використовуваної вибухової газової суміші, ступінь заповнення нею ствола, величина порції порошку, його гранулометричний склад, форма частинок, місцезнаходження та

концентрація порошкової хмари в стволі в момент вибуху, відстань від зрізу ствола до поверхні деталі.

Цю групу чинників називають технологічними параметрами процесу напилення. Не менш важливі на першому етапі конструктивні особливості і параметри самої детонаційної установки: розміри і форма ствола, місце ініціювання вибуху суміші, спосіб транспортування і місце введення порошку в ствол, „швидкострільність” установки.

Вирішальні фактори другого етапу – енергетичні характеристики продуктів детонації і частинок порошку напилюваного матеріалу, тобто, їх температура і швидкість, а також тиск і щільність газу, час знаходження порошку у високотемпературному потоці.

На третьому, основному етапі процесу, провідну роль набувають фактори, від яких в кінцевому підсумку залежить число утворених зв'язків між взаємодіючими матеріалами в місці їх контакту на межі покриття з основою. Це, зокрема, такі характеристики, як температура і тиск в зоні проходження фізико-хімічних процесів між контактуючими матеріалами, тривалість цих процесів.

Крім названих факторів, велике значення на всіх етапах детонаційного напилення мають фізичні характеристики матеріалу покриття, а на третьому етапі таке ж значення набувають фізичні характеристики матеріалу основи.

Взаємозв'язок систематизованих таким чином чинників, дозволяють на практиці сформулювати такі висновки, які застосовуються при виборі оптимальних режимів напилення композиційних порошоків різного складу:

- підвищення температури порошку напилюваного матеріалу в момент формування покриття та одночасне зменшення швидкості зіткнення частинок з основою досягається шляхом збільшення до деякої оптимальної величини глибини завантаження порошку в ствол - відстані між дульним зрізом стволу і місцем розташування порції напилюваного матеріалу в момент вибуху суміші;

- збільшення відстані між стволом і підкладкою веде до падіння швидкості і температури порошку, що взаємодіє з поверхнею напилення і, як результат, до зменшення тиску і температури в місці контакту частинок з основою;

- з підвищенням вмісту кисню у вибуховій суміші зростає температура і швидкість імпульсного металізаційного потоку.

Для проведення випробувань матеріалів покриття системи Cr-Si-B на тертя та зношування, було використано універсальну машину тертя УМТ-1.

Методика випробувань на даній машині тертя стандартизована [61]. Моделювання пари тертя проводилось по торцевій схемі кільцевих зразків. Режим граничного тертя забезпечували за допомогою замкнутої системи подачі оливи в пару тертя (рис. 2.7.). Олива безпосередньо подавалась в зону контактної взаємодії нерухомого 1 та рухомого 2 зразків через форсунку 3 за допомогою насоса. Злив оливи в відстійник 5, одночасно виконуючого роль бака, реалізовувався самотоком, для виключення впливу продуктів зношування встановлений фільтр тонкої очистки 6. Привід насоса приводиться в дію від приводу установки тертя через редуктор. При випробування використовувалась торцюва схема контакту з $K_{вз} \approx 0,5$.

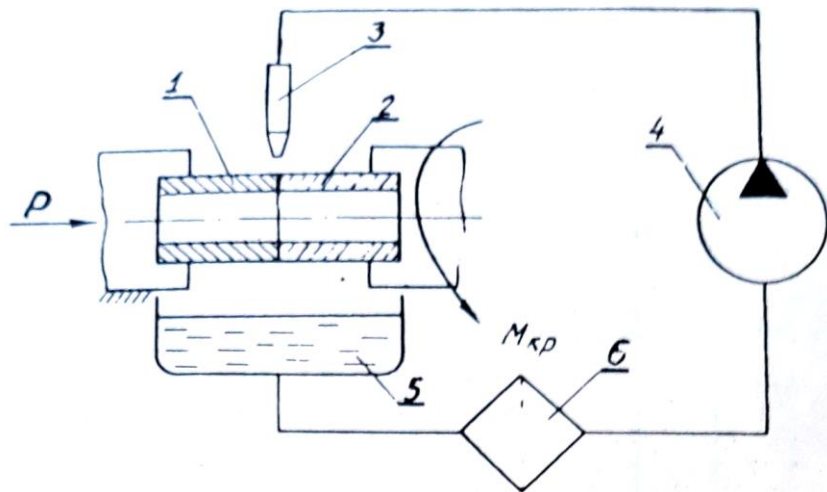


Рис. 2.7. Торцева схема кільцевих зразків: 1 – нерухомий зразок; 2 – рухомий зразок; 3 – форсунка подачі оливи; 4 – насос; 5 – відстійник для оливи; 6 – фільтр.

Універсальна машина тертя УМТ-1 дозволяє проводити випробування на фрикційну теплостійкість, інтенсивність зношування, температуру. Проведення

випробувань по торцевій схемі кільцевих зразків забезпечує $K_{вз} \approx 1$, $K_{вз} \approx 0,5$, що дозволяє моделювати роботу матеріалів пар тертя, які працюють в умовах тертя при підвищених швидко-навантажувальних параметрах, в умовах відсутності мастильного матеріалу та при граничному терті.

2.3. Фізико-хімічні і структурні методи дослідження властивості детонаційних покриттів.

При розкритті взаємозв'язків між властивостями матеріалів покриттів в умовах тертя, їх структурою, впливом зовнішніх чинників, що визначають надійність і працездатність системи тертя, провідну роль відіграє вибір методів досліджень. Можливості використовуваних методик і апаратури багато в чому визначають глибину і достовірність уявлень про процеси, що протікають при контактній взаємодії сполучених поверхонь.

Досліди проводили з використанням комплексної методики, що складається з методів визначення зносостійкості, фазового і структурного стану покриттів, мікромеханічних властивостей покриттів, міцнісних характеристик а також статистичної обробки отриманих даних [62].

Для дослідження загальної структури зразків детонаційних покриттів, виготовлялися металографічні шліфи по загальноприйнятій методиці. Травлення зразків (шліфів) проводились розчином 4%-азотної кислоти в спирті. Металографічні дослідження зразків виконувались на оптичному металографічному мікроскопі МИМ-8 [63].

Даний аналіз дозволяє виявити види зношування на поверхні зразка, ступінь їх припрацювання а також якість поверхні тертя, та придатність зразків для подальших досліджень [64].

Важливим критерієм оцінки окремих структурних складових і тонких приповерхневих шарів є показник мікротвердості.

Вимірювання мікротвердості проводилось на мікротведометрі ПМТ-3 (навантаження 0,5Н) вдавлюванням алмазного індентора. Мікротвердість

характеризує опір пластичному вдавлюванню в поверхню твердого індентора, що є важливою характеристикою зміни властивості поверхневих шарів при терті [63].

Навантаження на індентор вибиралося відповідно до механічних властивостей досліджуваних покриттів і було однаковим як при вимірюванні вихідної мікротвердості, так і мікротвердості зразків після випробування. Глибина відбитка не перевищувала 2 мкм, що давало можливість оцінити мікротвердість найтонших поверхневих шарів.

Дослідження мікрорельєфу поверхонь тертя проводилося за допомогою профілографа-профілометра мод. 201 заводу „Калібр”.

При дослідженні детонаційних покриттів із композиційних порошкових матеріалів була реалізована програма, яка включає в себе дослідження їх триботехнічних властивостей з використанням фізико-хімічних і структурних методів дослідження.

Рентгенофазовий аналіз досліджуваних покриттів здійснювався за допомогою дифрактометра ДРОН-УМ1. Зйомка проводилася в широкому кутовому діапазоні в Со-випромінюванні. На початку прописувались дифрактограми зі швидкістю $1/2^\circ$ на хв. з обертанням зразків, потім виявлені піки детально прописувалися зі швидкістю $1/8^\circ$ на хв. і $1/16^\circ$ на хв. Напруга 25 кВ, струм – 15 мА.

Структурні дослідження кристалічної структури покриття методом дифракції електронів проводились на електронографі ЕРМ -100 (знімання на відображення при напрузі 100 кВ).

Електронні мікрофотографії для вивчення поверхонь тертя досліджуваних покриттів були отримані при зйомці в трансмісивному режимі на мікроскопі Camscan за допомогою двоступеневих вуглецевих реплік, які виготовлялися напиленням у вакуумі. Прискорювальна напруга 80 кВ.

Визначення хімічного складу поверхні зразків, а також різних фаз, включень та недосконалостей покриття проводились за допомогою методу мікрорентгеноспектрального аналізу на мікроаналізаторі „КАМЕКА” моделі MS-46. Суть даного методу полягає в збудженні характеристичного рентгенівського

випромінювання пучків електронів з енергією до 50 кеВ і током поглинання електронів до 300 мкА. Діапазон аналізованих елементів від натрію до урану. Використання даного методу дозволяє аналізувати дуже дрібні зерна детонаційного покриття, виключаючи вплив сторонніх мікровключень на отриману інформацію про склад великих фаз. Також можливо дослідити ступінь хімічної неоднорідності речовини, тонких сполучень різних фаз та кількісного розподілу хімічних елементів в них.

Інформацію по якісному і кількісному складах, хімічному стані елементів, наявності дефектів і функціональних груп в приповерхневих шарах отримували за допомогою методу оже-електронної спектроскопії на установці "Jamp-10S" за методикою фірми "JEOL".

Оже-спектри реєстрували при струмі $5 \cdot 10^{-8}$ А, прискорюючій напрузі 10 кВ, вакуум $2 \cdot 10^{-7}$ Па, діаметр зонда 30 мкм.

Застосування зазначених методів оптичної металографії, рентгенівського аналізу і електронної мікроскопії дозволили здійснити кількісний та якісний фазовий аналіз покриттів і продуктів зносу, вивчити тонку кристалічну структуру напилюваного шару, розкрити механізми і закономірності процесів тертя і зношування досліджуваних детонаційних покриттів як при нормальному атмосферному тиску, так і в умовах вакууму. І таким чином забезпечити отримання комплексу необхідної інформації для вирішення поставлених в роботі завдань.

2.4. Математичне моделювання процесу формування детонаційних покриттів.

Експерименти проведені за планом повного факторного експерименту $5^1 \times 9^1 // 45$. Побудова лінійної за параметрами регресійної моделі виконана за допомогою програмного засобу ПРІАМ (планування, регресія і аналіз моделей) з автоматичним формуванням структури моделі. Модель формувалась на основі

поліномів Чебишева для забезпечення структурної і обчислювальної стійкості (таблиці 2.3., 2.4., 2.5) [65 - 67].

Таблиця 2.3.

Фактор та їх рівні варіювання

Фактор	Назва фактору	Умовне позначення і одиниці вимірювання	Мінімальне значення	Максимальне значення	Крок зміни
X ₁	Подача порошку	G, мг/в	180	300	30
X ₂	Сумарна витрата детонаційної суміші	W, л/хв.	25	65	15

$$I_n = 5,44444 + 1,79111x_2 + 1,08254z_2 + 0,956x_1 + 0,642222z_1 - 0,816x_1x_2 - 0,56x_1z_2 - 0,551804z_1z_2 - 0,282222u_2 + 0,432x_1u_2 \quad (2.1.)$$

$$x_1 = 0,0166667 \cdot (X_1 - 240); \quad z_1 = 1,71429 \cdot (x_1^2 - 0,416667);$$

$$x_2 = 0,05 \cdot (X_2 - 45); \quad z_2 = 2 \cdot (x_2^2 - 0,5); \quad u_2 = 3,33333 \cdot (x_2^3 - 0,85 \cdot x_2).$$

де: $x_1 \dots x_2$ – ортогональний контраст першого порядку незалежних змінних в кодованих значеннях;

$z_1 \dots z_2$ – ортогональний контраст другого порядку незалежних змінних в кодованих значеннях;

u_2 – ортогональний контраст третього порядку незалежних змінних в кодованих значеннях;

Отримана модель високоінформативна, адекватна, структурно і обчислювально стійка. Числові характеристики властивостей моделей і результати перевірки відповідних гіпотез приведені нижче.

Таблиця 2.4.

Аналіз інформативності моделі

Характеристика	Позначення	Значення
Множинний коефіцієнт кореляції	R	0,993649
Скорегований множинний коефіцієнт кореляції	$R_{кор}$	0,99201
Розрахункове значення критерію Фішера для R	F_R	303,269
Критичне значення для критерію Фішера	F_{α, v_1, v_2}	2,16083
Рівень значущості	α	0,05
Степені свободи	v_1	9
	v_2	35
Частка розсіювання, пояснювана моделлю	R^2	0,987339
Критерій Бокса і Веца	γ	10
Гіпотеза про значущість коефіцієнта множинної кореляції	приймається	
Інформативність моделі	інформативність дуже висока	

Таблиця 2.5.

Аналіз адекватності моделі

Характеристика	Позначення	Значення
Дисперсія залишкова	$S_{зал}^2$	0,0553935
Степені свободи	v_1	9
	v_2	35
Розрахункове значення критерію Фішера	$F_{ад}$	62,8278
Критичне значення для критерію Фішера (при відсутності повторних дослідів)	F_{α, v_1, v_2}	1,23744
Рівень значущості	α	0,05
Гіпотеза про адекватність	приймається	

Рівень значущості для t-критерія 0,05 для ступеня свободи $\nu = 45$

Табличні значення t-критерія 2,0141

Стійкість обчислювальна

Число обумовленості COND=1

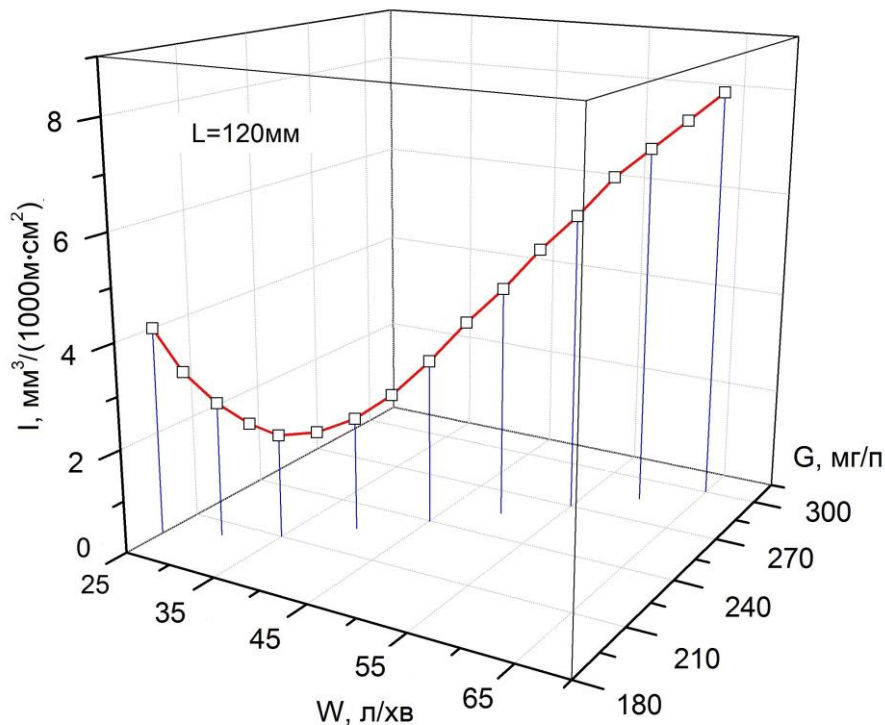
Точність опису

Середня абсолютна похибка апроксимації – 0,155752

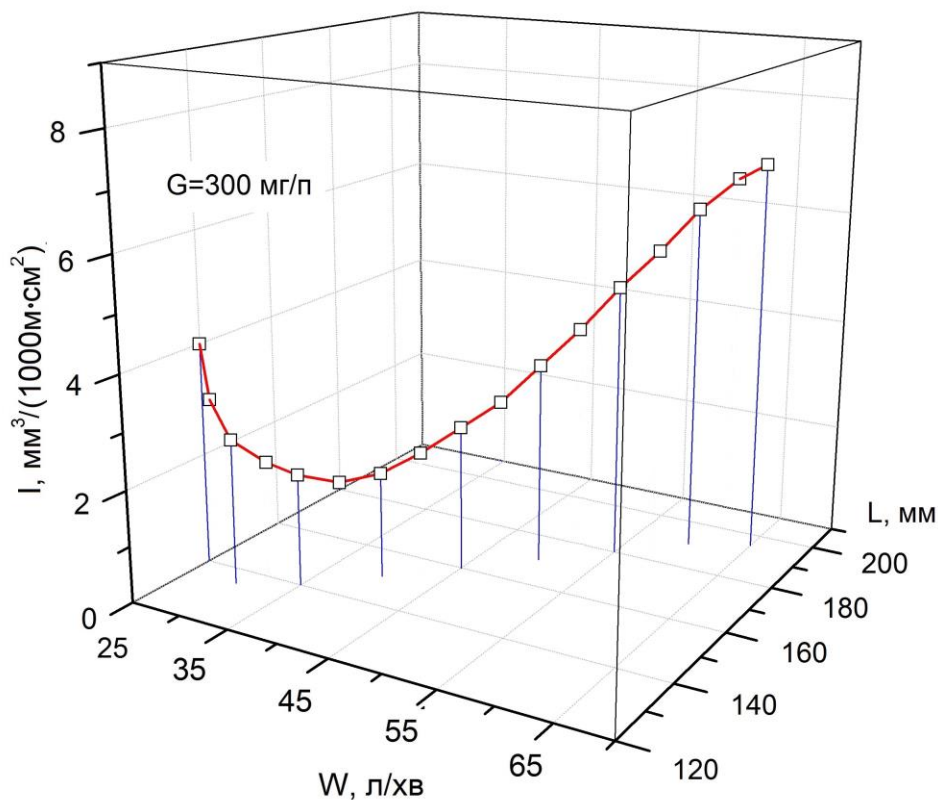
Середня похибка апроксимації – 3.70%

Статистична перевірка отриманих залежностей показала значимість їх коефіцієнтів, адекватність і інформаційність моделі, відтворюваність результатів.

Для аналізу впливу кожного із регульованих факторів на досліджувану функцію побудовані оптимальні криві відгуку (рис. 2.8.). При цьому найбільший вплив на якість напилюваних покриттів має витрата детонаційної суміші (W).



a



б

Рис. 2.8. Залежність інтенсивності зносу покриттів Cr-Si-B від витрати детонаційної суміші при зміні подачі порошку за один цикл (а) і дистанції напилення (б).

Таким чином, мінімальними показниками інтенсивності зношування володіють покриття, напиленні при сумарній витраті робочої суміші 30 - 40 л/хв., подачі порошку 190 - 229 г/п та дистанції напилення 130 - 150м.

Висновки по розділу 2.

1. Дотримуючись технологічного процесу напилення композиційних покриттів, можливо отримати не тільки необхідний фазовий склад, але й задану структуру за рахунок оптимізації технологічних параметрів, направлених на формування структур нового типу, потенційно заповнених матеріалом.

2. В ході виконання роботи опрацьовані сучасні технології та методи отримання і нанесення детонаційних покриттів, що дало можливість обрання оптимального складу композиційного матеріалу та режимів напилення. А також

застосовано комплексні методики, що дають можливість визначення зносостійкості, фазового і структурного стану покриттів, мікромеханічних властивостей та міцнісних характеристик покриттів.

3. Побудовані за результатами експерименту регресійні залежності інтенсивності зношування від технологічних факторів нанесення покриття, що мають адекватні статистичні показники і дозволяють проводити обчислювальні розрахунки з метою дослідження та розробки оптимальних властивостей покриттів. Таким чином, проведення оптимізації детонаційних покриттів дозволяє встановити поєднання технологічних та експлуатаційних факторів, які забезпечують отримання покриттів з заданими властивостями (сумарна витрата робочої суміші 30 - 40 л/хв., подача порошку 190 - 229 г/п та дистанція напилення 130 - 150м.).

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРТЯ ТА ЗНОШУВАННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ В УМОВАХ ВІДСУТНОСТІ МАСТИЛА

Вибір матеріалів для надійної роботи кінематичних пар авіаційної техніки напряму залежить від всебічного вивчення їх властивостей, умов експлуатації, механізмів зношування, що дає можливість науково пояснити процеси зносу та опору пошкоджуваності.

Дослідження процесів тертя та зношування показують, що основними критеріями, які впливають на надійність роботи кінематичної пари, є сукупність взаємопов'язаних факторів, зокрема: швидкості ковзання, тиску в контакті, геометрії контакту, температури, властивостей середовища тощо.

Вивчення закономірностей тертя та зношування, умов та видів експлуатаційних пошкоджень детонаційних покриттів, які працюють при відсутності мастильного матеріалу, є дуже важливим питанням, оскільки ефективність експлуатації кінематичних пар напряму залежить від структури та фазового складу матеріалів покриття. Особливу увагу слід звернути на процеси схоплювання, які є одними з найбільш небажаних видів поверхневого руйнування, та можуть виникати в даних умовах тертя, що особливо проявляється при невисоких швидкостях ковзання, значних навантаженнях та високих температурах. Дослідження закономірностей структурних і фазових змін, механізмів тертя, обумовлюючих пластичну деформацію в умовах тертя при відсутності мастильного матеріалу, є важливою задачею, вирішення якої дає можливість керувати процесами тертя та зношування детонаційних покриттів системи Cr-Si-B та використовувати їх в якості високоефективних зносостійких матеріалів.

Важливими характеристиками, які впливають на зносостійкість покриттів, є підбір технологічних параметрів нанесення покриттів, оскільки саме від правильного їх підбору в кінцевому результаті залежить якість та ресурсність покриття, що впливає на кінцеву безпеку експлуатації авіаційної техніки.

3.1. Вплив швидкості ковзання на поверхневе зношування.

Підбір оптимальної складової зносостійких детонаційних покриттів, що розроблені та досліджені в роботі, напряду залежать від хімічних властивостей початкових складових. В якості основи матеріалу використовується хром, що має достатньо високу твердість і міцність, однак внаслідок крихкості не може бути використаним в якості матеріалу для отримання захисних зносостійких покриттів. Введення в матеріал домішок кремнію та бору призводить до зменшення крихкості та підвищує пластичність і адгезійні властивості матеріалу [68]. Склад та властивості зносостійкого детонаційного покриття наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1.

Склад та властивості зносостійкого матеріалу

№ п/п	Склад матеріалу, мас.%			Коефіцієнт тертя $\pm 0,002$	Інтенсивність зношування, $\pm 0,8$ мкм/ км	Міцність на згин, МПа
	Cr	Si	B			
1	65	28	5	0,15	5,3	790
2	62	25	10	0,09	4,9	830
3	60	23	12	0,06	3,5	870
4	58	21	17	0,08	4,2	890
5	56	19	21	0,14	5,7	810

Оптимізація вибору композиції проводилась шляхом оцінки впливу компонентів на їх структурні властивості, що визначались по структурним ознакам, а також по проведенні серії досліджень. Як видно з таблиці 3.1., мінімальними значеннями коефіцієнту тертя, інтенсивності зношування та оптимальними значеннями міцності на згин володіє детонаційний композиційний зносостійкий матеріал у співвідношенні компонентів: Cr(60)-Si(23)-B(12).

Ефективна роботоздатність даного детонаційного покриття залежить від зовнішніх факторів, що впливають на роботу пари тертя та визначають протікання процесів активації та пасивації при навантаженні тертям. Одним з ключових факторів є швидкість ковзання, яка суттєво впливає на інтенсивність зношування [69, 70]. Результати досліджень, що визначають функціональну залежність інтенсивності зношування від швидкості ковзання, представлені на рис. 3.1.

Випробування проводилися при навантаженні $P=5,0$ МПа. Найменші значення інтенсивності зношування характерні для детонаційних покриттів на основі Cr-Si-B і твердого сплаву ВК-15, для яких у всьому діапазоні швидкостей ковзання спостерігається режим нормального механохімічного зносу, що характеризується малими величинами зносу і низьким коефіцієнтом тертя [71].

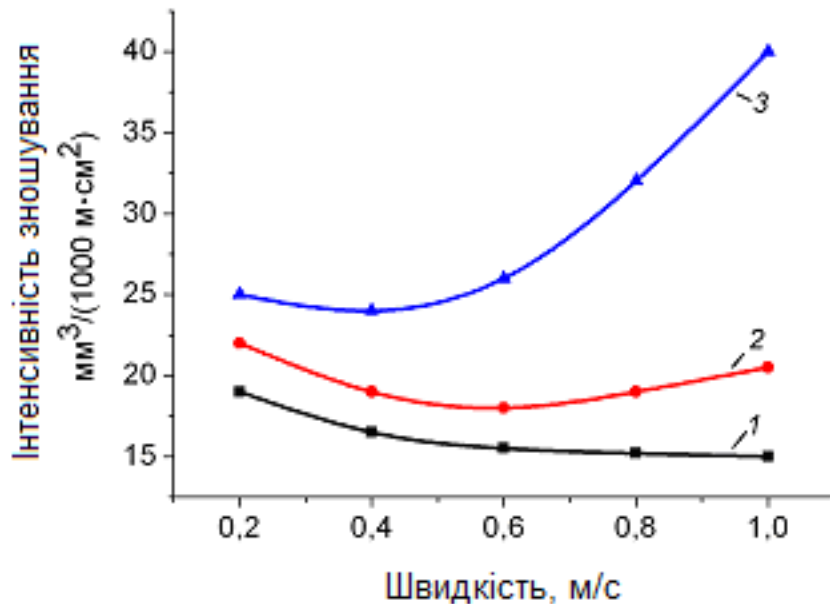


Рис. 3.1. Залежність інтенсивності зносу покриттів від швидкості ($P=5,0$ МПа): 1 – ВК-15; 2 – Cr-Si-B; 3 – Ni-Cr-Al-B.

Важливим є той факт, що збільшення швидкості не впливає суттєво на інтенсивність зношування покриття на основі Cr-Si-B. Поверхні тертя не характеризуються значними пошкодженнями, на них видно лише сліди спрямованої пластичної деформації без явних ознак захоплення (рис. 3.2). Дослідження проводилися при постійному навантаженні $P=0,5$ МПа і швидкості ковзання $V=0,5$ м/с. Отримані результати дослідження, в повній мірі відповідають експериментальним та теоретичним дослідженням впливу зовнішніх чиників на зміну поверхневої міцності матеріалу в умовах тертя.

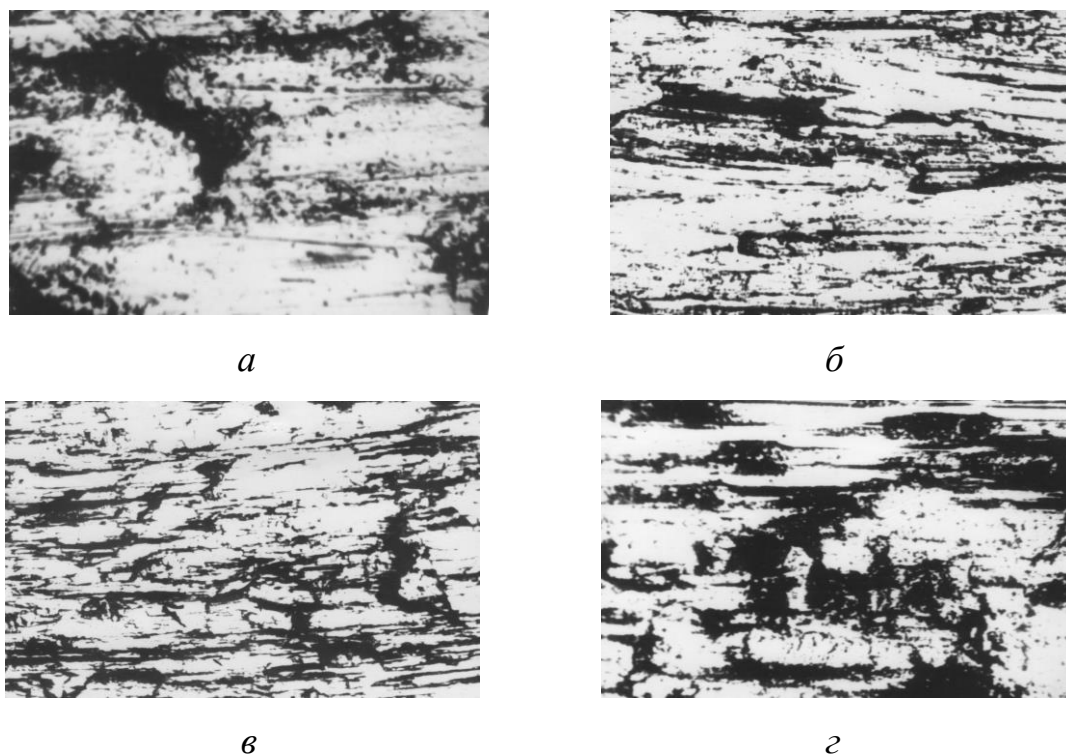


Рис. 3.2. Мікрофотографії поверхонь тертя покриттів на основі Cr-Si-B в парах тертя зі зразками із сталі 45 при швидкостях ковзання ($P=0,5$ МПа): *а* – 0,2 м/с; *б* – 0,6 м/с, *в* – 0,8 м/с; *г* – 1,0 м/с (x320)

В роботах [72, 73] показано, що процес механохімічної адаптації матеріалів при терті приводить до утворення вторинних структур першого і другого типу, і їх формування відбувається при комплексному впливі деформації, нагріву, дифузії. В роботах [74, 75] доведено, що процес тертя призводить до утворення в результаті ущільнення і спікання захисних плівок, які суттєво полегшують опір змищенню. Кінетика розповсюдження пластичної деформації при терті розглянута в роботах [76, 77]. Зміна щільності дефектів напряму залежить від умов тертя, окрім цього проходять процеси розчинення і утворення зміцнюючих структур [78]. Структурний і хімічний склад шарів, що взаємодіють в процесі тертя, є основним аспектом фізики поверхневих явищ, однак він потребує подальших всебічних вивчень.

При дослідженні трибофізичних явищ в умовах нормального тертя доцільне виділення декількох характерних зон пластичної деформації, а саме, контактної

зони, що має субмікроскопічну товщину, при поверхневого шару мікроскопічного масштабу і поверхневої зони, що має розміри при поверхневих структур [79].

Приповерхневий шар, як багатомасштабний рівень поверхневої взаємодії, представляє собою деформаційну область мікроскопічного масштабу, яка зазнає інтенсивного деформаційного і теплового впливу терті. Формування властивостей зони фрикційного контакту і приповерхневих шарів під дією деформацій зсуву знаходиться в тісному зв'язку з дислокаційними процесами, наявність і розподіл дислокацій має великий вплив на тепловий рух, процеси дифузії і фазові зміни.

Таким чином, вивчення поверхневих структур покриттів Cr-Si-B (рис.3.2) досліджуваних в умовах відсутності мастильного матеріалу, показало, що поверхня тертя має фрагментарну структуру зі слідами незначного пластичного деформування, що відповідає режиму нормального механохімічного зносу. Дослідження показали, що при збільшенні швидкості ковзання в умовах механохімічного зношування, характер дислокаційної структури поверхневого шару змінюється несуттєво, у зв'язку з тим, що зміщення границь деформованих частинок можливо лише після дифузійного перерозподілу легуючих елементів і зміцнюючих фаз, коли їх стримуючий вплив зменшується і починається збільшення зерна. Однак в більшості випадків границя частинок є бар'єром не тільки для зміщення дислокацій, але й для зміщення границь та росту зерен. Розмір кінцевого зерна в основному близький до розміру початкових частинок порошку, однак орієнтація зерен в процесі тертя суттєво відрізняється від початкової.

Таким чином, формування поверхневих плівок вторинних структур обумовлено фазовим і хімічним складом поверхневого шару, характерною особливістю якого є зміни, пов'язані з впливом механічних і теплових імпульсів, а також дифузійних процесів легуючих елементів і атмосферного кисню, обумовлюючих фазові зміни, перерозподіл структурних складових і утворення при терті високодисперсної гетерогенної квазікристалічної зносостійкої структури, що зберігає свої властивості при зміні швидкості ковзання.

3.2. Особливості зносу композиційних покриттів в умовах важконавантаженого контакту.

Одним з важливих виробничих факторів, який має безпосередній вплив на процеси в контактній зоні, є величина робочого навантаження [80]. На даний час прикладні задачі поверхневої міцності покриттів при складному напруженому стані, обумовленому впливом навантаження, залишаються одним з найбільш важливих розділів теорії міцності і оцінюються з урахуванням цілого ряду впливаючих факторів [81].

Таким чином, аналіз причин, обумовлюючих рівень структурно-термічної активації, а також факторів, впливаючих на її розвиток, встановлюють пряму залежність зовнішніх механічних впливів з процесами пластичної деформації, інтенсивність яких визначається не тільки властивостями взаємодіючих при терті поверхонь і характером явищ, які протікають в контактній зоні, але й в значній мірі залежить від тиску. Таким чином, навантаження, що має позитивну силу, є одним з важливих факторів, що обумовлює розвиток процесів експлуатаційної пошкоджуваності при терті контактних поверхонь.

Відомо [82], що процес схоплювання є одним з найбільш небажаних видів поверхневого руйнування, особливо інтенсивно проявляється при невеликих швидкостях ковзання та значних навантаженнях. Дослідження закономірностей структурних змін і механізмів, контролюючих пластичну деформацію в умовах важконавантаженої контактної взаємодії, представляє собою важливу задачу, рішення якої дає можливість керувати процесами тертя і зношування детонаційних покриттів і сприяє їх раціональному застосуванню в екстремальних умовах експлуатації.

Аналіз отриманих результатів тертя покриттів системи Cr-Si-B показав, що характеристики металевих фаз напиленого шару, а також отримання вторинних структур з певними властивостями істотно залежать від хімічного складу вихідного матеріалу. Спочатку експериментальним шляхом визначали оптимальний вміст кремнію в системі. Для цього на основу напилювали

композиційний матеріал Cr-Si з різним процентним вмістом Si, після цього визначали мікротвердість отриманих покриттів [70]. Характер зміни мікротвердості в залежності від вмісту Si, показаний на рис 3.3.

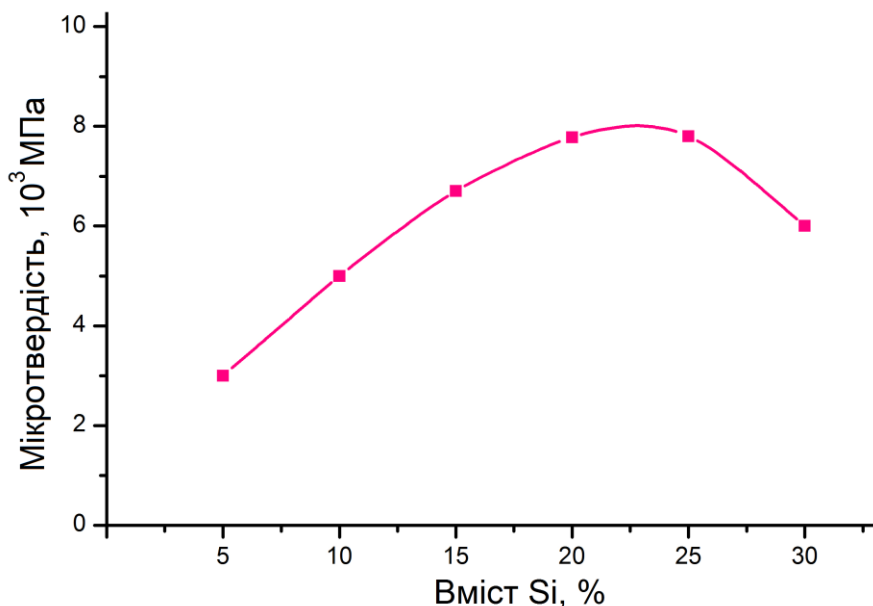


Рис. 3.3. Характер зміни мікротвердості в залежності від вмісту Si.

Як видно з графіка, найбільшу мікротвердість має детонаційне покриття системи Cr-Si з вмістом кремнію 23%. Приймаючи даний вміст Si в системі постійним, визначаємо оптимальний вміст бору. Для цього наносили на сталеву основу детонаційно-газовим методом композиційні порошки Cr-Si-B. Залежність інтенсивності зношування та мікротвердості від вмісту бору проілюстрована на рис. 3.4.

Найменшими значеннями інтенсивності зношування характеризуються за даних умов випробувань покриття, отримані з композиційного матеріалу, що містить 12% бору. Ці ж покриття мають найбільшу мікротвердість - 7-8 ГПа. Зміна фізико-механічних властивостей при зміні фазового складу покриття показано в таблиці 3.2. Як видно, введення бору до складу композиційного порошку значно покращує фізико-механічні властивості покриттів: збільшується межа міцності до руйнувань, міцність зчеплення з основою і мікротвердість.

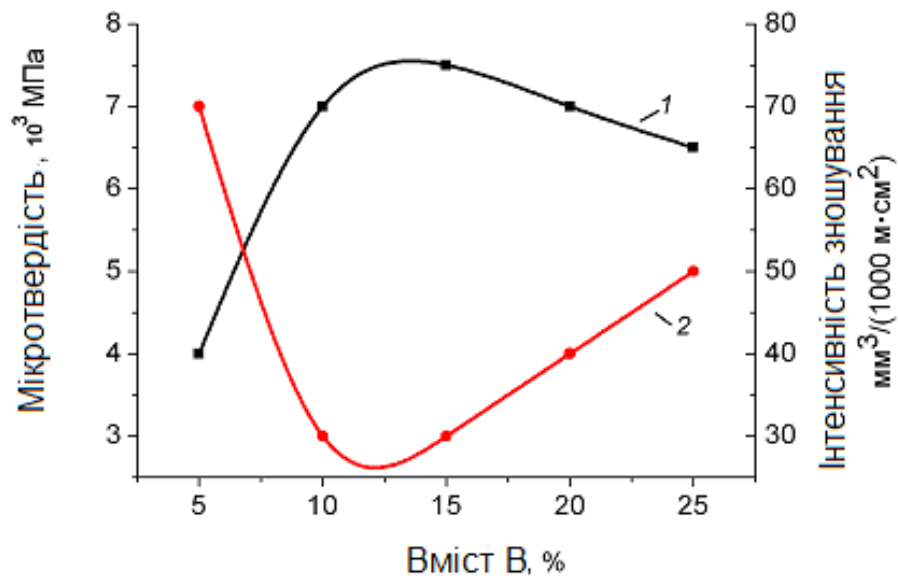


Рис. 3.4. Залежність мікротвердості (1) і інтенсивності зношування (2) покриття від вмісту В.

Це пояснюється формуванням при нанесенні покриттів тугоплавких боридних фаз типу: CrB , Cr_2B , Cr_3B_4 , CrB_2 . Взаємодія хрому і кремнію призводить до утворення твердих зносостійких силіцидів хрому CrSi , Cr_2Si_3 , CrSi_2 . Рентгеноструктурний аналіз виявив також наявність твердих розчинів бору в хромі і кремнії і твердого розчину кремнію в хромі.

Таблиця 3.2.

Зміна фізико-механічних властивостей при зміні фазового складу

Покриття	Товщина, мм	Поріг міцності до руйнування, ГПа	Міцність зчеплення з основою, МПа	Мікротвердість, ГПа
Cr-Si	0,11–0,20	0,65–0,78	50–83	7,0–7,7
Cr-Si-B	0,11–0,20	0,79–0,87	74–92	7,5–7,9

Таким чином, бориди і силіциди, що представляють собою дисперсні частинки, перешкоджають процесам пластичної деформації. Крім того, вони частково розчиняються в хромі і підвищують енергію зв'язку в атомах, що входять в твердий розчин. Все це сприяє підвищенню зносостійкості покриттів, навантажених тертям. При дослідженні зносостійкості композиційних

детонаційних покриттів для порівняння в таких же умовах і за аналогічними програмами досліджувалися зразки з детонаційними покриттями з порошку вольфрамового сплаву ВК-15 та на основі ніхрому, додатково легованого бором і алюмінієм (ри. 3.5.).

Найменшими значеннями інтенсивності зносу, характеризуються за даних умов досліджень детонаційні покриття на основі Cr-Si-B, має місце стійкий процес механохімічного зношування. Збільшення температури практично не погіршує характеристики тертя і зносу, так як на поверхні відбувається інтенсивне утворення структур, що мають високі антифрикційні властивості. Примусове нагрівання інтенсифікує процеси взаємодії поверхні тертя з киснем повітря, в результаті чого утворюються плівки вторинних структур. Природа їх утворення залежить від умов тертя, матеріалів пари і складу середовища в зоні контакту. При терті в нормальних атмосферних умовах на поверхні утворюються тонкі плівки окислів [83].

Стабільність боридів менша ніж окислів. Продуктами окислення боридів є окисли металу і борний ангідрид. Можна припустити, що плівка оксиду на робочих поверхнях складається зі шпінелі Cr_2O_3 , B_2O_3 і окислів Cr_2O_3 , SiO. В даному випадку окисли зв'язуються борним ангідридом в аморфну плівку, що володіє високими зносостійкими властивостями. Наявність B_2O_3 , як підкреслювалося, обумовлено тим, що вищі бориди хрому при взаємодії з киснем навколишнього середовища розпадаються на оксид хрому і борний ангідрид, який при підвищених температурах має малу в'язкість і дуже активно взаємодіє з іншими оксидами [83].

Підвищення температури випробувань практично не впливає на інтенсивність зношування покриття на основі Cr-Si-B, має місце стійкий процес механохімічного зношування. В процесі випробувань ніхрому встановлено, що нагрів зразків більше ніж $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ збільшує інтенсивність зношування в результаті теплових перевантажень, що обумовлюють утворення в тонких поверхневих шарах точок схоплювання.

Для детонаційних покриттів з вольфрамового твердого сплаву ВК-15 при температурі 520 - 550 °С відбувається інтенсивне окислення карбіду вольфраму і розм'якшення зв'язків, що обумовлює зниження триботехнічних властивостей покриттів. Залежність інтенсивності зношування від навантажень проілюстрована на рис. 3.5. Випробування проводилися при $V = 0,5$ м/с.

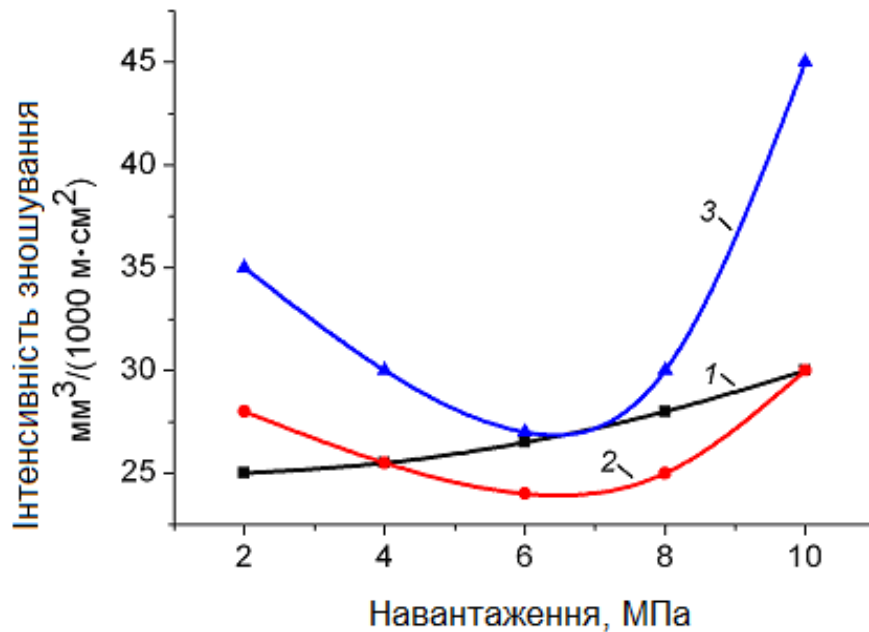


Рис. 3.5. Залежність інтенсивності зношування покриттів від навантаження ($V=0,5$ м/с): 1 – ВК-15; 2 – Cr-Si-B; 3 – Ni-Cr-Al-B.

Аналізуючи експериментальні дані можна відзначити наступне. Характерним є незначне збільшення зносу з ростом навантаження. Зростання питомого тиску обумовлює збільшення фактичної площі контакту, посилення молекулярного взаємодії поверхонь. Інтенсивність зношування при цьому дещо зростає.

Так, інтенсивність зношування покриття з легованого ніхрому при збільшенні навантаження до 8 МПа практично не зростає. Подальше збільшення навантаження обумовлює більш-менш рівномірне зростання інтенсивності зношування, що пояснюється якісною зміною виду зносу і появою точок схоплювання.

Збільшення навантаження не впливає суттєво на інтенсивність зношування детонаційних покриттів на основі композиційного матеріалу Cr-Si-B. Така висока

працездатність покриття обумовлюється протіканням в широкому діапазоні навантажень універсального явища структурної пристосованості при терті. Поверхневий шар покриття в результаті пластичної деформації при терті переходить в термодинамічно неврівноважений активований стан, з якого шляхом адсорбційно-дифузійної і хімічної взаємодії з навколишнім середовищем намагається перейти в пасивний стан. В результаті цієї взаємодії утворюються гетерофазні тонкоплівкові вторинні структури [83]. За даними рентгенофазного аналізу вони представляють собою суцільну і щільну плівку складу SiO_2 , Cr_2O_3 і V_2O_5 .

Металографічний аналіз і профілографування свідчать про те, що поверхня тертя покриття Cr-Si-V має достатню чистоту і характеризується відсутністю помітних пошкоджень (рис.3.7). Окремі джерела схоплювання, що виникають в даних умовах тертя, локалізуються в тонких поверхневих шарах.



Рис. 3.7. Профілограма поверхні тертя покриття на основі Cr-Si-V при 8 МПа; $\text{V}3 \times 1000$; $\text{Г}3 \times 40$.

Утворення вторинних структур відбувається в певному діапазоні режимів тертя при наявності динамічної рівноваги процесів активації і пасивації. Якщо, в силу впливу зовнішніх умов, динамічна рівновага зсувається в бік збільшення енергії активації, то не утворюється досить міцного і зносостійкого шару вторинних структур, що захищають основний матеріал пари тертя від безпосередньої взаємодії, і процес тертя відбувається в умовах ушкоджень, тоді має місце схоплювання.

3.3. Формування зносостійких покриттів в умовах підвищених температур.

Характерною особливістю більшості рухомих сполучень деталей машин, що працюють в умовах тертя, є необхідність збереження вихідних робочих і технологічних параметрів при підвищених температурах, які виникають в процесі експлуатації. Температура, як один з експлуатаційних факторів, важливий показник умов тертя, а теплові процеси, що виникають при цьому, безпосередньо впливають на формування фізико-хімічних і механічних властивостей поверхневих шарів.

Відповідно до сучасних положень науки про тертя і зношування матеріалів, триботехнічні параметри, що характеризують контактну взаємодію, визначають, головним чином, стани і властивості поверхневих шарів. І в загальному комплексі заходів, спрямованих на розробку методів підвищення ефективності експлуатації транспортних засобів, їх трибофізичних систем і обладнання, важливого значення набувають технології поверхневого зміцнення та сучасні композиційні матеріали.

Дослідження закономірностей тертя та зношування розроблених покриттів системи Cr-Si-B в умовах підвищених температур проводились при $V=1,5$ м/с, $P=5,0$ МПа, на універсальній машині тертя типу УМТ-1, наносили покриття на модернізованій установці "Дніпро-3" на кільцеві зразки зі сталі 45 (структура сорбіт-тросит) товщиною 0,20 - 0,25 мм і шорсткістю $R_a = 0,32 - 0,63$.

Розкриття взаємозв'язку між властивостями матеріалів в умовах тертя, їх структурою, впливом зовнішніх чинників, що визначають надійність і працездатність трибосистем, можливо шляхом застосування фізико-хімічних методів аналізу їх робочих поверхонь. Рентгенофазовий аналіз досліджуваних покриттів здійснювався за допомогою дифрактометра "Дрон-УМ1". Зйомка проводилася з використанням Со-випромінювання, напруга 25 кВ, струм 15 мА. Вивчення фізико-хімічних властивостей, мікрофазового аналіз проводили на електронному скануючому мікроскопі "Camscan". Для хімічного аналізу вторинних структур використовувалася програма ZAF-4FLS. Металографічні

дослідження виконували на мікроскопі МІМ-8 і мікротвердомірі ПМТ-3 при навантаженні 0,5 Н. Температура вимірювалася на відстані 1 - 2 мм від поверхні тертя хромель-копелевими термопарами.

Обґрунтований вибір раціональної композиції Cr-Si-B для напилення зносостійких покриттів забезпечує їх оптимальну структурну пристосованість та впливає на закономірності явища структурної пристосованості, що є основним з головних шляхів мінімізації показників тертя. При цьому їх оптимальний склад обумовлює оцінку впливу компонентів на структуру і властивості, яку здійснювали за структурною ознакою. Вибір якості вихідної сировини порошку хрому, що є стандартним матеріалом, обумовлений можливістю його багаторазового легування особливо, елементами з органічною розчинністю. На рис. 3.8. наведені залежності впливу вмісту кремнію і бору на мікротвердість (H_{μ}) і інтенсивність зношування (I).

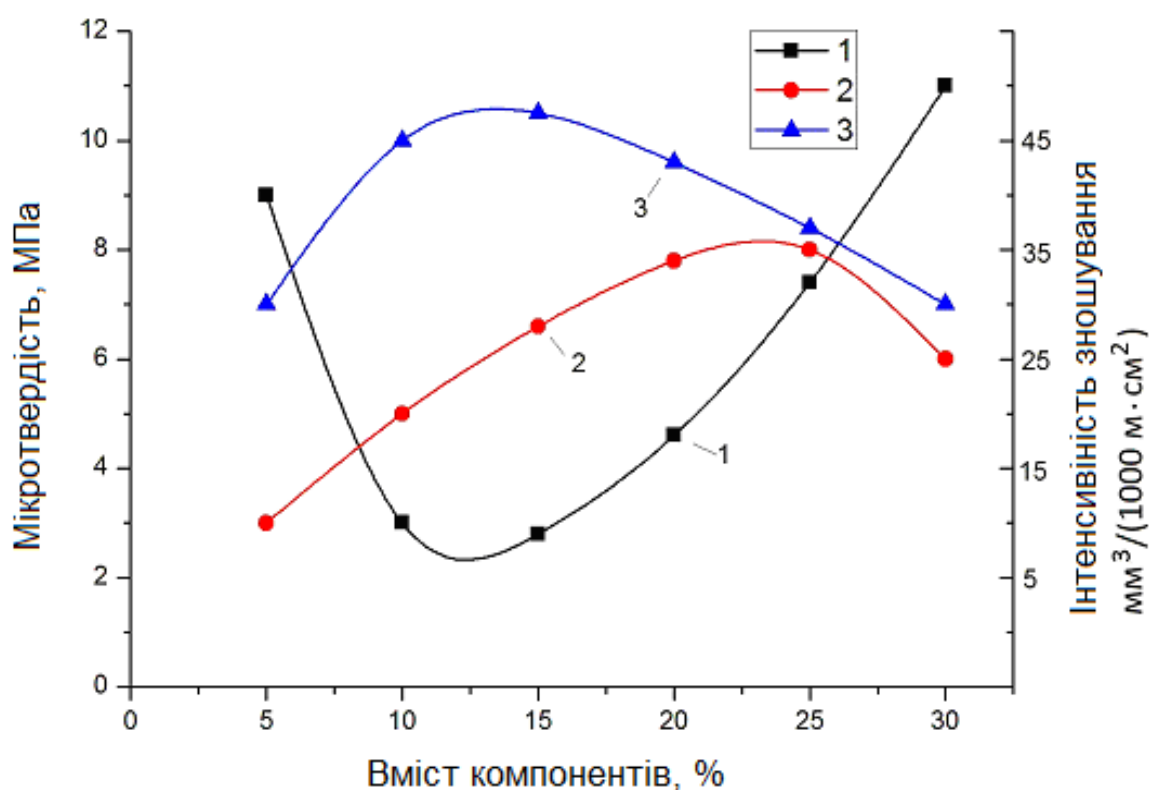


Рис. 3.8. Характер зміни мікротвердості (2) від вмісту Si, і залежність мікротвердості (3) і інтенсивності зношування (1) покриття Cr-Si від вмісту B.

Як видно з графіка, максимальну мікротвердість мають детонаційні покриття Cr-Si при вмісті кремнію $\sim 25\%$, при цьому механічні властивості отриманого матеріалу можуть бути підвищені шляхом додаткового легування бором, оптимальний вміст якого, як встановлено, відповідає $\sim 12\%$. Введення кремнію і бору, що входять в твердий розчин хрому і зміцнюють його, сприяє утворенню складнолегованих високотемпературних сполук, що викликають дисперсне твердіння, завдяки чому опір зносу внаслідок утворення зміцнюючих фаз з високою термодинамічною стабільністю підвищується. Таким чином, позитивний вплив на структуру і властивості покриттів легуючі елементи надають, як встановлено в процесі випробувань, лише за певних концентрацій, оптимальне значення яких визначено експериментально.

Важливого значення в забезпеченні високої якості багатокомпонентних покриттів, має вплив технологічних параметрів напилення. Була проведена серія експериментів по визначенню впливу співвідношення робочих газів і ступеня заповнення стовбура газовою сумішшю на експлуатаційні характеристики покриттів. На рис. 3.9. приведена залежність інтенсивності зношування від заповнення стовбура газовою сумішшю на основі ацетилену і кисню при співвідношенні 1:1. Як видно напилення при витратах робочих газів в співвідношенні для ацетилену і кисню 20/25-22/27 забезпечує незмінність хімічного складу і параметрів процесу напилення обумовлює сталість властивостей покриттів, відносна щільність яких $\sim 99\%$.

Дані мікрорентгеноспектрального аналізу, отримані в результаті оптимізації покриттів Cr-Si-B, дозволили класифікувати структури як тонкий конгломерат (більше 75% об'єму), який складають ультрадисперсні включення розмірами 1-3 мкм, збагачені бором, типу MeB_2 , MeB_4 , MeB_6 і MeB_{41} , структуру яких визначають атоми бору, що утворюють жорсткі підґратки з вираженими зв'язками B-B, також визначено наявність твердого розчину на основі ромбоєдричної решітки β -B. Крім того, встановлено присутність твердої боридної фази типу $(Cr, Si)_4B_5$, має рівномірні зерна інтерметалідних з'єднань силіцидів типу $MeSi$, $MeSi_2$, $MeSi_3$, а також боридів кремнію SiB_4 , SiB_6 і в'язкої двухфазної

хромо-борокремнієвої матриці. У таблиці 3.3. наведені зміни фізико-механічних властивостей покриттів при поетапному легуванні матеріалу основи.

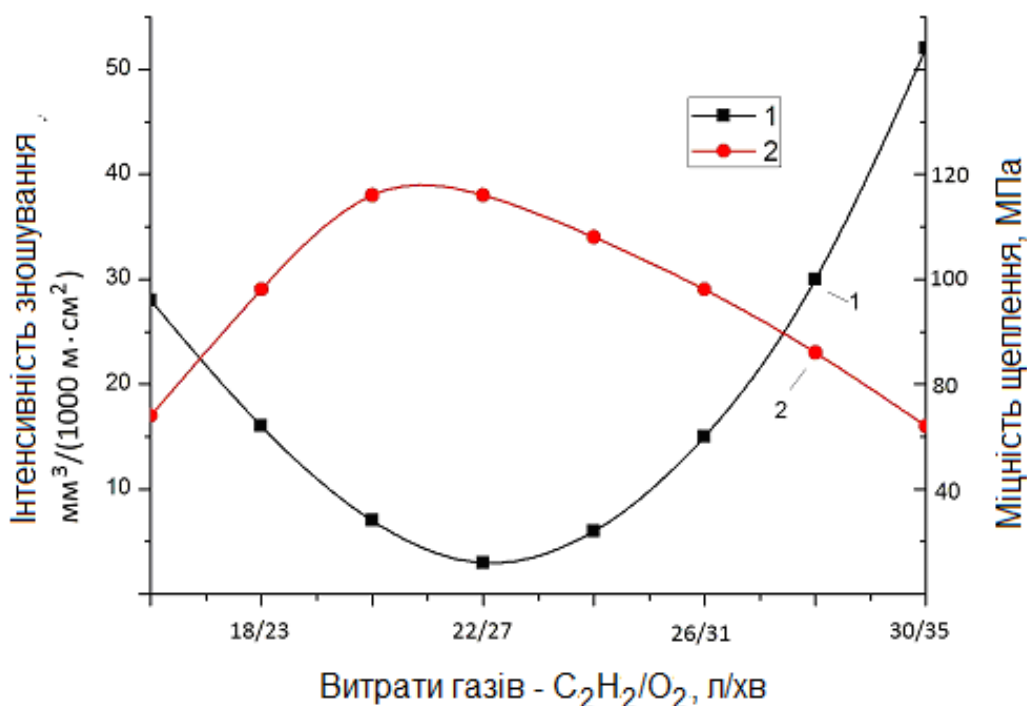


Рис. 3.9. Залежність інтенсивності зношування (1) і міцності щеплення (2) покриттів Cr-Si-B від витрат газової суміші.

Таблиця 3.3.

Фізико-механічні властивості покриттів

Склад покриття	Товщина, мм	σ_v , ГПа	σ_{zg} , ГПа	σ_{zch} , ГПа	H _ц , ГПа
Cr-Si	0,11-0,20	0,65-0,78	550-630	50-83	7,0-7,7
Cr-Si-B	0,11-0,20	0,79-0,87	670-840	74-92	7,5-7,9

Факторами, що мають основний вплив на характеристики досліджуваних покриттів, є, по-перше, структура і фазовий склад поверхневого шару і, по-друге, плівки, що утворюються при терті на поверхні, отже, вивчення їх будови і властивостей є необхідним сучасним аспектом фізичної трибології і представляє важливе прикладне та наукове значення для забезпечення сталого прояву нормальних механохімічних процесів.

Дані випробувань, що визначають функціональну залежність інтенсивності зношування від температури поблизу поверхонь тертя досліджуваних покриттів, представлені на рис. 3.10.

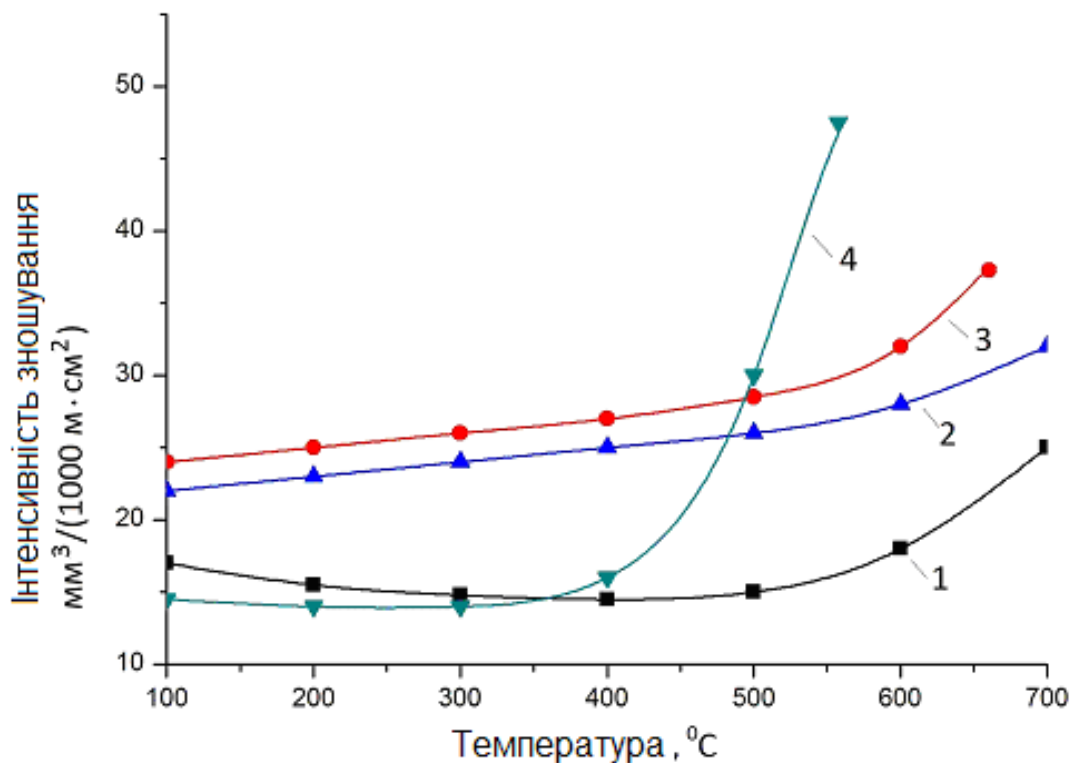


Рис. 3.10. Залежність інтенсивності зношування від температури: 1 - Cr-Si-B; 2 – Al₂O₃-Cr₂O₃; 3 – Ni-Cr-Al-B; 4 – WC-Co (V=1,5 м/с; P=5,0 МПа).

Для отримання всебічної інформації при вивченні тонких поверхневих шарів, в яких протікають процеси структурно-термічного активування, додатково був використаний метод вторинно-іонної мас-спектрометрії (ВІМС) [86]. Дана методика дозволила проаналізувати зміну мікроструктури в тонких поверхневих шарах, встановити природу фаз, їх кристалічну структуру і параметри елементарної комірки, необхідні для ідентифікації фаз і складу в межах області їх однорідності, при цьому вторинні іони, які вибираються з поверхні зразка, досліджувалися квадрупольним аналізатором мас. При аналізі реєструвалися спектри позитивних вторинних іонів в діапазоні мас 0 - 100 а.о.м. Для підвищення чутливості використовувався динамічний режим роботи. Було підтверджено, що мікроструктура поверхневих плівок, що екранують адгезійну взаємодію в зоні

трибоконтakta, має дрібнодисперсну будову і складається з суміші фаз композиційного покриття і продуктів їх взаємодії з киснем повітря. За стехіометричним складом структура являє складний важкоактивованний комплекс у вигляді дрібнодисперсної суміші оксидів Cr_2O_3 , SiO_2 , B_2O_3 і складних фаз типу силіцидо-оксидів CrSi_2O_4 і хроматів SiCrO_2 , які в умовах контактного тиску і температур, обумовлюють механохімічне легування та утворюють тонкоплівкові гетерогенні термостійкі поверхневі структури. Крім того, накладення концентраційних максимумів спектрів мікрорентгеноспектрального аналізу вказує на ймовірність існування твердих розчинів типу $\text{Cr}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$, $\text{Cr}_2\text{O}_3 - \text{B}_2\text{O}_3$. Наявність термічно стійкого борного ангідриду (B_2O_3), який утворюється при взаємодії вищих боридів хрому і кисню навколишнього середовища, що є хімічно активною формою борної кислоти, перетворює оксид хрому в метаборат типу $\text{Cr}(\text{BO}_2)_2$, що сприяє утворенню в'язкої щільною "глазурі", і також перешкоджає адгезійно-молекулярній взаємодії, виконуючи роль твердого мастила, і сприяє акомодатії зернограничного ковзання. Таким чином, формування поверхневих плівок вторинних структур обумовлено фазовим і хімічним складом поверхневого шару, характерною особливістю стану якого є зміна мікротвердості до 7,5-7,9 ГПа при початковій $5 \pm 0,5$ ГПа, пов'язані з впливом механічних і теплових імпульсів, а також дифузійних процесів легуючих елементів і атмосферного кисню, які обумовлюють фазові перетворення, перерозподіл структурних складових і утворення при терті високодисперсної гетерогенної квазірівноважної зносостійкої структури. Слід зазначити, що за своєю будовою досліджувані тонкоплівкові об'єкти вторинних структур близькі до структури дисперснозміцненого композиційного матеріалу. Як відомо, такі матеріали мають унікальне поєднання високої пластичності і міцності, мають високу стабільність даних характеристик в часі. На рис. 3.11. представлена електронограма, що відображає зміни тонкої структури досліджуваного покриття в процесі пластичної деформації при терті. Характер розподілу дисперсних включень стрічковий і має орієнтацію в напрямку силових впливів при навантаженні тертям, що є підтвердженням формування

зносостійких поверхневих структур шляхом реалізації механізмів самоадаптації [87].

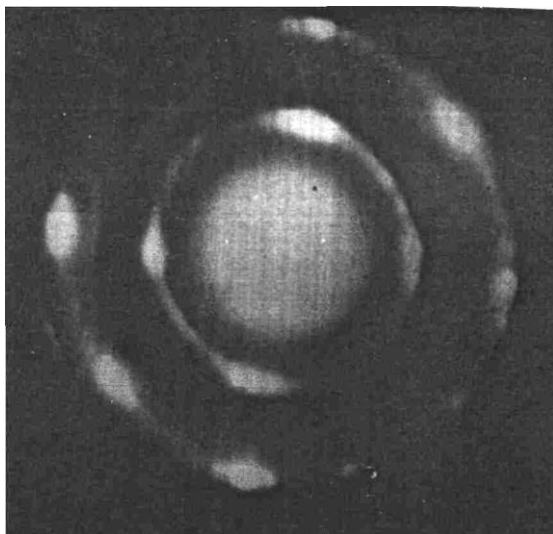


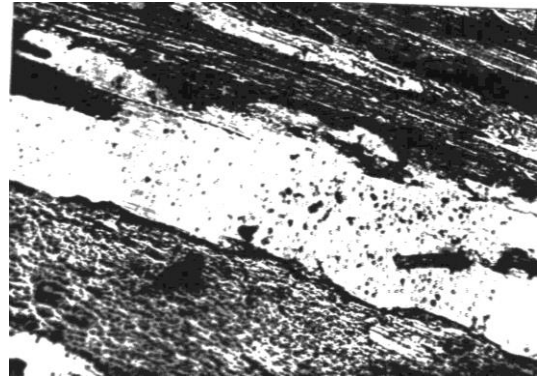
Рис. 3.11. Електронограма поверхні тертя покриття Cr-Si-B після випробувань при температурі 500⁰C (x60000).

Металографічний аналіз і профілографування зразків свідчить, що поверхні тертя відрізняються відсутністю помітних пошкоджень, окремі осередки захоплення, що виникають за даних умов тертя, локалізуються в найтонших поверхневих шарах (рис. 3.12, 3.13).

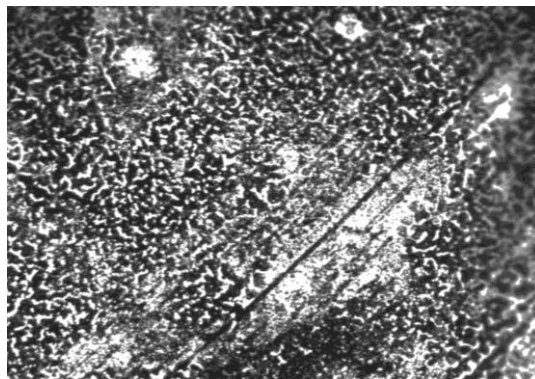
З енергетичної точки зору дану трансформацію вторинних структур можна розглядати в якості адекватних елементарних механізмів адаптації поверхневих шарів в процесі структурної пристосованості системи тертя. Так, з одного боку, внаслідок статистичних закономірностей фазоутворення фрагментація вторинних структур на різних ділянках контактних поверхонь не збігається, їх адитивний розподіл представляє стійкий структурно-тимчасовий стан, з іншого - формування структури поверхневого шару не є індетермінованим, а керується мінімальними принципами дисипативних процесів [87].



a



б



в

Рис.3.12. Вид поверхонь тертя покриттів Cr-Si-B після випробувань при температурах (x320: *a*) 200 °C; *б*) 350 °C; *в*) 650 °C).

З підвищенням температури комплекс поверхневих явищ інтенсифікується, що обумовлено спотворенням кристалічних решіток при пластичній деформації за рахунок флуктуючих напружень, що виникають при терті, крім того, поява точкових і багатовимірних дефектів активує трибохімічні реакції.

В результаті при досягненні критичного значення температури, яка для випробовуваного покриття (крива 1, рис. 3.15) складає ~ 700 °C, виникають деструкційні процеси, що обумовлює перехід до неприпустимих явищ пошкоджуваності (рис. 3.14).

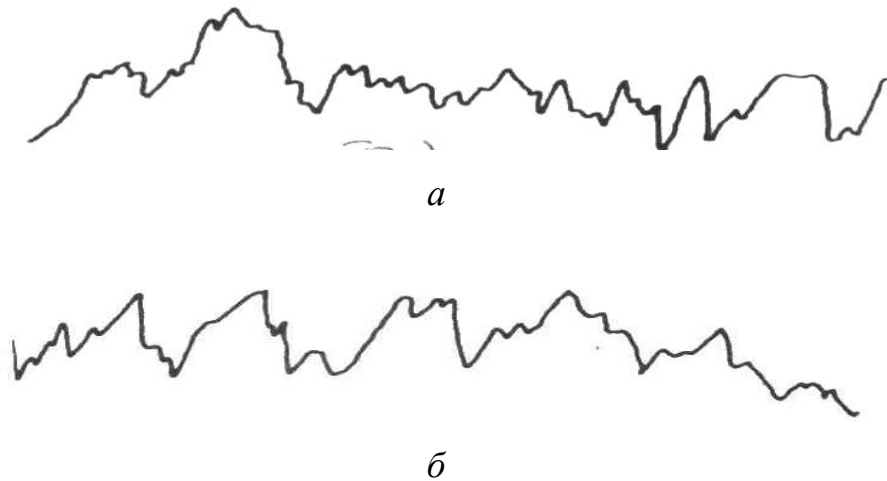


Рис. 3.13. Профілограми поверхонь тертя покриттів Cr-Si-B, випробуваних при температурах: *a*) 350 °C; *б*) 650 °C (ВЗх1000; ГЗх40).

Для покриттів системи Al_2O_3 - Cr_2O_3 (крива 2, рис. 3.15) гранична критична температура при даних умовах тертя становить ~ 700 °C, у покриттів типу Ni-Cr-Al-B (крива 3, рис. 3.15) діапазон нормального тертя обмежується температурою ~ 650 °C, а покриття WC-Co (крива 4, рис. 3.15) зберігають працездатність до 530 °C.



Рис. 3.14. Поверхня тертя покриття Cr-Si-B ілюструєфрагмент руйнування при температурі 700 °C (x320).

Тонкоплівковий конгломерат оксидних фаз, що перешкоджає адгезійно-молекулярній взаємодії контактних поверхонь, являє собою складний об'єкт, інтегральні властивості якого в свою чергу залежать від характеристичних особливостей і індивідуальних властивостей простих оксидів як самостійних

одиниць, властивості яких можуть бути досліджені в термінах своєрідності їх структур.

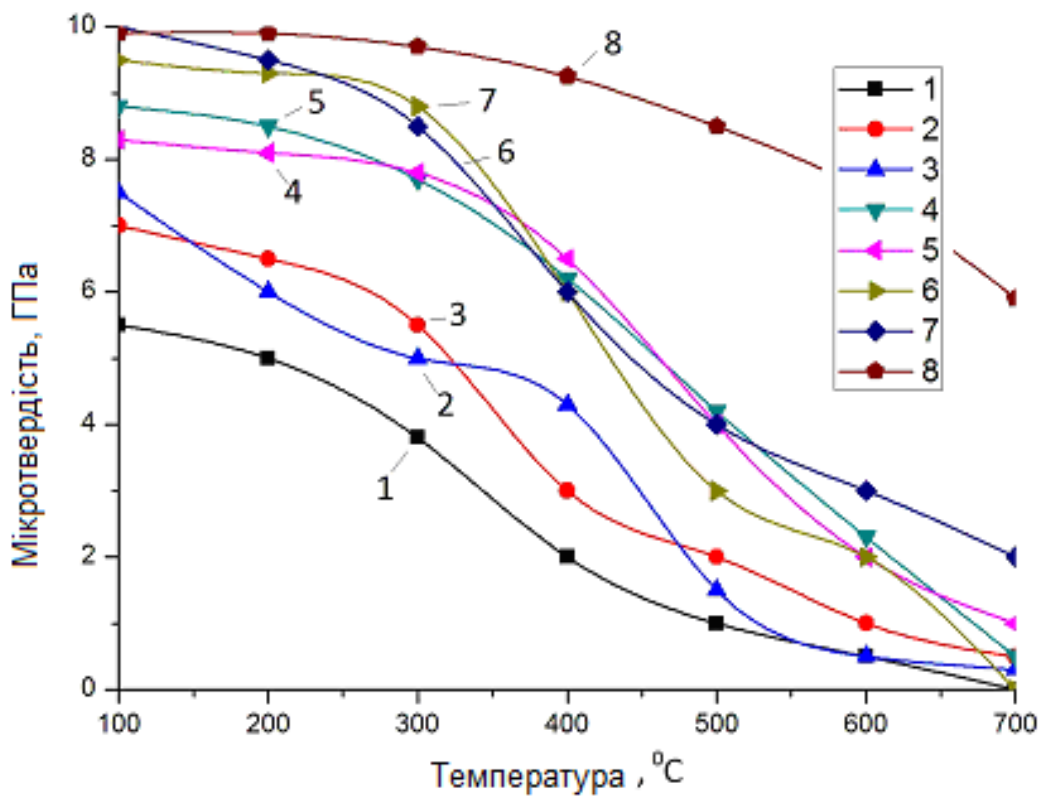


Рис. 3.15. Залежність мікротвердості оксидних плівок компонентів, що входять до складу покриття, від температури: 1 – B₂O₃; 2 – FeO-SiO₂; 3 – Cr₂O₃-B₂O₃; 4 – FeO-Cr₂O₃; 5 – CrO; 6 – SiO₂; 7 – Cr₂O₃-SiO₂; 8 – Cr₂O₃.

Мікротвердість оксиду хрому при підвищенні температури монотонно знижується. Мікротвердість метастабільних оксидів закису хрому з підвищенням температури зменшується при цьому закис хрому утворює оксид Cr₂O₃, при температурі близько 350 - 400 °C відповідно до реакції $2\text{CrO}_3 \rightarrow \text{Cr}_2\text{O}_3 + 1,5\text{O}_2$ переходить в Cr₂O₃, про що свідчить зміна мікротвердості, утворення Cr₂O₃ супроводжується також зменшенням об'єму. Мікротвердість термічно стійкого борного ангідриду поступово знижується аж до температури плавлення.

Мікротвердість поверхневих плівок, що представляють собою оксиди подвійних сполук типу шпінелей, як FeO-Cr₂O₃, FeO-SiO₂, Cr₂O₃-SiO₂, Cr₂O₃-B₂O₃,

при підвищенні температури монотонно зменшується, крім того, можна вважати, що шпінелі схильні до утворення твердих розчинів з простими оксидами як двовалентних, так і тривалентних металів. Встановлено, що мікротвердість силікатів заліза FeO-SiO_2 зменшується при всіх температурах, якщо в них розчинений хром.

В результаті дослідження мікротвердості оксидних структур, що утворюються в умовах високотемпературного зношування на поверхнях тертя детонаційних покриттів, можна відзначити деякі характерні особливості, а саме, досліджувані структури в залежності від хімічного складу можуть перебувати в різних станах. При підвищених температурах, оксидні структури переходять в більш стабільний стан, що обумовлює зміну їх механічних властивостей, що суттєво відрізняються від умов тертя в вакуумі [85, 88].

Залежність мікротвердості поверхневих структур від температури, як правило, монотонна, якщо вони не поліморфні, і стрибкоподібна, якщо відбуваються поліморфні перетворення або перетворення метастабільних станів в більш стабільні і стійкі при нагріванні і охолодженні. Перегини на кривих зміни мікротвердості в більшості плавні, так як в оксидних структурах розчинені і присутні частинки вкраплень і домішок, які суттєво впливають на мікротвердість, а отже, і на властивості оксидів як простих, так і складних складів.

При всьому різноманітті конструктивних форм і функціональних особливостей машин і механізмів, вимоги зносостійкості є загальним параметром, який визначає безвідмовність і довговічність. І створення універсального покриття для їх захисту і зносу обмежене тією ж проблемою, що і отримання зносостійкого монолітного матеріалу, що задовольняє всім вимогам, які реалізуються в практиці машинобудування.

Загальний інтерес в цій галузі нерозривно пов'язаний зі створенням нових матеріалів, при розробці яких враховувалися техніко-економічні обмеження, що обумовлюються вимогами виробництва, в тому числі витратою дефіцитних і дорогих компонентів. Вивчено склад, структура, трибостійкість покриттів Cr-Si-B з елементів ресурсної бази країни, встановлена їх висока адгезія, фізико-механічні

характеристики, опір зносу в умовах підвищених температур, відповідні жароміцні характеристики високолегованих матеріалів. Досліджено сучасними фізико-хімічними методами структура і властивості тонкоплівкових вторинних структур.

Застосування досліджуваних композиційних покриттів з метою підвищення зносостійкості вузлів тертя, як показали результати випробувань, забезпечує їх експлуатаційну надійність відповідно до вимог і можливостей, які відкриваються з розробкою нового конкурентоспроможного матеріалу для зносостійких покриттів, отриманих детонаційним методом.

Висновки по розділу 3.

1. При дослідженні процесів, протікаючих при зміні швидкості ковзання, встановлено, що інтенсивність зношування покриттів системи Cr-Si-B визначається як структурою, яка представляє собою мікродисперсну суміш тугоплавких сполук і досить пластичну матрицю, так і властивостями та характером оксидних плівок, що представляють собою складноактивованій комплекс оксидних структур.

2. Дослідження детонаційних покриттів в умовах важконавантаженого контакту показали, що збільшення навантаження не впливає суттєво на інтенсивність зношування детонаційних покриттів. Така висока працездатність покриття обумовлюється протіканням в широкому діапазоні навантажень універсального явища структурної пристосованості при терті. Поверхневий шар покриття в результаті пластичної деформації при терті переходить в термодинамічно неврівноважений активований стан, з якого шляхом адсорбційно-дифузійної і хімічної взаємодії з навколишнім середовищем намагається перейти в пасивний стан.

3. Дослідження мікротвердості оксидних структур, що утворюються в умовах високотемпературного зношування на поверхнях тертя детонаційних покриттів, показали деякі характерні особливості, а саме, досліджувані структури в залежності від хімічного складу можуть перебувати в різних станах. При

підвищених температурах, оксидні структури переходять в більш стабільний стан, що обумовлює зміну їх механічних властивостей. Залежність мікровердоті поверхневих структур від температури, як правило, монотонна, якщо вони не поліморфні, і стрибкоподібна, якщо відбуваються поліморфні перетворення або перетворення метастабільних станів в більш стабільні і стійкі при нагріванні і охолодженні. Перегини на кривих зміни мікротвердоті в більшості випадків плавні, так як в оксидних структурах розчинені і присутні частинки вкраплень і домішок, які суттєво впливають на мікротвердоті, а отже, і на властивоті оксидів як простих, так і складних сполук.

4. Застосування досліджуваних композиційних покриттів з метою підвищення зносостійкості вузлів тертя, що працюють в умовах відсутності мастильного матеріалу, як показали результати випробувань, забезпечує їх експлуатаційну надійність відповідно до вимог і можливостей, які відкриваються з розробкою нового конкурентоспроможного матеріалу для зносостійких покриттів, отриманих детонаційним методом.

РОЗДІЛ 4.

ТЕРТЯ ТА ЗНОШУВАННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ В УМОВАХ ГРАНИЧНОГО МАЩЕННЯ

Відомо, що функції застосовуваних мастильних матеріалів набагато ширші, чим лише зниження сил тертя і інтенсивності зношування, олива, взаємодіючи при терті з поверхневими шарами трибоелементів, змінює не лише силові параметри процесу, але й впливає на властивостях поверхневих шарів. Досліджуючи характеристики робочих поверхонь, контактуючих в процесі тертя покриттів, з позиції дислокаційно-енергетичної концепції [89, 90], можна вважати що олива суттєво впливає на зміну дефектності поверхневого шару, зокрема, призводить до значного збільшення щільності дислокацій і до полегшеного їх виходу в суміжні площини і на поверхню, а також змінює характер взаємодії з навколишнім середовищем [91, 92].

Граничне тертя, особливо при наявності оливи з хімічно-активними добавками, супроводжується утворенням в контактній зоні тертя модифікованих шарів і однією з основних задач, визначаючих експлуатаційні можливості трибосполучень в цілому, є дослідження і керування складом і властивостями поверхневих шарів, що утворюються при різних умовах граничного мащення. Сучасні уявлення про механізм антифрикційності і протизносної дії детонаційних покриттів в умовах граничного тертя мають недостатню вивченість та не мають достатніх експериментальних підтверджень [93, 94]. Такий стан стримує розробку їх оптимальних композицій і раціональне використання як детонаційних покриттів, так і мастильних матеріалів.

4.1. Роль трибохімічних процесів в формуванні зносостійких поверхневих структур.

Хімічна природа поверхонь визначається, з однієї сторони, впливом навколишнього середовища, в тому числі мастильних матеріалів, а з іншої –

хімічним складом самого матеріалу. При впливі навколишнього середовища і мастильних матеріалів проходять хімічні реакції на поверхні тертя покриттів, які суттєво змінюють їх склад і значно впливають на процеси тертя та зношування. Одночасно проходять сегрегаційні процеси легуючих елементів матеріалів, які навіть при незначній відсотковій зміні складу суттєво впливають на його поверхневі властивості [95, 96].

В результат проведення комплексу досліджень було встановлено, що у процесі напилення в результаті хіміко-термічної взаємодії в двофазному потоці дисперсний хром, маючи високу спорідненість до карбону, утворює сполуки типу Cr_xC_y , які є у відомому ступені зміцнюючими фазами. Однак в поверхневому шарі при навантаженні тертям мають місце хімічні і кінетичні особливості, обумовлюючі утворення оксиду хрому, як складової частини вторинних структур.

За даними рентгенофазового аналізу, виконаного на дифрактометрі «Дрон-УМ1», основу фаз що утворилися, складають карбіди типу Cr_3C_2 , і менше 19% - низькі карбіди.

Рентгенофазовим аналізом продуктів взаємодії Cr_3C_2 з киснем повітря виявлено Cr_7C_3 і Cr_2O_3 . Колір поверхні тертя змінюється, що підтверджує наявність оксиду хрому. Загальна схема утворення поверхні тертя Cr_2O_3 в складі вторинних структур за нашими уявленнями наступна: Cr_3C_2 , $Cr_7C_3 + O_2 = Cr_2O_3$, $Cr_{23}C_6$.

Важливим аспектом також є вплив елементоорганічних присадок та хімічно активних елементів, зокрема фосфору, сірки, хлору на формування зносостійких поверхневих структур. Зазначені елементи дифундують в поверхневий шар, тим самим значно знижують поверхневу енергію, сприяючи створенню захисних вторинних структур, які позитивно впливають на процеси тертя.

В поверхневому шарі проходять зміни хімічного складу, структури і властивостей, виникаючі в процесі дисипації механічної енергії навантажених тертям покриттів, при цьому основним явищем, контролюючим дані зміни, виступає дифузія хімічно активних елементів із мастильного середовища та їх триботехнічна взаємодія, як наслідок, біля поверхні і в шарі, безпосередньо

межуючим з зовнішнім середовищем. Мають місце енергетичні зміни, що приводять до значного підвищення термодинамічної стабільності поверхневого шару за рахунок, по-перше, поверхневого насичення хімічно-активними елементами присадок, по-друге, в наслідок сегрегації легуючих елементів покриття в поверхневі шари навантаженні тертям, при цьому зменшення вільної поверхневої енергії пов'язано з анігіляцією вакансій в поверхневому шарі, наслідком чого є більш повна реалізація сил міжатомних зв'язків. Що в свою чергу збільшує опір пластичної деформації, та сприяє розширенню діапазону структурної пристосованості покриттів в даних умовах тертя. Таким чином, в режимі граничного мащення насичення хімічно-активними добавками мастильного матеріалу дозволяє змінювати структурно-фазовий стан поверхневого шару покриттів і забезпечувати тим самим подовжену стабільність їх структури в процесі експлуатації.

4.2. Зносостійкість покриттів в умовах дії мастильних середовищ.

Граничне тертя і знос в машинах представляють собою процеси механохімічної і фізико-хімічної взаємодії контактуючих поверхонь та середовища. Як відомо, середовище має суттєвий вплив на процеси деформації і руйнування поверхні при терті. В присутності мастильного середовища працездатність вузлів тертя визначається режимом змащування. Із відомих видів змащування найбільш небезпечним, особливо для зовнішніх вузлів тертя, є граничне мащення [97, 98].

При терті в режимі граничного мащення рідинна плівка мастильного матеріалу не розділяє тертьові поверхні, а властивість мастильного матеріалу знижувати параметри тертя і запобігати заїданню визначається можливістю утворювати на робочих поверхнях міцні граничні шари адсорбційного або хімічного походження.

Граничний режим мащення є найменш розкритим розділом тертя і змащування машин у зв'язку зі складністю охоплюваних явищ (адсорбційні,

хемосорбційні і хімічні процеси, пластична деформація поверхонь і т.д.). Практично у всіх розділах сучасної трибології, приділяється велика увага розвитку досліджень в області граничного мащення [99, 100, 101].

Процеси, які проходять при терті в умовах граничного мащення, надто складні, взаємопов'язані і вимагають певних знань із області фізико-хімії, хімії, механіки середовищ, а також застосування самих сучасних фізичних методів вивчення поверхні.

Граничний шар утворюється в результаті взаємодії активних елементів змащувального матеріалу з матеріалом поверхонь тертя, суттєве значення при цьому має активація фізико-хімічних процесів взаємодії мастильного матеріалу з поверхнею матеріалів в процесі тертя. Нерівноважний стан поверхневих шарів матеріалів приводить до підвищення адсорбційної і дифузійної активності.

В загальному вигляді механізм дії більшості хімічно активних присадок складається із трьох процесів: адсорбції (хемосорбції), хімічних перетворень (розкладу) при підвищених температурах і хімічної взаємодії найбільш активних продуктів розкладу з металом [102].

Більшість сучасних мастильних матеріалів містить хімічно-активні присадки для підвищення протизадирних та протизносних характеристик. Як правило, такі присадки також мають поверхнево-активні властивості і першочергово утворюють на поверхнях тертя адсорбційні і орієнтовані граничні шари. Однак при високих робочих температурах вони розкладаються і їх хімічно-активні компоненти вступають в хімічну взаємодію з металами поверхневих шарів, утворюючи хімічно-модифіковані шари (S, P, Cl сполуки з металами) з дуже малим опором зсуву, що обумовлює зменшення сил тертя і перехід до досить м'якого корозійно-механічного зносу, і таким чином запобіганню процесів схоплювання та заїдання.

При дослідженні композиційного детонаційного покриття типу Cr-Si-B в умовах гранично тертя, в якості мастильного середовища використовувалося чиста (неполярна) вазелінова олива і вазелінова олива з домішком 2% маси одноосновної ненасиченої олеїнової кислоти. Оптимальну концентрацію

олеїнової кислоти визначали експериментально. Оцінку мастильних властивостей визначали за коефіцієнтом тертя. По мірі підвищення вмісту олеїнової кислоти до 2%, коефіцієнт тертя, зменшуючись, досягає постійного рівня, на якому залишається стабільним до концентрації одноокисної кислоти, що відповідає майже 5% маси. Таким чином, оптимальна концентрація кислоти у вазеліновій оливі, що відповідає мінімізації параметрів тертя, становить 2% маси. Крім того, для порівняння оптимальних результатів аналогічні пари тертя за тими ж програмами випробували в середовищі мінеральної оливи МС-20 [103].

Результати дослідження представлені на рис. 4.1. При випробуванні покриттів у середовищі вазелінової оливи, у якій не міститься поверхнево-активних речовин, спостерігається мінімальна величина зносу при максимальному коефіцієнті тертя.

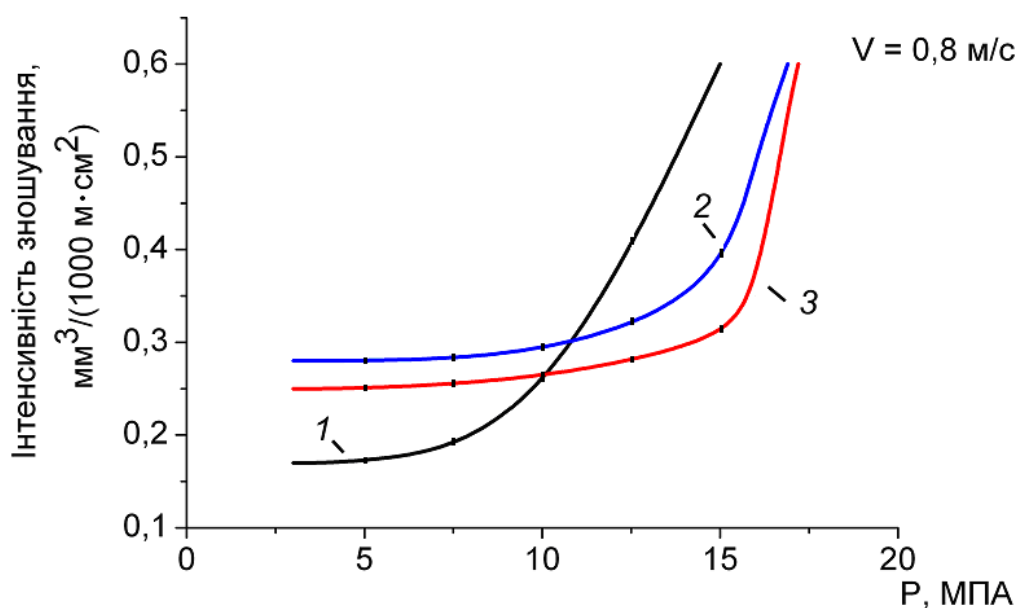
При додаванні у вазелінову оливу поверхнево-активних речовин інтенсивність зношування збільшується майже в два рази при одночасному зниженні коефіцієнта тертя.

Діапазон нормального зношення по навантаженню при мастильній дії вазелінової оливи порівняно невисокий і значно розширюється при введенні поверхнево-активних речовин.

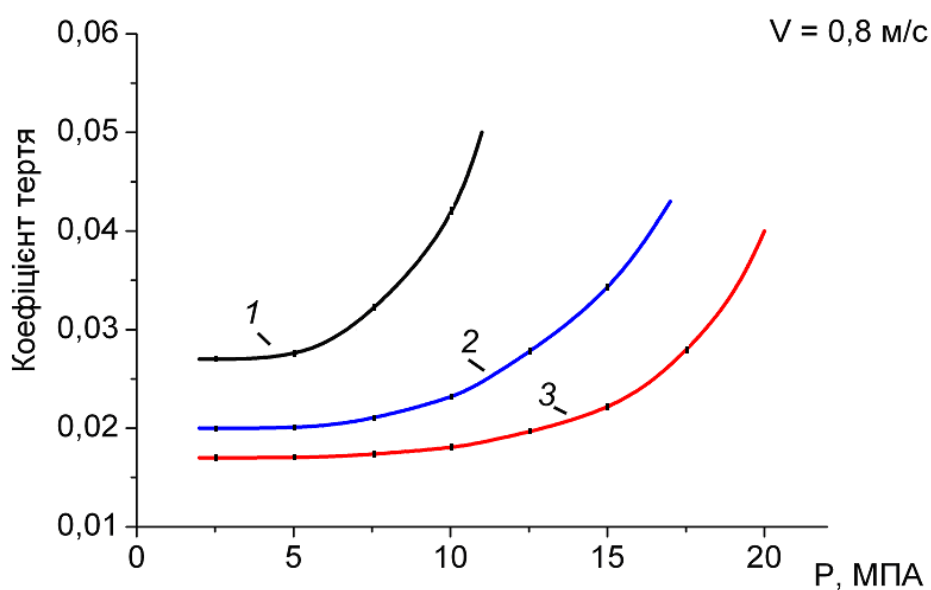
Помітне зниження коефіцієнту тертя і збільшення границі стійкості, що визначає діапазон експлуатації, пов'язано з хемосорбцією кисню на поверхні тертя й утворенням захисних вторинних структур, а також із ефектом фізично адсорбованих поверхнево-активних речовин, що обумовлюють пластифікування. При чому збільшення навантаження робить більш діючий вплив, ніж підвищення швидкості ковзання, що, виходячи з прояву ефекту Ребіндера, пов'язано з нерівномірно активованим станом поверхневого шару й орієнтацією структури в процесі тертя.

Вазелінова олива, що містить у своєму складі поверхнево-активні речовини, що адсорбуються на поверхнях деформованого при терті покриття, викликає адсорбційне пластифікування, тобто здатність до більш інтенсивної деформації у тонкому поверхневому шарі товщиною в частки мікрметра. При цьому

поверхнево-активні речовини полегшують вихід дислокацій до поверхні деформованого покриття, що зменшує внутрішні напруження і запобігає поширенню деформації вглиб зразків.



a



б

Рис. 4.1. Зміна інтенсивності зношування (*a*) і коефіцієнта тертя (*б*) залежно від питомого навантаження ($V=0,8$ м/с.); 1 – у середовищі вазелінової оливи; 2 – у середовищі вазелінової оливи з поверхнево-активними речовинами; 3 – у середовищі мінеральної оливи МС-20.

При роботі у вазеліновій оливі мікротвердість поверхневого шару знижується незначно ($H_{\mu}=5,8$ ГПа), глибина деформованої зони досягає $h=1,78$ мкм. Додавання у вазелінову оливу поверхнево-активних речовин істотно підвищує мікротвердість поверхні тертя ($H_{\mu}=14,5$ ГПа) при одночасному зменшенні глибини деформованого шару ($h=1,5$). Крива, що отримана під час тертя в середовищі мінеральної оливи МС-20, займає проміжне положення. Ступінь виникаючого наклепу при деформації поверхні покриття значно зростає в присутності поверхнево-активних речовин, тобто підвищується мікротвердість наклепаного шару, що істотно впливає на протизносні властивості покриття і сприяє збільшенню межі текучості матеріалу поверхневого шару та розширенню діапазону нормального зношування як за навантаженням, так і за швидкістю ковзання. Це відбувається при зовнішньому ефекті Ребіндера, що виявляється при роботі покриттів у середовищі, яке містить поверхнево-активні речовини.

У першу чергу, цим пояснюється значне збільшення навантажувально-швидкісного діапазону роботи покриття в порівнянні з мастильним середовищем, що не містить поверхнево-активних речовин. Однак наявність поверхнево-активних речовин під час тертя детонаційних покриттів викликає небажані конкуруючі процеси. Так, одночасно із зовнішнім ефектом виявляється внутрішній ефект [10, 104], який відбувається в процесі адсорбції поверхнево-активних речовин.

Зворотна залежність спостерігалась при вимірюванні коефіцієнта тертя. Максимальне значення коефіцієнта відповідає вазеліновій оливі, мінімальне – мінеральній оливі МС-20, що в першу чергу, пояснюється його підвищеною адсорбцією до поверхні тертя за рахунок більш високої кінематичної в'язкості.

Як виявили експериментальні дослідження, поверхнево-активні речовини значно впливають на процеси тертя та зношування покриттів. При відсутності в оливі поверхнево-активних речовин спостерігається мінімальний знос при незначному навантажувально-швидкісному діапазоні і високому коефіцієнті тертя.

Додавання в оливу поверхнево-активних речовин значно розширює експлуатаційні можливості покриттів. Використовуючи отримані результати про дію внутрішнього і зовнішнього ефектів Ребіндера в процесі граничного мащення, можна припустити такий механізм зношування детонаційних покриттів за наявності мастильного середовища. У процесі контактної взаємодії не тільки деформуються поверхневі шари, зерна, але і змінюється їхня орієнтація, тобто має місце текстурування. Іншими словами, поверхня тертя пристосовується до діючої схеми механічних напруг. Якщо напруга при терті не перевищує межі текучості матеріалу, відбувається нормальне зношування [105].

Якщо напруга під час тертя стає більше межі текучості матеріалу, відбувається руйнування. При цьому зерна, орієнтовані перпендикулярно напрямку тертя, ініціюють початок руйнування, оскільки є концентраторами напруг і джерелами мікротріщин.

Одночасно при роботі такого матеріалу, як гетерогенне покриття, що містить тугоплавкі фази, буде відбуватися утворення мікропорожнин у підповерхневому шарі, а наявність незначної пористості в матеріалі при одночасній дії внутрішнього ефекту Ребіндера сприяє розкриттю порожнин і утворенню мікротріщин, що призводить до утворення часточок зносу.

Отже, під час тертя гетерогенних покриттів за наявності мастильного середовища важливу роль будуть відігравати поверхнево-активні речовини в оливі, що обумовлюють прояв різних видів ефекту Ребіндера і визначають механізм зношування матеріалу.

При проведенні дослідів щодо визначення ступеня впливу елементоорганічних присадок на процеси тертя і зношування покриттів, в якості базової оливи було обрано мінеральну оливу МС-20, в яку диференційовано додавалися елементоорганічні присадки: фосфоровмісні – трикрезилфосфат, сірковмісні – вільна сірка; хлоровмісні – хлористий бензол.

Вміст вільної сірки в оливі дорівнював 0,25% маси, фосфору і хлору - до 1% маси. Можливість застосування зазначених вище присадок при змащуванні гетерогенних покриттів потребує детального вивчення.

Як показали проведені дослідження (рис. 4.2), органічні сполуки фосфору, сірки і хлору мають високі антизадирні і протизношувальні властивості і здатні утворювати на поверхнях тертя гетерогенних покриттів вторинні структури, що захищають від зносу і захоплення [106].

При мащенні поверхонь тертя з гетерогенним покриттям системи Cr-Si-B найбільш ефективна сірковмісна присадка (рис. 4.2, крива 3), оскільки вона забезпечує широкий діапазон нормального зношування незначної інтенсивності.

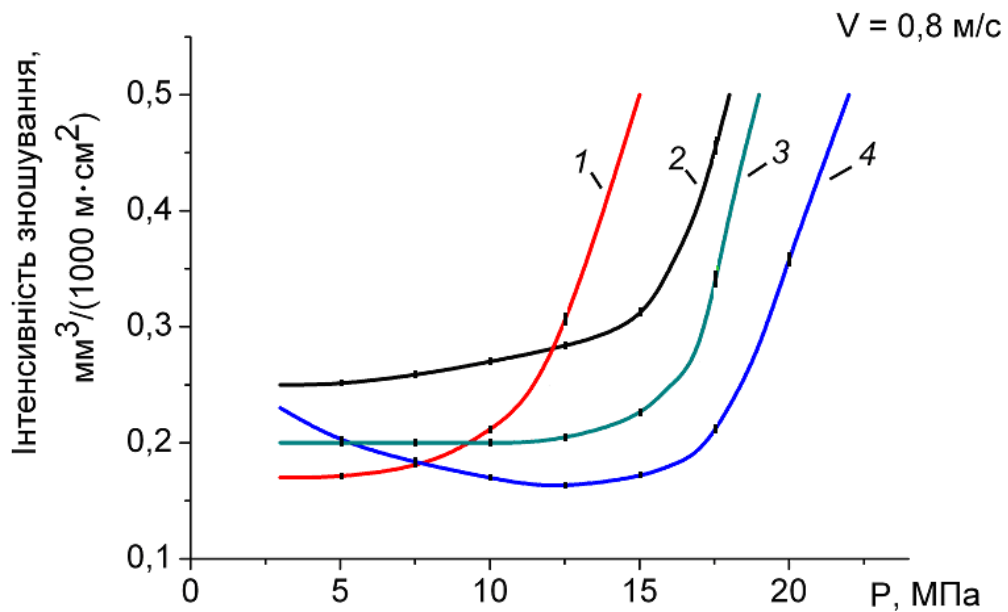
Сірковмісна присадка створює на поверхні тертя покриття плівки сульфідів (установити точно фазовий склад вторинних структур не вдалося через незначну товщину), що відрізняються досить високою твердістю, міцністю і температурою плавлення. Однак тверді плівки сульфідів мають значний опір зсуву, що обумовлює більш високий коефіцієнт тертя (рис. 4.2) у порівнянні з іншими присадками.

Оскільки сульфіди утворюються при більш високих температурах у порівнянні з іншими присадками [107, 108], позитивні ефекти під час граничного тертя виявляються тільки при високих навантаженнях і швидкостях ковзання, коли температура в зоні фрикційного контакту значно зростає (рис. 4.2, крива 3). При незначних навантаженнях і швидкостях ковзання застосування сірковмісних присадок неефективно.

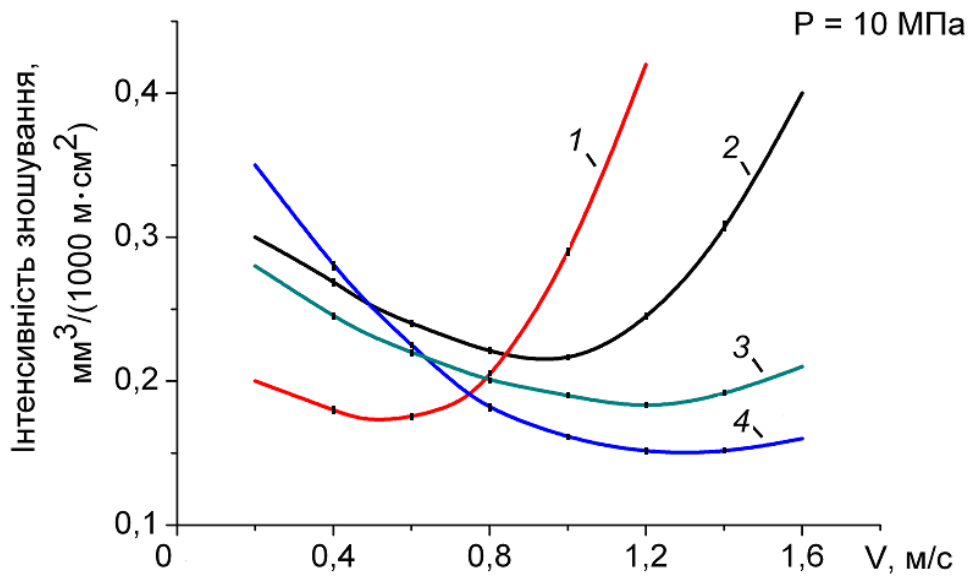
Зворотний ефект щодо інтенсивності зношування, коефіцієнта тертя і діапазону нормального зношування має фосфоровмісна присадка (рис. 4.2, крива 2).

Фосфоровмісна присадка ефективна при незначних навантаженнях і швидкостях ковзання. Отже, фосфор починає реагувати з поверхнею тертя детонаційного покриття при низьких температурах, утворюючи при цьому ефективні плівки вторинних структур, які мають високу рухливість, здатність до самовідновлення дефектів на поверхні тертя та утворення шаруватої структури. Ці плівки, як показали дослідження, на легких режимах тертя мають високі протиспрацьовувальні властивості і забезпечують досить низькі коефіцієнти тертя.

Однак при збільшенні навантаження чи швидкості ковзання спостерігається значне підвищення температури у вузлах тертя.



a



б

Рис. 4.2. Зміна інтенсивності зношування покриттів від питомого навантаження при $V=0,8$ м/с (а) і швидкості при $P=10$ МПа; 1 – у середовищі оливи МС-20; 2 – у середовищі оливи МС-20+P; 3 – у середовищі оливи МС-20+Cl; 4 – у середовищі оливи МС-20+S;

З аналізу отриманих результатів випливає, що при роботі в мастильних середовищах різні елементоорганічні присадки, хімічно активні елементи, такі, як фосфор, сірка, хлор дифундують у поверхневий шар, тим самим значно знижують поверхневу енергію, сприяючи утворенню захисних вторинних структур, що позитивно впливає на процес тертя.

Великий відсоток вмісту даних елементів спостерігається на поверхні покриттів (фосфору 7,4%; сірки 6,4%; хлору 6,2%) і різко зменшується за глибиною. Проведені раніше дослідження дозволяють припустити, що сегрегація таких елементів, як фосфор, сірка, хлор, вуглець, дифундувавши з мастильного середовища, призводить до утворення в поверхневих шарах покриття евтектики з низькою температурою перетворення, тобто до умов, коли фазові перетворення спостерігаються при порівняно низьких температурах.

4.3. Вплив елементоорганічних присадок на процеси тертя та зношування.

Визначенню хімічного складу модифікованих шарів, які утворюються на поверхні тертя при дослідженні олив з хімічно-активними присадками, присвячені ряд важливих робіт. Н. Жорне досліджував за допомогою методу „же-спектроскопії” утворення модифікованих плівок на поверхнях сталі після випробувань в середовищі мінеральної оливи. Він виявив дескретний характер утворюваних на поверхні тертя плівок із продуктів хімічної взаємодії присадки з металом.

На думку А. Годфрі важливі такі механічні властивості захисних плівок, як твердість, опір зсуву, температура плавлення, пружність, однак при надмалих їх товщинах визначення цих властивостей надто складне. При цьому вказані властивості можуть широко змінюватись в залежності від умов експлуатації. В роботах К. Майера вивчені плівки, які утворюються на сталі типу ШХ після випробувань у розчині дибензилдисульфїду в парафіновій оливі, встановлено наявність сірки. Ф. Барвел визначив хімічний склад поверхневих плівок і показав

утворення шару FeS. М.В. Райко розвив уявлення про фазові переходи в мастильних середовищах від адсорбованих до хемосорбованих і потім до хімічно модифікованих. Автором показано, що дані переходи обумовлюють зміну реологічних характеристик мастильного шару, як наслідок, мають вплив на зносостійкі і антифрикційні характеристики трибосполучень. В роботах Р.М. Матвієвського також це підтверджується, що перехід фізично адсорбованих шарів до їх руйнування в результаті десорбції, а потім до утворення модифікованого шару обумовлює зниження сил тертя.

На підставі аналізу літературних даних встановлено факт утворення мастильних шарів з низьким коефіцієнтом тертя, що містять прості та складні ефіри, альдегіди, багатоатомні спирти і компресоутворюючі органічні сполуки [107, 108]. Останні представляють собою інтерес, оскільки утворення комплексних сполук в результаті протікання трибохімічних реакцій в зоні граничного тертя особливо допомагає покращенню мастильних властивостей олив [111].

Окрім того, для покращення мастильних властивостей олив до них додають різного роду присадки, які забезпечують певні функціональні властивості.

Головними факторами, від яких залежать закономірності, що визначають протікання процесів тертя і зношування, є як активація фізико-хімічних процесів взаємодії мастильного середовища з поверхнею покриттів, результатом якої є утворення модифікованих шарів, так і зовнішні впливи, що зумовлюють ступінь і градієнти пружнопластичної деформації, температуру, рівень активування і ряд похідних явищ, що визначають провідний вид зношування.

При аналізі результатів впливу навантаження і швидкості ковзання на інтенсивність зношування покриттів (рис.4.2, крива 2) в умовах граничного мащення можна зробити висновок, що молекули присадок, які містять такі елементи, як S, Cl, P утворюють на поверхні тертя плівки сульфідів, хлоридів, фосфідів та інших неорганічних сполук металів, які забезпечують антифрикційний, протизносний і протизадирний ефекти. Попередньо присадки і продукти їх деструкції хемосорбуються на робочих поверхнях.

Навантаження тертям досліджуваних покриттів системи Cr-Si-B в умовах граничного мащення при наявності сірковмісної присадки характеризується широким діапазоном механохімічного зношування (рис. 4.2, крива 3). На робочих поверхнях утворюються, як встановлено, плівки сульфідів змінного складу на основі компонентів матеріалів покриття, головним чином CrS, Cr₂S₃, Cr₃S₂, SiS₂ (встановити однозначно фазовий склад вторинних структур було неможливо через вкрай незначні товщини). За даними роботи [112] для сірковмісних сполук ефективно зниження тертя досягається при утворенні шару сульфїду товщиною 30 - 50 молекулярних шарів. Згідно з дослідженнями Сакураї з співробітниками, товщина шару сульфїду, що утворюється при терті в середовищі оливи, становить 1000 нм. При цьому утворення модифікованих шарів забезпечує зниження інтенсивності зношування не тільки за рахунок меншої міцності на зріз, а й як наслідок вторинної адсорбції молекул присадки. Так, сульфід хрому є більш активним адсорбентом, ніж оксиди, і мастильний матеріал малоефективний як адсорбент для стабільних поверхонь, є ефективним при адсорбції на модифікованому шарі.

Виходячи з моделі граничного тертя, запропонованої Боуденом, для забезпечення зниження сили тертя в широкому інтервалі навантажень і температур необхідно, щоб частка поверхні контакту, покрита граничним шаром, прагнула до одиниці, тобто $\beta \rightarrow 1$, іншими словами модифікований граничний шар повинен зберегтися на всій фактичній поверхні тертя. На рис. 4.4а представлений фрагмент поверхні тертя, характерний для механохімічного зносу в умовах граничного мащення, що містить присадку сірки. Переважна частина робочої поверхні покрита темними і сірими плівками модифікованого шару, що складається, за даними рентгенофазового аналізу, в основному з сульфїдів матеріалів покриття, твердих розчинів кисню і найдрібніших частинок нижчих оксидів. Слідів схоплювання і осередків задирів на поверхні не виявлено [113].

Механізм дії протизадирних трикрезилфосфатних присадок вивчався багатьма авторами. Останнім часом з'явилися роботи, в яких показано, що кінетика їх механізму відрізняється від основних положень, сформульованих

Биком, Гівенсоном. Присадки, що містять фосфор, діють інакше, ніж сірко- і хлорвмісні, так як при однаковій протизадирній ефективності реакційна здатність органічних фосфатів значно нижча, ніж сірко і хлорвмісних присадок [114].

Фосфоровмісна присадка, як впливає з результатів випробувань, ефективна при високих навантажувально-швидкісних режимах. Фосфор обумовлює триботехнічну взаємодію, утворюючи при цьому поверхневі плівки фосфідів типу CrP , CrP_3 , SiP які володіють пружністю, здатністю до саморегенерації і частково шаруватою структурою (рис. 4.4б).

Однак при підвищенні навантаження або швидкості ковзання спостерігається підвищення температури, за рахунок того що фосфор, як і алюміній, екзотермічно реагує з хромом (тепловий ефект близький до ефекту при синтезі інтерметалідів) [115]. Дана обставина значно знижує навантажувально-швидкісний діапазон пари тертя і тому застосування мастил з фосфоровмісними присадками в важконавантажених вузлах тертя небажано.

З викладеного випливає, що присадка, яка містить фосфор при роботі детонаційних покриттів діє головним чином в області незначних навантажень і швидкостей ковзання, тому даний клас присадок можна розглядати як засіб ефективного захисту детонаційних покриттів від задирів та захоплювань першого роду. Хлорна присадка, що утворюється на поверхні тертя детонаційного покриття плівки хлоридів, займає проміжне положення по відношенню до фосфор і сірковмісних присадок. Хлориди утворюються в основному при високих температурах, так що ефективна дія цієї присадки, як і сірчаної, проявляється в області високих навантажень і швидкостей ковзання. Однак хлориди плавляться при більш низькій температурі, ніж сульфід, це і відбивається на верхній межі працездатності хлорвмісної присадки, яка нижча ніж у сірковмісної, але вище, ніж у фосфоровмісних.

Практично для всіх досліджуваних поверхневих структур протизносний ефект від утворення модифікованих шарів пояснюється не тільки зниженням сили тертя і температури в зоні контакту, а й тим, що знос відбувається не в результаті руйнування покриття при адгезійному зношуванні, а внаслідок деструкції менш

міцного модифікованого шару, істотну частку в якому становить активний елемент присадки (рис. 4.5). В результаті чого замість інтенсивного зношування матеріалу покриття, має місце втрата маси присадки, що відтворюється з мастильного середовища.

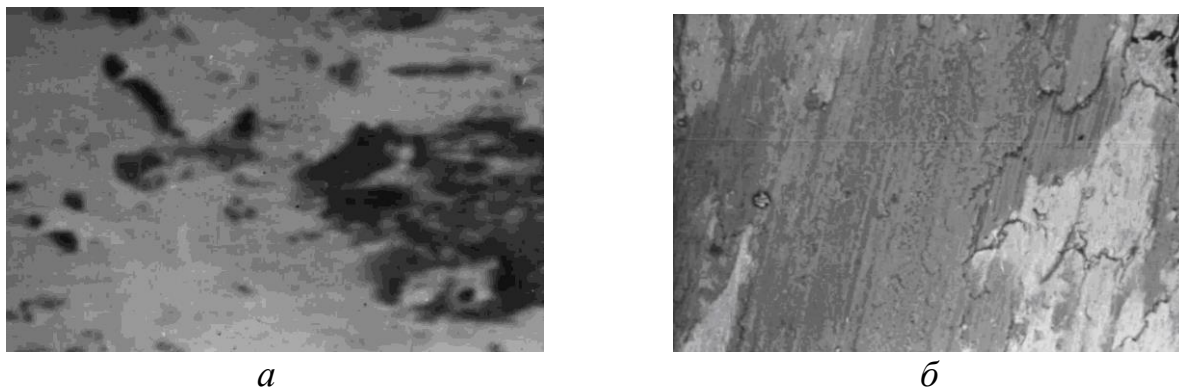


Рис. 4.4. Мікрофотографія поверхні тертя покриття, випробуваного при граничному терті ($P=10$ МПа, $V=0,8$ м/с, $\times 320$): *a* – з оливою MC-20+S; *б* – з оливою MC-20+P.

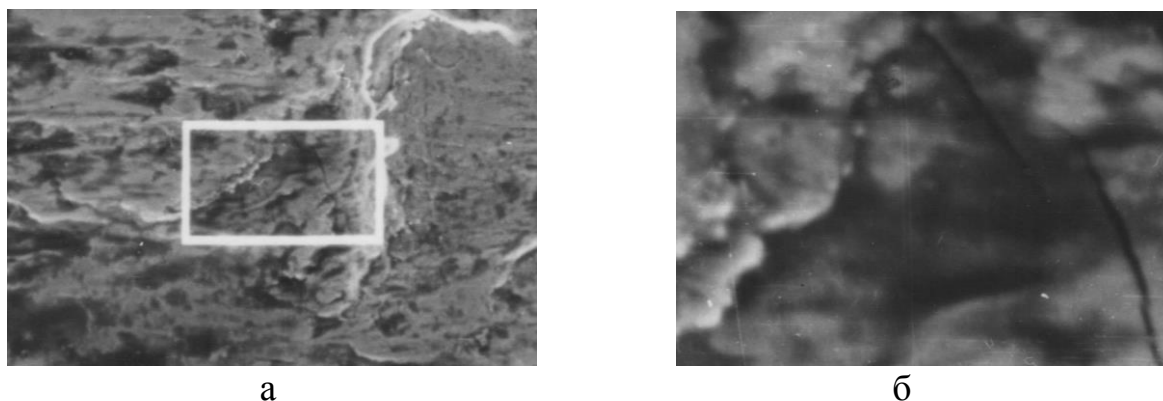


Рис. 4.5. Мікрофотографія фрагменту руйнування модифікованого шару при випробуваннях MC-20+Cl ($P=10$ МПа, $V=0,8$ м/с): *a* – $\times 320$; *б* – $\times 940$.

Створення найбільш ефективних присадок можливо не тільки за рахунок підбору хімічних сполук, які забезпечували б достатній протизадирний ефект, але і шляхом підбору двокомпонентних присадок, що представляють поєднання найбільш ефективного протизадирного і антикорозійного компонентів.

З метою вивчення трибохімічних явищ в формуванні зносостійких поверхневих структур була використана оже-електронна спектроскопія поверхонь тертя з пошаровим іонним травленням і кількісним хімічним аналізом на глибину до 5000 Å.

Кількісний хімічний склад елементів покриття, що працює в оливі з фосфоровмісною присадкою, представлений в таблиці 4.1. Аналогічні дослідження виконані в мастильному середовищі з сірковмісною (таблиця 4.2), і в середовищі з хлоровмісною (таблиця 4.3) присадкою.

Таблиця 4.1.

Кількісний аналіз розподілу елементів покриття при роботі в оливі з фосфоровмісною присадкою

Елементи	Поверхня тертя, %	Глибина 5000Å, %	Матриця матеріалу, %
P	8,4	1,2	-
C	5,1	0,4	-
O	18,3	20,1	4,0
Cr	40,7	45,8	83,2
Si	17,7	20,4	7,8
B	9,8	12,1	5,0

Таблиця 4.2.

Кількісний аналіз розподілу елементів покриття при роботі в оливі з сірковмісною присадкою

Елементи	Поверхня тертя, %	Глибина 5000Å, %	Матриця матеріалу, %
S	7,5	0,3	-
C	6,2	0,2	-
O	18,7	20,4	4,3
Cr	41,9	47,7	83,4
Si	17,4	21,2	7,5
B	8,3	10,2	4,8

Таблиця 4.3.

Кількісний аналіз розподілу елементів покриття при роботі в оливі з хлоровмісною присадкою

Елементи	Поверхня тертя, %	Глибина 5000Å, %	Матриця матеріалу, %
Cl	6,2	0,3	-
C	7,1	0,4	-
O	18,0	21,1	4,0
Cr	41,8	46,4	83,0
Si	18,5	19,8	8,0
B	8,4	12,0	5,0

З аналізу отриманих результатів випливає, що при роботі в мастильних середовищах елементоорганічні присадки як хімічно активні елементи, а саме, фосфор, сірка, хлор дифундують в поверхневий шар, тим самим значно знижують поверхневу енергію, сприяючи створенню захисних вторинних структур, механохімічні процеси формування яких, обумовлені зовнішніми впливами, природою матеріалів і складом робочих середовищ.

Значний відсоток вмісту елементоорганічних присадок спостерігається на поверхні: фосфору 8,4%, сірки 7,5%, хлору 6,2%, і різко зменшується по глибині.

Проведені раніше дослідження дозволяють припустити, що сегрегація таких елементів, як фосфор, сірка, хлор, вуглець, які дифундують з мастильного середовища, призводить до утворення в поверхневих шарах покриття евтектики з низькою температурою перетворення, тобто до умов, коли фазові перетворення спостерігаються при порівняно низьких температурах. У поверхневому шарі відбуваються зміни хімічного складу, структури і властивостей, що виникають в процесі дисипації механічної енергії навантажених тертям покриттів, при цьому основним явищем, контролюючим ці зміни, виступає дифузія хімічно активних елементів з мастильних середовищ і їх трибохімічна взаємодія. Отже, поблизу поверхні і в шарах, що безпосередньо межують з зовнішнім середовищем, мають місце енергетичні зміни, що призводять до значного підвищення термодинамічної стабільності поверхневого шару за рахунок, по-перше, поверхневого насичення хімічно активними елементами присадок, що містяться в мастильних матеріалах, по-друге, внаслідок сегрегації легуючих елементів, які входять до складу покриттів, в навантажені тертям поверхневі шари покриттів. При цьому зменшення вільної поверхневої енергії пов'язано з анігіляцією вакансій в поверхневому шарі, наслідком чого є більш повна реалізація сил міжатомних зв'язків, що в свою чергу збільшує опір пластичної деформації і, таким чином, сприяє розширенню діапазону структурної пристосованості покриттів в даних умовах тертя, тобто в режимі граничного мащення насичення поверхневого шару покриття хімічно активними добавками дозволяє змінювати структурно-фазовий стан, забезпечуючи тим самим тривалу стабільність в процесі експлуатації

модифікованих шарів з ефективними антифрикційними, протизношувальними та антизадирними властивостями.

Висновки по розділу 4.

1. У поверхневому шарі відбуваються зміни хімічного складу, структури і властивостей, що обумовлені процесом дисипації механічної енергії навантажених тертям покриттів. При цьому основним явищем, що інтенсифікує ці зміни, виступає дифузія хімічно активних елементів з мастильних середовищ і їх трибохімічна взаємодія. Отже, поблизу поверхні й у шарах, що безпосередньо межують із зовнішнім середовищем, енергетичні зміни призводять до значного підвищення термодинамічної стабільності поверхневого шару, по-перше, за рахунок поверхневого насичення хімічно активними елементами присадок, що містяться в оливах, по-друге, внаслідок сегрегації вхідних до складу покриттів легуючих елементів у навантаженні тертям поверхневі шари покриттів.

2. Отримані результати вказують правомірність використовуваних методологій і алгоритму проведення експериментальних досліджень, які встановили ступінь впливу елементоорганічних присадок на закономірності зношування детонаційних покриттів системи Cr-Si-B в умовах граничного тертя, при цьому показано, що найбільший протизносний ефект при використанні оливи МС-20 обумовлюють сірковмісні та хлоровмісні присадки, а раціональне застосування фосфоровмісних присадок пов'язано тільки з експлуатацією легконавантажених пар тертя.

3. Експериментально вивчено і узагальнено, що опір зносу детонаційних покриттів визначається характером розподілу хімічних елементів поверхневих шарів, обумовлених явищем сегрегації як легуючих елементів покриттів, так і присадок, дифундуючих з оливи, при конкретній взаємодії робочих поверхонь в процесі тертя, що призводить до підвищення поверхневої міцності покриттів і сприяє структурному утворенню захисних поверхонь плівок, які розширюють

навантажувально-швидкісний діапазон нормального механохімічного зношування.

4. Зменшення вільної поверхневої енергії пов'язано з анігіляцією вакансій в поверхневому шарі, наслідком чого є більш повна реалізація сил міжатомних зв'язків, що, у свою чергу, збільшує опір пластичної деформації і, таким чином, сприяє розширенню діапазону структурної пристосованості покриттів у даних умовах тертя, тобто в режимі граничного мащення насичення хімічно активними домішками поверхневих шарів, що беруть участь у терті, дозволяє змінювати структурно-фазовий стан поверхневого шару і забезпечити тим самим тривалу стабільність і триботехнічну зносостійкість їхньої структури в процесі експлуатації.

РОЗДІЛ 5.

СУМІСНІСТЬ ПОКРИТТІВ З АНТИФРИКЦІЙНИМИ І КОНСТРУКЦІЙНИМИ МАТЕРІАЛАМИ

Триботехнічні матеріали представляють собою важливий клас матеріалів, призначених для роботи в умовах тертя та зношування. Дослідження і розробка ефективних триботехнічних матеріалів є одним з основних шляхів вирішення технічних проблем, пов'язаних зі зниженням втрат на тертя та зношування в трибологічних парах. Концепції конструювання в сучасній техніці часто вимагають, щоб матеріал мав широкий спектр властивостей, наприклад низький коефіцієнт тертя та інтенсивність зношування, високу механічну міцність та зносостійкість і т.д. Для систем які працюють в екстремальних умовах необхідні матеріали з особливими властивостями. Трибоматеріалознавство розглядає вузол тертя як єдину систему, в якій контактуючі матеріали повинні мати певну сумісність, щоб забезпечувати безвідмовність та надійність роботи, особливо з антифрикційними та конструкційними матеріалами [116, 117].

5.1. Аналіз та вибір пар тертя з конструкційних і антифрикційних матеріалів.

Фізичні основи розробки сучасних пар тертя є забезпечення їх сумісності і реалізації структурної пристосованості в заданому діапазоні умов навантаження і середовища.

При загальноприйнятій термінології дано визначення сумісності як властивостей матеріалів контактних поверхонь запобігати схоплюванню при терті [115]. Однак, наведене визначення сумісності не відповідає сучасному рівню триботехніки, так як має задано вузьке трактування цього ефективного і конструкційного поняття. В роботі [118] сумісність розглядається як здатність трибопари в даних умовах роботи і певному типі мастильного матеріалу пристосовуватись в процесі взаємного переміщення, забезпечуючи задану

довговічність без пошкоджень поверхонь тертя. В роботах [119, 120] показано, що для тертьових поверхонь характерна відповідна реакція на зміни в умовах тертя, яка проявляється у виникненні в зонах контактування або твердих оксидних плівок, або тонких легко рухомих м'яких плівок. У гетерогенних сплавах це проявляється у збільшенні кількості перенесеного на контактуючу поверхню металу і м'якої фази. Оцінка робочих властивостей покриттів в парах з різними антифрикційними матеріалами виявила перспективність використання алюмінієвих сплавів, що містять олово та свинець. Великий вплив на проходження процесу взаємної пристосованості поверхонь тертя являють мікроструктурні і субмікроструктурні зміни, що реалізуються безпосередньо під час контактування.

В роботах [121] розглянуто важливий аспект сумісності – можливість утворювати мастильну плівку, яка володіє високою температурною стійкістю, і здатністю реагувати з хімічно-активними присадками або продуктами їх термічного розпаду з утворенням хімічно модифікованого шару, який екранує від заїдання при екстремальних умовах тертя.

В роботах Б.І.Костецького [14 - 22] розроблено основи теорії структурної пристосованості і її застосування при вирішенні задач підвищення надійності вузлів тертя. Показано, що залежність коефіцієнта тертя і інтенсивності поверхневого руйнування від параметрів тертя (навантаження, швидкості переміщення, температури і властивості середовища) містить відрізок мінімального тертя і руйнування для будь-яких контактуючих матеріалів. В залежності від властивостей матеріалів і середовища, змінюється тільки діапазон і рівень мінімального тертя та зношування. Цей діапазон структурної пристосованості обумовлений виникненням стійкої дисипативної структури тертя, підтримуваної стаціонарними потоками механічної енергії і речовини зовнішнього середовища, взаємодіючої з поверхнями тертя, активованими механічними взаємодіями.

Програмою вивчення сумісності детонаційних покриттів Cr-Si-B і визначення їх оптимальних пар тертя були передбачені їх випробування з широко застосовуваними антифрикційними і конструкційними матеріалами, та

можливості використання твердих мастил [122], при цьому оцінювались не тільки здатність матеріалів запобігати схоплюванню, але й можливість тривало довго виконувати задані функції.

Підбір матеріалів пар тертя проводився з позиції системного аналізу. Так бронза типу БрАЖ9-4, застосовується в якості антифрикційного матеріалу, широко застосовується при виготовленні опор ковзання, упорних кілець, втулок, зубчастих коліс, клапанів і т.д. Бронза типу БрО10Ц2 використовується, як правило, для вкладишів підшипників, антифрикційних деталей, втулок і т.д. Як конструкційні матеріали взяті зразки із високоміцної сталі 30ХГСНА, яка використовується для зубчастих коліс, валів, штовхачів, направляючих і т.п. і зразки із азотованої сталі 38ХМЮА, яка застосовується при виготовленні шестерень, втулок, штоків і інших деталей.

5.2. Експлуатаційна стійкість детонаційних покриттів в парах тертя з антифрикційними та конструкційними матеріалами.

Головними факторами, від яких залежать закономірності, що визначають протікання процесів тертя і зношування в контактній зоні досліджуваних матеріалів, є зовнішні чинники, зокрема швидкість ковзання. Вона зумовлює зміну ступеня і градієнта пружно-пластичної деформації, температури, рівня активування, ряду похідних явищ і в кінцевому рахунку впливає на провідний вид зносу.

Аналіз результатів впливу швидкості ковзання на інтенсивність зношування (рис. 5.1) випробовуваних контртіл з різних матеріалів показує, що опір зносу пар тертя з покриттям Cr-Si-B практично однаковий, хоча інтенсивність зношування досліджуваних покриттів в парі з алюмінієвою бронзою трохи нижча, у всьому діапазоні швидкостей ковзання, провідним є механохімічний знос. Нормалізація процесів тертя й зношування в системі покриття-контртіло є наслідком термодинамічної природи і здатністю при даних умовах спонтанно організовувати стійкі впорядкованого стану вторинні структури, які за результатами досліджень,

являють собою складноактивований комплекс у вигляді сполук типу шпінелі на основі оксидів металів, що входять до складу матеріалів тертя [123].

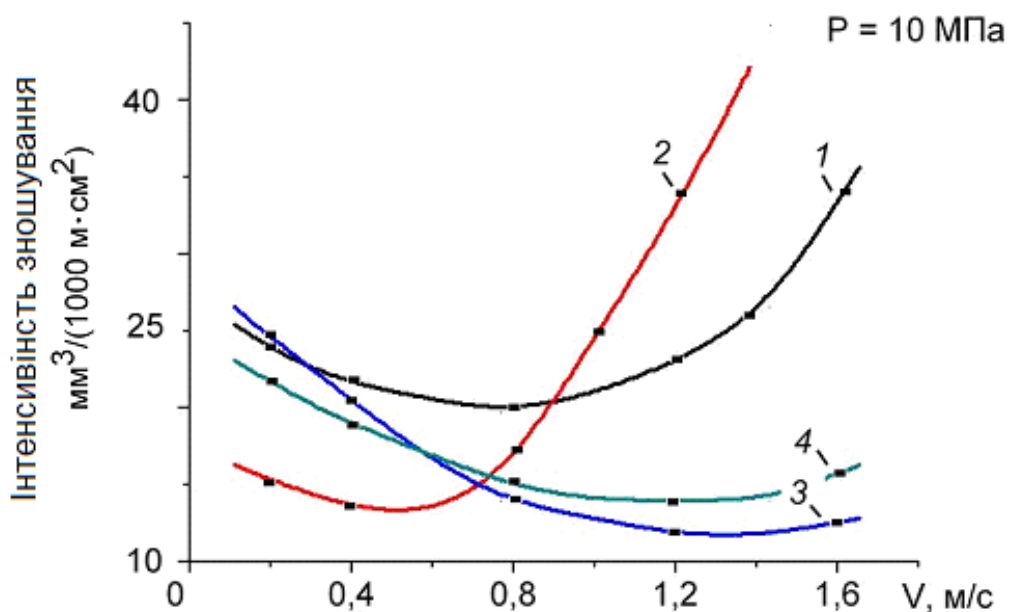


Рис. 5.1. Зміна інтенсивності зношування в залежності від швидкості: 1 – 30ХМЮА – сталь 45; 2 – 30ХГСНА – сталь 45; 3 – Cr-Si-B – 30ХГСНА; 4 – Cr-Si-B – 38ХМЮА.

Характерні мікрофотографії поверхонь тертя детонаційних покриттів, напилених порошком Cr-Si-B представлені на рис. 5.2.



Рис. 5.2. Мікрофотографія поверхонь тертя детонаційних покриттів, напилених порошком Cr-Si-B (x320).

Електронно-мікроскопічні дослідження підтвердили характерну особливість поверхневих плівок, які представляють конгломерати субмікрооб'ємів складного фазового складу. Наслідком цього є зміна діапазону мікротвердості. Структура поверхневих плівок настільки дрібнодисперсна, що не представляється можливим отримати відбиток індентора чітко на окремих фазах, можна говорити тільки про усереднені значення мікротвердості в результаті великого числа вимірювань (рис. 5.3).

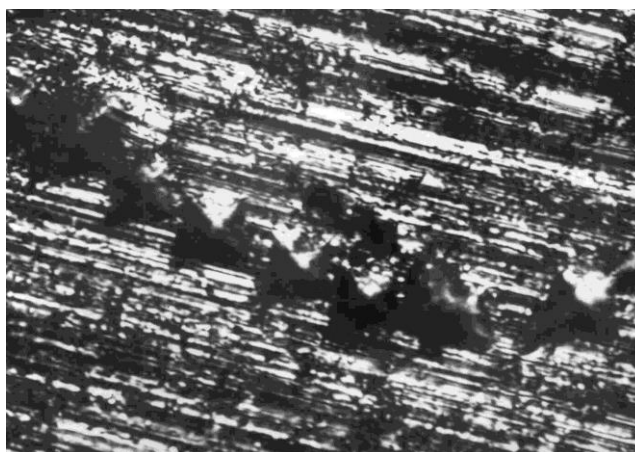


Рис. 5.3. Мікрофотографія поверхонь тертя детонаційних покриттів, напилених порошком Cr-Si-B (x320).

Крім того, наявність борного ангідриду (B_2O_3), який утворюється при взаємодії вищих боридів хрому та кисню середовища і є хімічно активною формою борної кислоти, перетворює оксиди металу в метаборати типу $Cr(BO_2)_3$, що сприяє утворенню в'язкої щільною „глазурі”. Також встановлено присутність плівки, що складається з двох шарів, які визначаються як металографічним, так і рентгенографічним аналізом, безпосередньо приповерхневий шар являє гексагональний нітрид хрому (Cr_2N), наступний - твердий розчин N в оксиді Cr_2O_3 без певної структури, крім того, самоорганізація поверхневих структур виражається в утворенні ізомерних оксидів $Al_2O_3-Cr_2O_3$ і термостабільного SiO_2 . Як встановлено комплекс структур, обумовлених пристосованістю при

навантаженні тертям характеризується екстремальними властивостями і екранує основний матеріал пар тертя від безпосереднього контакту і руйнування.

Механізм утворення вторинних структур даного типу обумовлений протіканням пластичної деформації в результаті чого змінюється структура поверхневого шару. Подальше утворення вторинних структур можна уявити як процес аморфізації продуктів механічного легування, що включає диспергування матеріалів поверхонь, розлом дисперсоїда з частинками оксидів, інтерметалідів і перетворення цих ультрадисперсних поверхневих фаз під дією локальних температур і тисків в нову ультрадисперсну структуру. Про це свідчить електроннограма (рис. 5.4), що має максимуми інтенсивностей на дифузійних ореолах.



Рис. 5.4. Електроннограма поверхневого шару (x650)

Відмітна особливість, утворених структур полягає в тому, що в частинках нанорозмірів поверхневі шари атомів створюють надлишкові тиски [124 - 126]. Це істотно спотворює кристалічну решітку, впливає на енергію активації [127 - 1230] і в підсумку структура характеризується комплексом нових властивостей, що визначають високі антифрикційні характеристики пари тертя. При цьому були проаналізовані цифрові карти розподілу хімічних елементів по площі (рис. 5.5), отримані результати підтверджують дані теоретичних і експериментальних

досліджень і знаходяться у відповідності з сучасними уявленнями про природу дисперсного стану.

Мікроструктура розрізу покриттів, напилених композиційними порошками системи Cr-Si-B, представлена на рис. 5.6. Як видно покриття копіює рельєф основи, прилягання досить щільне. Міцність зчеплення визначалася на спеціальних зразках. При металографічному аналізі напиленого шару частинках не виявлені плівки оксидів, шлакових включень та інших забруднень на деформованих, дефекти у вигляді пор, пустот і тріщин не вдалося виявити навіть при $\times 1200$. На шліфах чітко видно включення малодеформованих зміцнюючих часток.

Реалізуючи розроблену схему створення композиційних порошків і управління технологічними параметрами напилення, вдалося впливати на рівень дисперсності структури покриттів, при цьому, як показали дослідження, змінюються як розміри зміцнюючих фаз, так і відстані між фазовими складовими, що в свою чергу впливає на їх поверхневу міцність при терті.

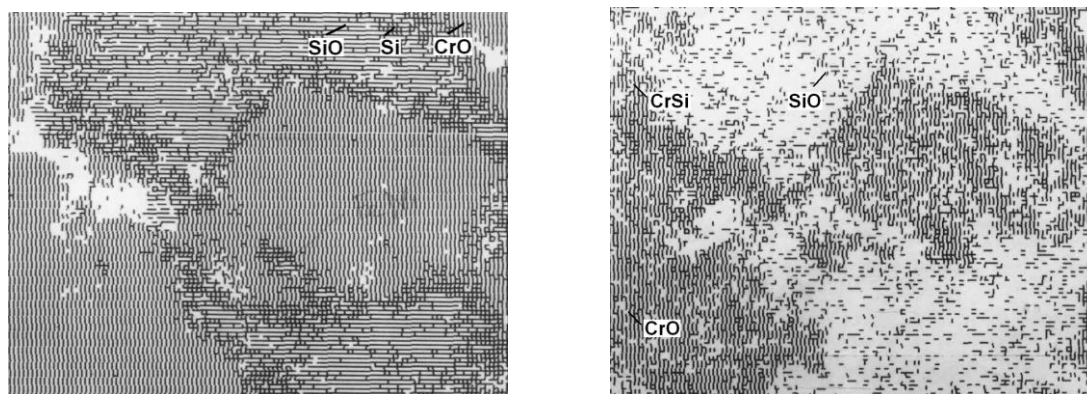


Рис. 5.5. Цифрова карта розподілу хімічних елементів по робочій поверхні зразка.

Таким чином, результатом еволюції процесів механохімічного зношування при оптимальній узгодженості рівнів активувації і пасивації, основу яких складають кооперативні дії, що адаптуються до даних умов деформаційних, теплових, дифузійних і хімічних реакцій, є утворення дрібнодисперсних

гетерофазних, стійких вторинних структур, що володіють високими зносостійкими властивостями.

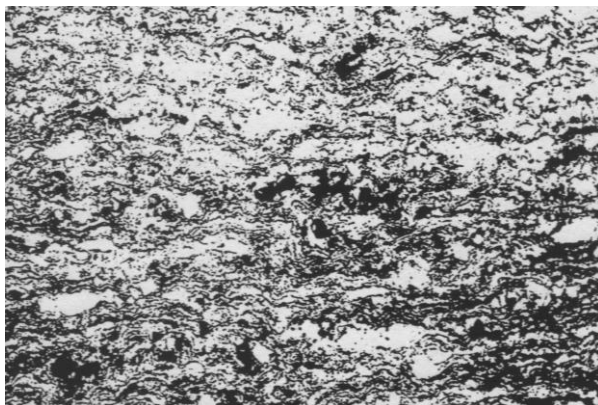


Рис. 5.6. Мікроструктура розрізу покриття Cr-Si-B (x650).

Можна відзначити, що за своєю будовою досліджувані поверхневі тонкоплівкові об'єкти близькі до структури дисперсно-зміцненого композиційного матеріалу. Як відомо, такі матеріали мають унікальне поєднання високої пластичності і міцності, мають високу стабільність даних характеристик в часі [131 - 133].

Процеси, які відбуваються на контактах, істотно залежать від тиску. На експериментальних кривих (рис. 5.7) видно, що характерним для детонаційних покриттів є незначне збільшення зносу з ростом навантаження.

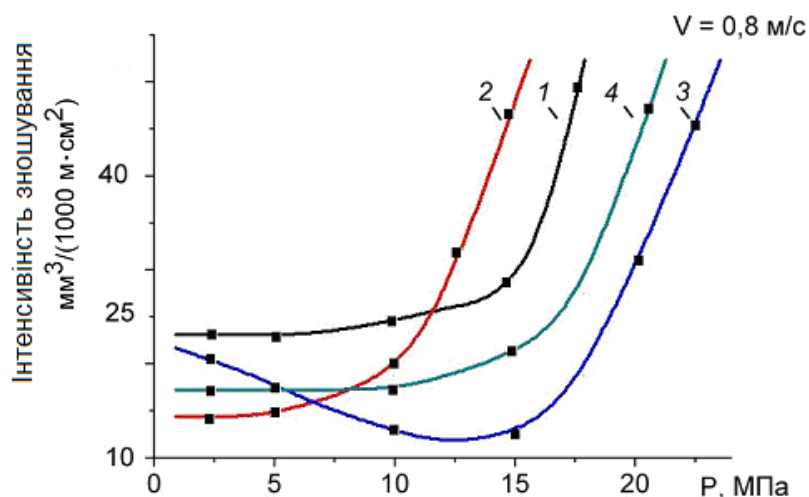


Рис. 5.7. Зміна інтенсивності зношування в залежності від навантаження: 1 – 38ХМЮА – БрАЖ9-4; 2 – 30ХГСНА – БрО10Ц2; 3 – Cr-Si-B – БрАЖ9-4; 4 – Cr-Si-B – БрО10Ц2.

Така висока працездатність покриттів обумовлюється широким діапазоном структурної пристосованості матеріалів при терті. Утворення вторинних структур, що екранують основний матеріал, відбувається при наявності динамічної рівноваги процесів. Однак при подальшому підвищенні навантаження до 17 - 19 МПа динамічна рівновага збільшується в сторону підвищення енергії активації руйнування і процес зношування якісно змінюється [134, 135].

Таким чином, підвищення навантаження призводить до того, що взаємодія процесів, що характеризують розвиток пластичної деформації при терті, і механізмів, супутніх фазовому наклепу, інтенсивно стимулюють лавиноподібний розвиток центрів мікросхоплювання, і руйнування покриттів при досягненні $P_{кр}$. відбувається переважно шляхом розтріскування і викришування поверхневого шару (рис. 5.8).

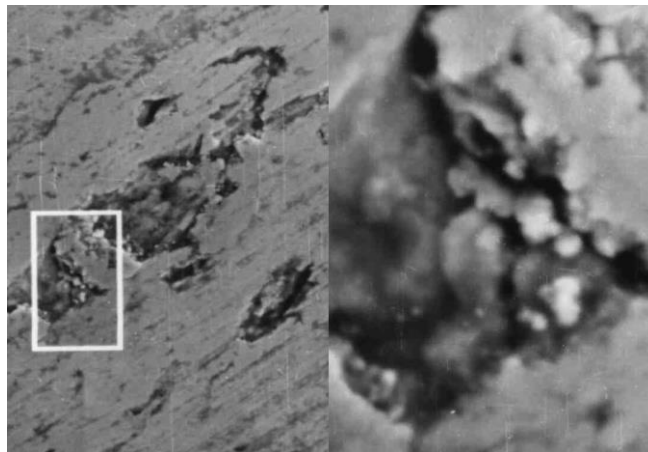


Рис. 5.8. Мікрофотографія поверхонь тертя детонаційних покриттів, напилених порошком Cr-Si-B (x280, x650).

Висновки по розділу 5.

1. Експлуатаційна надійність значною мірою залежить від стану матеріалів в парі тертя, від конструкції вузла і від зовнішніх умов. Тому кожен матеріал повинен мати чітко встановлену область його застосування, оскільки в залежності від властивостей матеріалів і середовища змінюється тільки діапазон і

рівень мінімального тертя та зношування. Цей діапазон структурної пристосованості обумовлений виникненням стійкої дисипативної структури тертя, яка підтримується стаціонарними потоками механічної енергії і речовинами зовнішнього середовища, що взаємодіють з поверхнями тертя.

2. Однією з характерних особливостей роботи деталей пар тертя є те, що довговічність одних деталей залежить від роботи інших. Як встановлено, невисоку експлуатаційну надійність мають такі поєднання матеріалів як алюмінієвий сплав по хромовому покриттю, мідний сплав по алюмінієвому, нікель по нікелю, незагартована сталь по незагартованій сталі. Крім того, працездатність вузла тертя залежить не тільки від сумісності матеріалів, але і від застосовуваної мастила, так в ряді випадків обґрунтований вибір мастила явився вирішальним в надійності вузла тертя.

ВИСНОВКИ

1. Основними результатами досліджень, виконаних відповідно цілям і задачам, поставлених в роботі є створення і випробування композиційних зносостійких покриттів, властивості яких базуються на раціональному використанні недефіцитних легуючих елементів, які, розчиняючись в матеріалі основи (Cr), взаємодіючи з ним і між собою, утворюють стійкі зміцнюючі фази, а на активних поверхнях формують захисні вторинні структури, різні по типу, будові та властивостям. В якості легуючих елементів, сприяючих твердорозчинному зміцненню матричної фази та реалізації механізмів зміцнення за рахунок утворення тугоплавких фаз в роботі застосовано Si, окрім того висока структурна і фазова стабільність досягається введенням В.

2. Досліджено закономірності процесів тертя та зношування розроблених композиційних покриттів, що не містять дорогокоштуючих та дефіцитних компонентів. Встановлено у всьому діапазоні випробувань, наближених до реальних умов експлуатації, високі зносостійкі властивості зазначених покриттів у порівнянні із зразками, отриманими на базі карбіду вольфраму та покриттів на основі нікелю.

3. Показано, що нормальне механохімічне зношування характеризується певним станом поверхні тертя і експериментально встановлено, що оксидні плівки, які утворюються на поверхні тертя в умовах структурної пристосованості, являють собою складний важкоактивованій комплекс вторинних структур у виді простих оксидів та з'єднань типу шпінелі на основі Cr, Si.

4. При дослідженнях в умовах підвищених температур встановлено визначальну роль поверхневих оксидних плівок, які блокують молекулярно-адгезійну взаємодію поверхонь та перешкоджають розвитку процесів контактного скріплення та за стехіометричним складом являють дрібнодисперсну суміш оксидів компонентів складу покриття.

5. Досліджено за допомогою сучасної електронної мікроскопії і рентгенофазного аналізу структурний склад досліджуваних покриттів,

встановлено однорідність градієнту хімічного складу по глибині від поверхні. Показано, що рівномірність розподілу зміцнюючих фаз обумовлює високу зносостійкість.

6. Вивчено триботехнічні процеси структуроутворення зносостійких поверхневих плівок в мастильних середовищах, виявлено механізм впливу ПАР і показано, що зносостійкість визначається характером розподілу хімічних елементів, обумовленого агрегацією легуючих добавок, що входять як до складу покриттів, так і дифундуючих із мастильного матеріалу. Це приводить до збільшення межі текучості, підвищення поверхневої міцності і сприяє формуванню зносостійких структур у вигляді надтонких поверхневих плівок.

7. Вивчено особливості сумісності розроблених покриттів у парах тертя з антифрикційними і конструкційними сталями, бронзами, що дозволило вирішити важливу практичну задачу заміни традиційних антифрикційних матеріалів на основі кольорових металів.

8. На підставі проведених досліджень розроблено технологічні процеси нанесення досліджуваніх покриттів та рекомендації щодо підвищення експлуатаційної надійності деталей, зміцнених покриттями системи Cr-Si-B.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ющенко К.А. Інженерія поверхні / К.А. Ющенко, Ю.С. Борисов, В.Д. Кузнецов // К.:Наукова думка. – 2007. – 557с.
2. Когге Ю. К. Основы надежности авиационной техники / Ю. К Когге., Р. А. Майский // М.:Машиностроение. – 1993. – 176с.
3. Щепотьєв О.І. Надійність авіаційної наземної техніки: підручник / О.І. Щепотьєв , В.В. Щепетов // К.: Вид-во Нац. авіац. ун-ту «НАУ-друк». – 2009. – 328с.
4. Войнов К.Н. Анализ износа пар трения / К.Н.Войнов, М.А.Шварц // Гидравлика и пневматика. – 2003. – №10. – с.8-15.
5. Буше Н.А. Трение, износ и усталость в машинах / Н.А. Буше // М.Транспорт. – 1987. – 223с.
6. Войнов К.Н. Износ и надёжность трибосопряжений / К.Н. Войнов, С.П. Алексеев, Б.В. Громский // Инструмент и технологии. – 2003. – №11-12. – с.73-77.
7. Трибологія / М.В. Кіндрачук, В.Ф. Лабунець, М.І. Пашечко, Є.В. Корбут // К.:Вид-во Нац. авіац. ун-ту «НАУ-друк». – 2009. – 392с.
8. Крагельский И.В. Алисин В.В. Трение, износ и смазка / И.В,Крагельский, В.В. Алисин // М.: Машиностроение. – 1987. – 400с.
9. Крагельский И.В. Основы расчетов на трение и знос / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов // М.:Машиностроение. – 1977. – 526с.
- 10.Ребиндер П.А. Физико-механическая механика / П.А. Ребиндер // М.:Наука. – 1979. – 831с.
- 11.Евдокимов В.Д. Технология упрочнения машиностроительных материалов / В.Д.Евдокимов, Л.П.Клименко, А.П,Євдокимова // Одесса- Николаев: Изд-во НГГУ им. Петра Могилы. – 2005. – с.352.
- 12.Сидеренко С.И. Материаловедческие основы инженерии поверхности / С.И. Сидеренко, В.Н. Пащенко // К.: Наук. Думка. – 2001. – 230с.

13. Kotrechko S.A. Physical fundamentals of a local approach to analysis of brittle fracture of metals and alloys / S.A. Kotrechko, Y.A. Meshkov // Mater. Sci. – 2001. – 37, №.4. – P. 583 - 597.
14. Костецкий Б.И. Трение, смазка и износ в машинах / Б.И. Костецкий // К.: Техника. – 1970. – 396 с.
15. Костецкий Б.И. Износостойкость и антифрикционность деталей машин / Б.И. Костецкий, И.Г. Носовский // К.: Техника. – 1965. – 208 с.
16. Костецкий Б.И. Износостойкость деталей машин / Б.И. Костецкий // М.: Машгиз. – 1950. – 168 с.
17. Костецкий Б.И. Комплекс фундаментальных условий самоорганизации технических трибосистем / Б.И. Костецкий // Варшава: Трибология. – 1987. – № 12. – с.18-27.
18. Костецкий Б.И. Основные положения структурно-энергетической теории трения, смазки и износа / Б.И. Костецкий // Medzinarodne Sympozium o klznom ulozeni, -Bratyslava. – 1977. – с.33-55.
19. Костецкий Б.И. Структурно-энергетическая приспособляемость материалов при трении / Б.И. Костецкий // Трение и износ. – 1985. – т.VI. – №2. – с.201-212.
20. Костецкий Б.И. Управление изнашиванием машин / Б.И. Костецкий // К.: Знание. – 1984. – 20 с.
21. Костецкий Б.И. Фундаментальные основы поверхностной прочности материалов при трении / Б.И. Костецкий // К.: Знание. – 1980. – 28 с.
22. Костецкий Б.И. Металлофизические проблемы надежности и долговечности машин / Б.И. Костецкий, Л.И. Бершадский, А.К. Караулов // Металлофизика К.: Наукова думка. – вып.48. – 1973. – с.4-23.
23. Фляйшер Е.К. Связи между трением и износом / Е.К. Фляйшер // М.: Наука. – 1971. – с.163 – 169.
24. Трибомеханика. Триботехника. Триботехнологии. Т.1. Механика трибоконтактного взаимодействия при скольжении / М.В. Чернец, Л.П.

- Клименко, М.И. Пашечко, А. Невчас // Николаев: Изд-во НГГУ им. Петра Могил. – 2006. – 476с.
25. Кудинов В.В. Нанесение покрытий плазмой / В.В. Кудинов, П.Ю. Пекшев, В.Б. Белащенко // М.:Наука. – 1990. – 406с.
- 26.Гладкий Е.Ф. Плазменная наплавка / П. В. Гладкий, Е. Ф. Переpletчиков, И. А. Рябцев // К.: «Екотехнологія». – 2007. – 292 с.
- 27.Электрошлаковая наплавка / Ю.Кусков, И. Рябцев, И.Сарычев, В.Скороходов // М.: Наука и технологи. – 2001. – 180с.
28. Балдаев Л.Х. Газотермическое напыление / Л.Х. Балдаев, В.Н. Борисов и др. // М.: Маркет ДС. – 2007. – 344 с.
- 29.Гладков А. Коррозионностойкие и жаростойкие материалы. Химическое газофазное осаждение защитных покрытий / А. Гладков, В.Душик, А.Ракочи // М.:МИСиС. – 2013. – 65с.
30. Кравец И.А. Оценка процесса изнашивания по электрической проводимости пары трения / И.А. Кравец, И.И. Кривенко // Проблемы трения и изнашивания. Вып. 17. Техника. – 1980. – с.28-31.
- 31.Повышение надежности машин методами наплавки и напыления / М.И. Черновол, В.Н. Кропивный, Е.К. Соловых и др. // Високі технології в 32 машинобудуванні. Зб. наук. праць. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2002. – Вип. 1(5). – С.432–436.
- 32.Лахтин Ю.М. Материаловедение / Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева // М.: Машиностроение. – 1990. – 528с.
33. Фархшатов М.Н. Повышение износостойкости покрытий при восстановлении деталей / М.Н. Фархшатов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2006. – №6. – С. 17-20.
34. Синдеев Ю.Г. Гальванические покрытия / Ю.Г. Синдеев // РД.: Феникс. – 2000. – 256 с.
- 35.Гамбург Ю. Гальванические покрытия. Технологи, характеристики, применение / Ю.Гамбург // М.:Интеллект. – 2018. – 240с.

36. Машков Ю.К. Трибофизика металлов и полимеров / Ю.К. Машков // О.: Омиту. Машиностроение. – 2013. – 240 с.
37. Технология конструкционных материалов / А.Г. Алексеев, Ю.М. Барон, Т.М. Коротких и др. // СПб.: Питер. – 2015. – 512 с.
38. Yves Pauleau B.C. Materials surface processing by directed energy techniques / Yves Pauleau // Europea materials research society series. – 2006. – 722 p.
39. Михайлов А.А. Повышение надежности хромированных деталей. / А.А. Михайлов // К.: Теория и практика хромирования. – 1973. – 235 с.
40. Мышкин Н.К. Трени, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии / Н.К. Мышкин, М.И. Петроковец // М.: ФИЗМАТЛИТ. – 2007. – 368 с.
41. Гаркунов Д.М. Триботехника (конструирование, изготовление и эксплуатация машин / Д.М. Гаркунов // М.: МСХА. – 2002. – 632 с.
42. Балдаев Л. Х. Газотермическое напыление: Учебное пособие для вузов / Л.Х. Балдаев, В.Н. Борисов, В.А. Вахалин // М.: Маркет ДС. – 2007. – 344 с.
43. Белоцерковский М.А. Технологии активированного газопламенного напыления антифрикционных покрытий / М.А. Белоцерковский // М.: Мир – 2004. – 200 с.
44. Болдаев Л.Х., Борисов В.Н. Газотермическое напыление / Л.Н. Болдаев // М.: Маркет ДС. – 2007. – 344 с.
45. Борисов Ю.С. Газотермические покрытия из порошковых материалов / Ю.С. Борисов, Ю.А. Харламов, С.Л. Сидоренко, Е.Н. Ардатовская // К: Наукова думка. – 1987. – 544 с.
46. Балдаев Л.Х. Требования, предъявляемые к современному оборудованию для газотермического напыления / Л.Х. Балдаев // Химические технологии: – 2004. – №8. – С.28-30.
47. Кудинов В.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование. Учебник для Вузов / В.В. Кудинов, Г.В. Бобров // М.: Металлургия. – 1992. – 432 с.
48. Плазменная технология: Опыт разработки и внедрения / Д.Г. Быховский, А.Я. Медведев, Д.Н. Богданов и др. // Л.: Лениздат. – 1980. – 150 с.

49. Захаров А.М. Активация поверхности основы перед напылением плазменных покрытий / А.М. Захаров, М.И. Патлай // *Авиационная промышленность*. – 1990. – №1. – С. 60-61.
50. Клубникин В.С. Промышленное применение процессов воздушно-плазменного напыления покрытий. / В.С. Клубникин, А.Д. Донской // *Л.: ЛДНТП*. – 1987. – 180 с.
51. Бартенев С.С. Детонационные покрытия в машиностроении. / С.С. Бартенев, Ю.П. Федько, А.И. Григоров // *Л.: Машиностроение*. – 1982. – 215с.
52. Астахов Е.А. Научно-технологические основы управления свойствами детонационных покрытий / Е.А. Астахов // *К.: Институт электросварки им. Е.О.Патона*. – 2005. – 382с.
53. Щепетов В.В. Повышение износостойкости детонационных покрытий путем оптимизации режимов напыления / В.В. Щепетов // *Трение и износ*. – 1999. – Т11. – №5. – С. 844-848.
54. Патент №65010 України. Композиційний зносостійкий матеріал на основі Cr-Si-B для поверхневого зміцнення деталей; С22С 29/14 / С.Д. Недайборщ, І.О. Єгоров, В.В. Щепетов, А.Д. Панасюк, І.О. Подчерняєва, О.В. Харченко // Заявл. 20.04.2011; Бюл. №22.
55. Фролов К.В. Современная трибология: Итоги и перспективы. / К.В. Фролов // *М.: ЛКИ*. – 2008. – 480с.
56. Сорокин В.Г. Стали и сплавы. Марочник. Справочник / В.Г. Сорокин, М. А. Гервасьев // *М.: Интермет Инжиниринг*. – 2001. – 608с.
57. Сорокин В.М. Основы триботехники упрочнения деталей / В.М. Сорокин, А.С. Курников // *Н.: ВГАВТ*. – 2006. – 296с.
58. Кудинов В.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование / В.В. Кудинов, Г.В. Бобров // *М.: Металлургия*. – 1992. — 432 с.
59. Зверев А.И. Детонационное напыление покрытий / А.И. Зверев, Е.А. Астахов, С.Ю. Шаривкер // *Л.: Судостроение*. – 1979. – 231с.
60. Шоршоров М.Х. Физико-химические основы детонационно-газового поучения покрытий / М.Х. Шоршоров, Ю.А. Харламов // *М.: Наука*. – 1978. – 137с.

61. Буханченко С.Е. Специализированные стенды и комплексы для испытания модельных трибосопряжений на трение и износ / С.Е. Буханченко, А.Б. Пушкаренко // II Механика и машиностроение: Сборник трудов. – Томск: ТПУ. – 2000. – С. 186-191.
62. Статистична обробка даних / В.П. Бабак, А.Я. Білецький, П.О. Приставка, О.П. Приставка // К.: МІВВЦ. – 2001. – 388 с.
63. Васильков Д.В. Моделирование контактного взаимодействия в парах трения при модификации их поверхностных слоев / Д.В. Васильков, И.А. Сенчило // Труды Второго Международного Симпозиума по транспортной триботехнике „Транстрибо-2002”. СПб.: Изд-во „Нестор”. – 2002. – с.32-37.
64. Конструкційні та функціональні матеріали / В.П. Бабак, Д.Ф. Байса, В.М. Різак, С. Ф. Філоненко // К.: ТЕХНІКА. – 2003 – 344с.
65. Лапач С.Н. Планирование, регрессия и анализ моделей PRIAM (ПРИАМ) / С.Н. Лапач, С.Г. Радченко, П.Н. Бабич // К.: 1993. – С. 24-27.
66. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ / Н. Дрейпер, Г. Смит // М.: Вильямс. – 2007. – 912.
67. Математичне моделювання формування детонаційних покриттів / В.П. Бабак, В.В. Щепетов, В.І. Мірненко, С.Д. Недайборщ // Технологические системы. – 2016. – № 2(75). – С. 82-88.
68. Носовский И.Г. Авиационное материаловедение / И.Г. Носовский, В.В. Щепетов // КИ ВВС. – 1989. – 287с.
69. Бершадский Л.И. О самоорганизации и концепциях износостойкости трибосистем / Л.И. Бершадский // Трение и износ. 1992. – Т.13. – №6. – С.1021-1025.
70. Недайборщ С.Д. Повышение эксплуатационных характеристик при восстановлении деталей авиационной техники / С.Д. Недайборщ, В.В. Щепетов // Проблемы техники. – 2011. – №1. – С.145-148.
71. Недайборщ С.Д. Закономерности и механизм изнашивания детонационных покрытий Cr-Si-B при нагружении трением в отсутствие смазки / С.Д. Недайборщ // Проблемы тертя та зношування. – 2010. – №54. – С.163-170.

72. Носовский И.Г. О механизме схватывания материалов при трении / И.Г. Носовский // Трение и износ. – 1993. – т.14. – №1. – С. 19-24.
73. Носовский И.Г. Исследование изнашивания стали в воздухе, аргоне и кислороде / И.Г. Носовский // Из-во. АН СССР. – 1977. – С. 87-94.
74. Гарбар И.И. Взаимодействие микрогеометрии и структура металла при трении / И.И. Гарбар // Трение и износ. – 1985. – т.6. – №3. – С. 458-466.
75. Фероленко В.К. Физико-механические свойства при разрушении детонационных покрытий / В.К. Фероленко, В.Х. Кадыров // Порошковая металлургия. – 1987. – №11. – С. 88-94.
76. Бондаренко В.П. Триботехнические композиты / В.П. Бондаренко // К.: Наукова думка. – 1987. – 232с.
77. Мартин Д. Стабильность структуры металлических систем / Д. Мартин, Р. Доерти // М.: Автоиздат. – 1987. – 280с.
78. Попова В.Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения / В.Л. Попова // М.: ФИЗМАТЛИТ. – 2013. – 352с.
79. Трефилов В.И. Дисперсные частицы в металлах / В.И. Трефилов, В.Ф. Моисеев // М.: Наукова думка. – 1987. – 240с.
80. Бакли Д. Поверхностные явления при адгезии и фрикционном взаимодействии / Д. Бакли // М.: Машиностроение. – 1986. – 359с.
81. Пинчук В. Кинетика упрочнения и разрушения поверхностного слоя металлов при трении / В. Пинчук, С. Короткевич // Саарбрюкен: LAP. – 2013. – 180с.
82. Доценко А.И. Основы триботехники / А.И. Доценко, И.А. Буяновский // М.: ИНФРА-М. – 2014. – 336с.
83. Недайборщ С.Д. Сопротивление износу детонационных покрытий Cr-Si-B в экстремальных условиях трения / С.Д. Недайборщ, С.С. Бись // Вісник ХНУ. – 2013. – №6. – С.20-24.
84. Недайборщ С.Д. Износостойкость детонационных покрытий Cr-Si-B при нагружении трением в условиях повышенных температур / С.Д. Недайборщ, В.В. Щепетов // Порошковая металлургия. – 2014. – №1/2. – С.81-89.

85. Babak V.P. Wear resistance under vacuum of nanocomposite coatings with dry lubricant / V.P Babak, V.V. Shchepetov, S.D. Nedayborshch // Scientific bulletin of NMU. – 2016. – № 1. – P.47-52.
86. Смехов А.А. Совмещение электронного и ионного пучков в оже-спектрометрах с цилиндрическим зеркальным энергоанализатором / А.А. Смехов, А.А. Богатырев, С.П. Кузнецов // Заводская лаборатория. – 1989. – №11. – с.49-51.
87. Костецкий Б.И. Поверхностная прочность материалов при трении / Б.И. Костецкий, И.Г. Носовский и др. // К.: Техника. – 1976. – 296 с.
88. Макаренко Г.Н. Синтез, жаростойкость и оптические свойства силицида бора и материалов на его основе / Г.Н. Макаренко, В.Б. Федорус // Порошковая металлургия. – 2007. – №3/4. – С. 45-51.
89. Аналитическое описание структурированного смазочного слоя / Е.В. Березина, В.А. Годлевский, А.Г. Железнов, Д.С. Фомичёв // Жидкие кристаллы и их практическое использование. – 2014. – № 1. – С. 74-79.
90. Дмитриченко Н.Ф. Смазочные процессы в условиях нестационарного трения / Н.Ф. Дмитриченко, Р.Г. Мнацаканов // Житомир: ЖИТИ, 2002. – 308 с.
91. Al-quraan Tareq M.A. Temperature Resistance of the Boundary Lubrication Layers Under Rolling With Slippage Condition / Tareq M.A. Al-quraan, O.O. Mikosyanchik, R.G. Mnatsakanov // International Journal of Mechanical Engineering and Applications. – 2017. – Vol. 5, № 2. – P. 78-86.
92. Al-quraan Tareq M. A. The Effect of the Slippage Degree at Rolling with Slipping on the Wear Resistance of Contact Surfaces / Tareq M.A. Al-quraan, O. O. Mikosyanchik, R. G. Mnatsakanov // Mechanical Engineering Research. – 2016. – Vol. 6, № 2. – P. 48-61.
93. Машков Ю.А. Трибология конструкционных материалов / Ю.А. Машков // Омск.: ОмГТУ. – 2001. – 299с.
94. Основы трибологии / Под ред. А.В. Чичинадзе. // М.: Машиностроение. – 2001. – 664с.

95. Hsu S. M. Boundary lubrication of advanced materials / S. M. Hsu // *Mrs Bulletin*. – 1991. – Vol. 16, № 10. – P. 54-58.
96. Influence of the nature of boundary lubricating layers on adhesion component of friction coefficient under rolling conditions / O. Mikocyanchyk, R. Mnatsakanov, A. Zaporozhets, R. Kostynik // *Eastern-European J. Enterprise Technologies*. – 2016. – № 4/1 (82). – P. 24-31.
97. Костецкий Б.И. Механохимические процессы при граничном трении / Б.И. Костецкий, М.Э. Натансон, Л.И. Бнршадский // М.: Наука. – 1972. – 169с.
98. Хоменко А. В. Статистическая теория граничного трения атомарно-гладких твердых поверхностей при наличии смазочного слоя / А.В. Хоменко, Я.А. Ляшенко // *Успехи физических наук*. – 2012. – Т. 182, № 10. – С. 1083-1110.
99. Шевеля В. В. Трибохимия и реология износостойкости / В.В. Шевеля, В.П. Олександренко // Хмельницкий: ХНУ, 2006. – 278 с.
100. Lubricating calculation for area contact of regular concave profiles / W. Jiadao, C. Darong, K. Xianmei, J. Kaiyuan // *Journal of Tsinghua University*. – 2001. – Vol. 41, № 2. – P. 42-45.
101. Ludwig M. Simulation of Dynamic Lubricant Effects in Sheet Metal Forming Processes / M. Ludwig, C. Müller, P. Groche // *Key Engineering Materials*. – 2010. – Vol. 438. – P. 171-178.
102. Yanzhong W. Wet Friction-Elements Boundary Friction Mechanism and Friction Coefficient Prediction / W. Yanzhong, W. Bin, W Xiangyu // *Tribology in Industry*. – 2012. – Vol. 34, № 4. – P. 198-205.
103. Недайборщ С.Д. Закономерности изнашивания детонационных покрытий системы Cr-Si-B в условиях граничной смазки / С.Д. Недайборщ, С.С. Бись // *Вісник ХНУ*. – 2010. – №5. – С.154-157.
104. Щепетов В.В. Износостойкость детонационных покрытий из порошков Ni-Al-Si, Ni-Al-B в условиях граничной смазки / В.В Щепетов., В.Х. Кадыров // *Порошковая металлургия*. – 1999. – №11. – С. 74–77.
105. Комбалов В.С. Методы и испытания на терние и износ конструкционных и смазочных материалов / В.С. Комбалов // М.: Машиностроение. – 2008. – 384с.

106. Недайборщ С.Д. Влияние элементоорганических присадок на процессы трения и изнашивания детонационных покрытий / С.Д. Недайборщ, В.В. Щепетов, О.В. Харченко // Проблемы техники. – 2012. – №1. – С.57-65.
107. Усачев В.В. Смазочные материалы с добавками / В.В.Усачев, Л.И. Погодаев // Проблемы машиностроения и надёжности машин. – 2009. – №3/4. – С. 63–68.
108. Справочник по триботехнике / Под ред. А.В. Чичинадзе. // М.: Машиностроение. – 1990. – Т.2. – 416с.
109. Владимиров В.И. Физика износостойкости поверхности материалов / В.И. Владимиров // Л.: ФТИ. – 2011. – 252с.
110. Полищук И.Е. Особенности изнашивания газотермических покрытий из эвтектических сплавов / И.Е. Полищук, В.Е. Оликер, В.Б. Войтович и др. // Трение и износ. – 1987. – Т.8 – №3. – С. 467–472.
111. Фукс Г.И. Проблемы граничной смазки / Г.И.Фукс // М.: Машиностроение. – 2001. – 192с.
112. Чичинадзе А.В. Материалы в триботехнике нестандартных процессов / А.В. Чичинадзе, Р.М. Матвеевский, Э.Д. Браун // М.: Наука. – 1986. – 248с.
113. Таранова Е.С. Влияние смазочной среды на изменение характеристик трения при качении / Е.С.Таранова // Минск: Актуальные вопросы машиностроения. – 2016. – С.285-289.
114. Теоретичні аспекти структурно-реологічного стану граничних змащувальних шарів в парах тертя / О.О.Мікосянчик, Р.Г. Мнацаканов, А.М.Хімко та ін. // К.:Проблеми трибології. – 2018. – Т.89. – С.132-134.
115. Костецкий Б.И. Надежность и долговечность машин / Б.И. Костецкий // К.: Техника. – 1975. – 406с.
116. Анализ состояния, тенденции развития и рекомендации по применению защитных покрытий / Б.А.Ляшенко, Н.А.Зенкин, Б.Ф.Пипа и др. // К.: ГАЛПУ. – 1999. – 49с.
117. Основы механики и технологи композиционных материалов / Г.Е. Фрегер, М.Д. Аптекарь, Б.Б. Игнатъев и др. // К.: Аристей. – 2004. – 524с.

118. Скороходов В.В. Физическое материаловедение и физико-химические основы создания новых материалов / В.В. Скороходов // Киев. – 1994. – 182с.
119. Крагельский И.В. Узлы трения машин. / И.В. Крагельский, Н.М. Михин // М.: Машиностроение. – 1984. – 279с.
120. Степанова Т.Ю. Технология поверхностного упрочнения деталей машин / Т.Ю. Степанова // Иваново. – 2009. – 64с.
121. Айнбиндер С.Б. Исследование противоизносных свойств композиционных смазок / С.Б. Айнбиндер, В.Ю. Соколов, С.П. Андронов // Трение и износ. – 1984. – Т.5 – №2. – С. 335-340.
122. Виппер А.Б. Зарубежные масла и присадки / А.Б. Виппер, А.В. Виленкин, Д.А. Гайснер // М.: Химия. – 1981. – 187с.
123. Недайборщ С.Д. Сопротивление износу детонационных покрытий Cr-Si-B в экстремальных условиях трения / С.Д. Недайборщ, С.С. Бись // Вісник ХНУ. – 2013. – №6. – С.20-24.
124. Tyagi A. Materials under extreme conditions recent trends and future prospects edited / A. Tyagi, S.Banerjee// BARC.:Mumbai, India. – 2017. – 841p.
125. Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин / А.Г.Суслов // М.: Машиностроение. – 2000. – 319с.
126. Малышкин Н.К. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии / Н.К. Малышкин, М.И. Питроковцев // М.:Физматлит. – 2007. – 368с.
127. Mellor V.G. Surface coating for protection against wear / V.G.Mellor // CRC Press: Boca Raton Boston New York Washington, DC. – 2006. – 430p.
128. Алексеев Н.М. Новое о структурной особенности трения / Р.И. Богданов, Н.А. Буше // Трение и знос. – 1988. – т.9. – №6 – С. 965-974.
129. Гаркунов Д.Н. Триботехника / Д.Н. Гаркунов // М.: МСХА. – 2001. – 616с.
130. Шпенько Г.П. Физикохимия трения / Г.П. Шпенько // Минск: Университетское. – 1991. – 396с.
131. Буше Н.А. Совместимость трущихся поверхностей. / Н.А. Буше, В.В. Копытько// М.:Наука. – 1981. – 128с.

132. Назаренков Н.А. Коррозия и защита металлов. / Н.А. Назаренко, С.В. Литовченко, И.М. Неклюдов // Х.:ХНУ. – 2007. – 187с.
133. Федотов А.К. Физическое материаловедение / А.К. Федотов, В.М. Анищик, М.С.Тиванов // М.:Высшая школа. – 2016. – 465с.
134. Уайт Р. Дальний порядок в твердых телах / Р.Уайт, Т. Джебелл // М.: Мир. – 1999. – 446 с.
135. Харламов Ю.А Основы технологии восстановления и упрочнения деталей машин / Ю.А. Харламов, Н.А.Будигьянц // Луганск: Из-во им. В.Даля. – 2003. – 496 с.

ДОДАТКИ

- А. Акт впровадження результатів науково-дослідної роботи.
- Б. Технологічна інструкція нанесення детонаційних покриттів Cr-Si-B.
- В. Опубліковані праці за темою дисертації.

Акт впровадження результатів науково-дослідної роботи.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заступник генерального директора

ТОВ „Челендж аеропорт”

Вознюк В.В.



АКТ

впровадження результатів науково-дослідної роботи

Комісія компанії ТОВ „Челендж аеропорт” у складі:

голова комісії: начальник ССТ Ульяненко В.Ю.

члени комісії: головний інженер Черкашинін Я.С., інженер Довгань М.В.

склала цей акт про те, що результати науково-дослідної роботи, в рамках дисертаційної роботи Недайборща С.Д., рекомендовано до впровадження при проведенні ремонтних робіт агрегатів та деталей авіаційної техніки компанії.

Отримані результати експлуатації відновлених важконавантажених шестерень коробки приводів доводять, що зносостійкі композиційні покриття Cr-Si-B при зміцненні та відновленні деталей та агрегатів авіаційної техніки підвищують їх опір зносу у порівнянні з існуючими матеріалами, як результат - збільшення ресурсу та міжремонтного інтервалу в 1,5-2 рази.

Голова комісії:

Члени комісії:

Handwritten signatures of the commission members.

Ульяненко В.Ю.

Черкашинін Я.С.

Довгань М.В.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заступник генерального директора

ТОВ "Челендж аеропорт"

Вознюк В.В.



ТЕХНОЛОГІЧНА ІНСТРУКЦІЯ

на спеціальний процес

**Відновлення зношених деталей авіаційної техніки
детонаційним нанесенням покриттів Cr-Si-B**

Погоджено:

Ульяненко В.Ю.

Черкашинін Я.С.

Довгань М.В.

Розробник:

Недайборщ С.Д.

Зміст

1. Призначення інструкції
2. Загальні положення
3. Перелік деталей відновлюваних детонаційним методом
4. Технологічні рекомендації по детонаційному напиленню деталей
5. Фінішна механічна обробка
6. Основні види дефектів покриттів і способи їх усунення
7. Контроль якості покриттів
8. Техніка безпеки та охорона праці при напиленні.

1. Призначення інструкції

1.1. Дана інструкція є керівництвом з технології детонаційного напилення покриттів Cr-Si-B з метою відновлення, підвищення довговічності та надійності деталей, які працюють в різних умовах тертя, середовища і мастил.

1.2. Інструкція призначена конструкторам, технологам, операторам установок детонаційного напилення, співробітникам лабораторій, контролюючим органам для керівництва по проектуванню виробів, контролю і прийнятті деталей, які підлягають детонаційному напиленню.

2. Загальні положення

2.1. Вданій інструкції викладені технологічні процеси детонаційного напилення для відновлення зношених поверхонь деталей машин і механізмів авіаційної техніки.

2.2. Відновлення зношених деталей методом детонаційного напилення проводиться на будь яких детонаційних установках, які можуть реалізувати необхідні режими для напилення порошків Cr-Si-B.

2.3. Основні технічні характеристики детонаційної установки

№	Параметри	Величина
1	Робочі гази	Пропан-бутан, ацетилен, кисень
2	Технологічне середовище	Аргон, вода та інші охолоджувачі.
3	Витрати газів, м ³ /ч:	
	кисень	0,09-1,65
	пропан-бутан	0,03-0,06
	ацетилен	0,025-0,04
	азот	0,04-0,08
4	Діаметр ствола, мм	8-40
5	Швидкість пострілів/с	4-20

2.4. Основні характеристики покриттів Cr-Si-B нанесених детонаційним методом

Покриття	Товщина, мм	Поріг міцності до руйнування,	Міцність зчеплення з	Мікротвердість, ГПа
Cr-Si-B	0,1–0,20	0,79–0,87	74–92	10,5–12,3

2.5. Високоміцне щеплення розпилених частинок порошку з основою (підложкою), забезпечується мікрозварюванням. Формування газопошквої суміші і її вибух відбувається в спеціальній камері, куди порошок подається струменем газу.

2.6. При кожному вибухові, протяжністю 0,05-0,2с, утворює шар товщиною 7-70мкм. Багат шарове покриття має оптимальну товщину 0,1-2,0мм

2.7. Деталь при вибухові робить поступальні або обертальні рухи.

2.8. Розмір та форма деталі при детонаційно-газовому напиленні не обмежена та визначається технологічними можливостями обладнання для переміщення виробів в процесі нанесення покриттів та розмірами звукоізоляційного боксу, в якому відбувається напилення.

2.9. Внутрішні циліндричні поверхні діаметром більше 10мм відкриті з обох кінців повинні мати довжину, що перевищує 1,5 діаметра.

2.10. Найбільш ефективно нанесення детонаційних покриттів на деталі, які працюють в умовах тертя при високих швидко-навантажувальних параметрах, а також в якості зносо- та корозійностійких покриттів на деталі авіаційної техніки.

2.11. Перед напиленням поверхню деталі необхідно почистити від забруднень та створити на її поверхні шорсткий рельєф, наприклад методом струменевої обробки абразивними порошками.

2.12. Детонаційні покриття наносять на робочі поверхні попередньо знежирених деталей.

2.13. Після закінчення процесу напилення, при технологічній необхідності поверхню обробляють шліфувальними інструментами та додатково полірують.

2.14. Метод технологічно доступний та економічно ефективний, в тому ж випадку в умовах одиничного багатоменклатурного виробництва.

2.15 Товщину нанесеного покриття обираємо в залежності від рівня зносу та необхідності відновлення деталі, а також умов їх експлуатації.

2.16. Сполучні поверхні деталей, в залежності від застосовуваного матеріалу, можуть пройти кінцеву обробку (шліфовку або надтонку доводку) до отримання високого ступеня чистоти, яка необхідна для прецизійних деталей.

2.17. Застосування детонаційного напилення з матеріалів сировинної бази країни, веде до економії матеріальних засобів, збільшення терміну служби машин і зменшення простою обладнання.

2.18. Нанесення покриттів Cr-Si-B дозволяє підвищувати зносостійкість та ерозійну стійкість деталей в 1,5-2 рази.

2.19. Детонаційні покриття Cr-Si-B найбільш доцільно застосовувати в екстремальних умовах експлуатації, коли на робочі поверхні деталей діють механічні і термічні навантаження, часто разом з активними газовими і рідкими середовищами.

3. Перелік деталей відновлюваних детонаційним методом

3.1. До переліку деталей відновлюваних детонаційно-газовим методом напиленням порошків Cr-Si-B відносяться деталі авіаційної техніки які працюють в умовах тертя при високих швидкісно-навантажувальних параметрах, а також в якості зносо- та корозійностійких покриттів.

3.2. Повний перелік деталей з зазначенням номерів, встановлюється технологіями підприємства, на якому впроваджено в технологічних процесах відновлення даний метод та порошки.

4. Технологічні рекомендації по детонаційному напиленню деталей.

4.1. Підготовка поверхні деталей.

4.1.1. Деталь, яка надійшла для детонаційного нанесення покриттів системи Cr-Si-B, повинна відповідати вимогами креслення з урахуванням товщини напилення.

4.1.2. Твердість поверхні не повинна перевищувати HRC 53-57.

4.1.3. На робочих поверхнях деталей не повинно бути пошкоджень, плям зварки, напливів, пайки, залишків флюсу, раковин, тріщин, та інших нерівностей.

4.1.4. Поверхня деталі повинна бути очищена та знежирена.

4.1.5. Очистка деталей проводиться обдуванням на піскоструминному апараті. Шорсткість поверхні після обробки повинна бути R_z 400.

4.1.6. Нанесення покриття на оброблену поверхню проводиться протягом 1-2 години після очистки (не пізніше 15-20 хв. після обезжирювання).

4.1.7. Обезжирювання проводиться протиральним матеріалом, змоченим розчинником або бензином-калошею

4.1.8. Поверхня деталі яка не підлягає нанесенню покриття, повинна бути захищеною листами металу від дії струменя піскоструменевого апарату (зона обробки на ≈ 5 мм більша зони напилення) та струменя напилюваних частинок.

4.1.9. Деталі підготовлені до нанесення покриттів повинні зберігатись в приміщенні при температурі не вище 18°C та відносній вологості 75%. При цьому не допускається наявність в повітрі корозійно-активних елементів, та попадання на поверхню води або інших рідин.

4.1.10. При нанесенні покриттів, на поверхні що перетинаються необхідно закруглити поверхні радіусом 0,4мм при нанесенні покриттів на обидві поверхні та радіусом 0,125мм при нанесенні на одну поверхню.

4.1.11. При нанесенні покриттів на поверхні які мають отвори, необхідно попередньо ізолювати дані отвори заглушками. Для отримання гострих кромek, необхідно в отвір запресувати алюмінієву заглушку, яку після нанесення покриття висвердлити.

4.2. Підготовка порошків та допоміжних матеріалів.

4.2.1. Порошки та гази, для нанесення покриттів, мають мати сертифікати відповідності.

4.2.2. Порошки повинні зберігатись в герметично закритій тарі.

4.2.3. Розмір частинок напилюваного порошку повинен відповідати вимогам для напилення.

4.2.4. Перед напиленням порошки необхідно просіяти та просушити. Просіювання порошку відбувається за допомогою автоматичної установки або вручну за допомогою сит відповідного фракційного розміру. Просушування проводиться при температурі 150-200 °С протягом 1-2 год.

4.2.5. Просіяні, просушені та охолоджені порошки до кімнатної температури готові до застосування.

4.2.6. Допускається зберігання порошків при відносній вологості повітря не більше 65-70% та відкритій тарі не більше 10 год, в металевій або пластмасовій тарі не більше 24 год. Якщо термін зберігання перевищує вказаний, необхідно повторно провести операцію просушки.

4.2.7. При зберіганні порошків необхідно враховувати матеріал тари, щоб не допустити контактної корозії.

4.2.8. Гази які застосовуються в технологічному процесі: Кисень ГОСТ 5583-78, Пропан-бутан ГОСТ 20448-75, Азот ГОСТ 9293-74, Ацетилен ГОСТ 5457-75. Вибір газів залежить від технічної характеристики установки та технології напилення.

4.3. Підготовка установки до роботи.

4.3.1. Витрати порошку і транспортуючого газу встановлюються відповідно до операційної карти напилення.

4.3.2. Втрати робочих газів встановлюються відповідно до операційної карти напилення.

4.3.2. Встановити необхідні оберти і швидкість повздовжнього переміщення деталі, а також відстань між зрізом ствола детонаційної пушки і деталі.

4.3.3. Відстань між зрізом ствола детонаційної пушки і деталлю встановити у межах 70-150мм.

4.3.3. Перед початком напилення відрегулювати подачу порошку та робочих газів.

4.4. Процес нанесення покриттів.

4.4.1. Провести нанесення покриттів на зразок, заміряти товщину покриття та міцність щеплення з основою.

4.4.2. Необхідну товщину шару покриття отримують за декілька циклів напилення. Зміщення деталі між двома циклами не повинно перевищувати 1/2 діаметру стволу.

4.4.3. Під час нанесення покриттів необхідно контролювати точність витрат і тиск робочих газів, контролювати тиск відсікаючих газів, роботу системи подачі порошку.

5. Фінішна механічна обробка.

5.1. При плоскому шліфуванні деталей з детонаційним покриттям необхідно застосовувати алмазні і ельборові круги, зернистість 68/50-100/80. Застосування шліфувальних кругів із звичайних абразивних матеріалів недопустимо, із-за можливості розтріскування покриттів навіть при мінімальній глибині врізання круга в поверхню.

5.2. При виборі режимів шліфування необхідно виходити із умов отримання заданої шорсткості поверхні, недопустимості вищерблювання покриття, утворення тріщин та сколів.

5.3. Для зняття нерівностей напиленої поверхні рекомендовано виконувати чорнове шліфування з подальшим чистовим.

6. Основні види дефектів покриттів і способи їх усунення

Вид дефекту	Причина утворення дефекту	Міри попередження	Спосіб усунення
Низький ступінь зчеплення покриття з поверхнею деталі	Погана підготовка поверхні; невідповідність режимів напilenня; наявність вологи в напилюваних порошках та стволі установки.	Виконувати вимоги технологічного процесу підготовки поверхні, підготовки порошкових матеріалів, режимів нанесення.	Покриття видаляють механічною обробкою з подальшим повторенням всього технологічного процесу.
Зміна кольору: а) потемніння б) виявлення кольорів мінливості	а) напilenня проводилось при недостатній кількості кисню б) великі витрати порошку	а) відрегулювати кількість газів в робочій суміші б) відкоригувати дозування порошку	
Різномовщинність покриттів по довжині деталі; відсутність покриття на окремих ділянках деталі.	Неузгодженість швидкості переміщення деталі з темпом стрільби установки, нестабільність роботи дозатора	Відкоригувати швидкість переміщення деталі з темпом стрільби, слідкувати за витратами порошку	
Напilenня великих частинок на покриття	Забруднення стволу установки	Провести очищення стволу установки	
Недостатня товщина покриття	Недостатність порошку; малий час напilenня; забитий отвір подачі порошку	Відрегулювати рівень порошку, час подачі, прочистити канал	
Наявність тріщин, сколів, здуття	Великі витрати порошку; товщина покриттів більше	Відрегулювати подачу порошку, зменшити товщину	

	допустимого; порушення режимів напилення	покриття, зберігати режим напилення	
--	--	--	--

7. Контроль якості покриттів

7.1. Контроль покриттів проводиться по зовнішнім признакам за допомогою лупи ЛІ-3, ЛІ-4. Покриття повинно бути рівним, однорідним по кольору, відсутні сколи, здуття та відшарування.

7.2. Товщина на деталях виміряється мікрометром по ГОСТ 6507-78, штангель циркулем по ГОСТ 166-80 і методом контролю товщини покриттів по ГОСТ 9.302-88.

7.3. Міцність щеплення покриття з основою визначається по ГОСТ 9.302-88.

7.4. Металографічний контроль та його частота встановлюються індивідуально для кожного виробу.

7.5. Мікротвердість покриттів визначається по ГОСТ 9450-76, твердість по Роквелу по ГОСТ 9013-59 на твердомірі по ГОСТ 9013-59.

7.6. Пористість покриття визначається методом гідростатичного зважування по ГОСТ 18896-73 або ГОСТ 9.302-79.

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Недайборщ С.Д. Закономерности и механизм изнашивания детонационных покрытий Cr-Si-B при нагружении трением в отсутствии смазки / С.Д. Недайборщ // Проблеми тертя та зношування. – 2010. – №54. – С.163-170.
2. Недайборщ С.Д. Закономерности изнашивания детонационных покрытий системы Cr-Si-B в условиях граничной смазки / С.Д. Недайборщ, С.С.Бись // Вісник ХНУ. – 2010. – №5. – С.154-157.
3. Недайборщ С.Д. Физические аспекты совместимости детонационных покрытий с триботехническими материалами / С.Д. Недайборщ, В.В. Щепетов // Проблеми тертя та зношування. – 2011. – №55. – С.189-197.
4. Недайборщ С.Д. Повышение эксплуатационных характеристик при восстановлении деталей авиационной техники / С.Д. Недайборщ, В.В.Щепетов // Проблеми техніки. – 2011. – №1. – С.145-148.
5. Недайборщ С.Д. Влияние элементоорганических присадок на процессы трения и изнашивания детонационных покрытий /С.Д. Недайборщ, В.В.Щепетов, О.В. Харченко // Проблеми техніки. – 2012. – №1. – С.57-65.
6. Недайборщ С.Д. Сопротивление износу детонационных покрытий Cr-Si-B в экстремальных условиях трения / С.Д. Недайборщ, С.С.Бись // Вісник ХНУ. – 2013. – №6. – С.20-24.
7. Недайборщ С.Д. Износостойкость детонационных покрытий Cr-Si-B при нагружении трением в условиях повышенных температур / С.Д. Недайборщ, В.В.Щепетов // Порошковая металлургия. – 2014. – №1/2. – С.81-89. SCOPUS
8. Математичне моделювання формування детонаційних покриттів / В.П. Бабак, В.В. Щепетов, В.І. Мірненко, С.Д. Недайборщ // Технологические системы. – 2016. – № 2(75). – С.82-88. COPERNIKUS
9. Babak V.P. Wear resistance under vacuum of nanocomposite coatings with dry lubricant / V.P Babak, V.V. Shchepetov, S.D. Nedayborshch // Scientific bulletin of NMU. – 2016. – № 1. – P.47-52. SCOPUS

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

10. Недайборщ С.Д. Структуроутворення зносостійких детонаційних покриттів системи Cr-Si-B / С.Д. Недайборщ // Матеріали XI МНТК “АВІА-2013”. – 2013. – Т3. – С.15.1-15.4.

11. Недайборщ С.Д. Влияние присадок на процессы трения и изнашивания детонационных покрытий системы Cr-Si-B / С.Д. Недайборщ // Матеріали 4-ї МК HighMatTech. – 2013. – С.331.

12. Недайборщ С.Д. Износостойкость детонационных покрытий Cr-Si-B в тяжело нагруженных узлах трения / С.Д. Недайборщ // Матеріали МНТК „Сучасні проблеми машинознавства”. – 2013. – С.10.

13. Недайборщ С.Д. Износостойкость детонационных покрытий Cr-Si-B в экстремальных условиях трения / С.Д. Недайборщ // Матеріали 8-ї МК «Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследования, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий». – 2014. – С.93.

14. Nedaiborshch S.D. Resistance to wear of detonation coatings Cr-Si-B in a vacuum which contains molybdenum disulfide / S.D. Nedaiborshch, O.V. Chahrchenko // Конгрес „Авіація у ХХІ столітті”. – 2014. – С.1.1.60-1.1.63.

15. Недайборщ С.Д. Износостойкость детонационных наноконпозиционных покрытий Cr-Si-B в условиях высоких температур / С.Д. Недайборщ // Матеріали 5-ї МК HighMatTech. – 2015. – С.160.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

16. Патент №65010 України. Композиційний зносостійкий матеріал на основі Cr-Si-B для поверхневого зміцнення деталей; С22С 29/14 / С.Д. Недайборщ, І.О. Єгоров, В.В. Щепетов, А.Д. Панасюк, І.О. Подчерняєва, О.В. Харченко // Заявл. від 20.04.2011; Бюл. №22.