

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Зварювальний факультет
Кафедра інженерії поверхні**

«На правах рукопису»
УДК 621.793.79

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____ І.В. Смирнов
«__» _____ 20 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 132 Матеріалознавство

**на тему: «Абразивна зносостійкість електроіскрових
композиційних покриттів на основі ZrB_2 »**

Виконав:

студент II курсу, групи ЗП-71мп
Єрко Олександр Олександрович

Керівник:

Д.т.н., професор
Копилов В.І.

Консультант з охорони праці:

Зав. каф. д.т.н. проф.
Левченко О.Г.

Рецензент:

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент _____

Київ – 2018 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського» Зварювальний факультет
Кафедра інженерії поверхні**

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність (спеціалізація) – 132 «Матеріалознавство» («Інженерія та нанотехнології покриттів»)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ І.В. Смирнов

«___» _____ 20 р.

**ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту**

Єрку Олександр Олександровичу

1. Тема дисертації «Абразивна зносостійкість електроіскрових композиційних покриттів на основі ZrB_2 »,
науковий керівник дисертації Копилов В.І. д.т.н., професор.

затверджені наказом по університету від «13» листопада 2018 р. №4156-с

2. Термін подання студентом дисертації 18.12.2018р.

3. Об'єкт дослідження

4. Вихідні дані

5. Перелік завдань, які потрібно розробити

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу

7. Орієнтовний перелік публікацій

8. Консультанти розділів дисертації*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Левченко О.Г. зав.каф д.т.н. проф.		

9. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка

Студент

Єрко О.О.

Науковий керівник дисертації

Копилов В.І.

АНОТАЦІЯ

Єрко О. О. «Абразивна зносостійкість електроіскрових композиційних покриттів на основі ZrB_2 », магістерська робота на здобуття кваліфікації магістра за спеціальністю 705050403 «Відновлення та підвищення зносостійкості деталей і конструкцій», Національного Технічного Університету України «Київський Політехнічний Інститут ім. І. Сікорського», Київ, 2018 рік. Обсяг дипломної роботи складається зі 110 сторінок друкованого тексту, 53 рисунки, 26 таблиць. Робота присвячена розробці технології електроіскрового легування на основі електродних матеріалів, що містять ZrB_2 для запобігання абразивного зношування.

В роботі проведений літературний огляд за даною науковою проблематикою, виконано дослідження параметрів міцності отриманих покриттів. Зроблені висновки по результатам теоретичних досліджень і експериментальних даних.

АННОТАЦИЯ

Єрко А. А. «Абразивная износостойкость электроискровых композиционных покрытий на основе ZrB_2 », магистерская работа на получение квалификации магистра по специальности 705050403 «Восстановление и повышение износостойкости деталей и конструкций», Национального Технического Университета Украины «Киевский Политехнический Институт им. И. Сикорского », Киев, 2018. Объем дипломной работы состоит из 110 страниц печатного текста, 53 рисунков, 26 таблиц. Работа посвящена разработке технологии электроискрового легирования на основе электродных материалов, содержащих ZrB_2 для предотвращения абразивного износа.

В работе проведен обзор литературы соответствующей научной проблематики, выполнено исследование электрофизических и прочностных характеристик получаемых покрытий. Сделаны выводы по результатам теоретических исследований и экспериментальных данных.

ABSTRACT

Yerko A. A. “Abrasive wear resistance of electric spark composite coatings based on ZrB_2 ”, master's work for obtaining a master's qualification in the specialty 705050403 “Restoration and improvement of wear resistance of details and structures”, National Technical University of Ukraine «Kiev Polytechnic Institute named after I. Sikorsky”, Kiev, 2018. The volume of the thesis consists of 110 pages of printed text, 53 figures, 26 tables. The work is devoted to the development of electric spark alloying technology based on electrode materials containing ZrB_2 to prevent abrasive wear.

The literature review of relevant scientific issues was conducted; it had investigated the strength parameters of obtained coatings. Conclusions are made by the results of theoretical studies and experimental data.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ, ВИЗНАЧЕНЬ

ВСТУП.....	9
1. Літературний огляд.....	11
1.1 Електродні матеріали для нанесення електроіскрових покриттів.....	11
1.1.1 Металеві сплави.....	11
1.1.2 Вольфрамові тверді сплави.....	13
1.1.3 Композити на основі тугоплавких сполук	14
1.2 Фізико-хімічна модель процесу електроіскрового легування.....	16
1.3 Фактори, що впливають на процеси електромасопереносу.....	19
1.4 Механізми абразивного зношування.....	22
1.4.1 Абразивне зношування.....	22
1.5 Кінетика електромасопереносу і структурно-фазові перетворення при електроіскровому і лазерноелектроіскровому легуванні титанових сплавів керамікою на основі ZrB_2	26
1.5.1 Кінетика електромасопереносу.....	27
1.5.2 Особливості мікроструктури, глобулоутворення і фазовий склад електроіскрових покриттів.....	28
2. Обладнання, матеріали та методика експериментів.....	34
2.1 Параметри режиму легування	34
2.2 Параметри лазерного оплавлення.....	35
2.2.1 Мікроструктура і фазовий склад лазерно-електроіскрових покриттів.....	35
2.2.2 Мікротвердість електроіскрових і лазерно-електроіскрових покриттів.....	38
2.3 Методи отримання і характеристика електродних матеріалів.....	44
2.4 Обладнання для подрібнення порошків.....	46
2.5 Методи вивчення триботехнічних властивостей.....	49

2.5.1 Зношування нежорстким закріпленням абразивом.....	49
2.6 Методи дослідження кінетики масопереносу, складу, структури, фізико-механічних та фізико-хімічних властивостей робочих поверхонь.....	50
3. Аналіз та розрахунки напружено–деформованого стану функціонального покриття на поверхнях, що працюють в умовах фриційного контакту	52
3.1 Структурно-енергетичні особливості процесу формування покриття при електричному розряді.....	53
4. Механізм і кінетика зносу. Структурно-фазові перетворення на поверхні електроіскрових і лазерно-електроіскрових покриттів, які містять ZrB_2 на титанових сплавах в умовах зношування на повітрі.....	56
4.1 Формування поліоксидного шару на зношених поверхнях, кінетика і механізм абразивного зношування покриттів на сплаві ВТ-20.....	57
4.1.1 Властивості поверхні покриттів після абразивного зношування.....	57
4.1.2 Мікроструктурні зміни по глибині зламу лазерно-електроіскрового покриття після абразивного зношування.....	63
4.1.3 Формування поліоксидного шару на поверхні покриттів в процесі абразивного зношування.....	71
4.1.4 Кінетика і механізм абразивного зношування покриттів.....	76
4.1.5 Залежність абразивної зносостійкості покриттів від об'ємного вмісту ZrB_2 в матеріалі електрода.....	81
5. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.....	85
5.1 Аналіз шкідливих та небезпечний факторів.....	85
5.2 Інженерні рішення для забезпечення безпеки технологічного процесу та запобігання дії шкідливих та небезпечний виробничих факторів.....	86
5.3 Вимоги безпеки в надзвичайних ситуаціях.....	93

6. Розроблення стартап-проекту.....	96
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	103
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	104
Додатки	

ВСТУП

Сьогодні актуальним є розвиток наукоємких виробництв з високою ефективністю і якістю продукції, заснованих на застосуванні сучасних технологічних процесів і нових матеріалів, що дозволяють значно знизити витрату енергетичних, трудових і сировинних ресурсів.

Основною причиною виходу з ладу деталей і механізмів, які працюють в умовах фрикційного контакту є їх знос. У переважній більшості випадків стан робочих поверхонь механізмів і елементів контактуючих пар та умови експлуатації визначають їх довговічність. При цьому обов'язковою вимогою є тривале збереження функціональних властивостей поверхні.

Одним із пріоритетних напрямків, що склалися у сучасному машинобудуванні, є поверхневе зміцнення і нанесення композиційних покриттів на елементи взаємодіючих пар механізмів.

Одним з найбільш ефективних і продуктивних методів зміцнення поверхонь деталей є електрофізичні методи, до яких відноситься електроіскрове легування поверхонь.

Мета роботи: розробка технології електроіскрового легування на основі електродних матеріалів, що містять ZrB_2 для запобігання абразивного зношування. Для досягнення поставленої мети в роботі вирішені наступні завдання:

- проведено комплекс фізико-хімічних досліджень поверхні покриттів (до і після зношування) і електродні матеріали;
- досліджені кінетика і механізм процесів абразивного зношування без змащення розроблених покриттів для різних складів легируючого електрода, режимів тертя і способів нанесення покриттів;
- вивчена кінетика електромассопереноса в системах «кераміка - титан».

ПЕРЕЛІК ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ, ВИЗНАЧЕНЬ

ЕІЛ – електроіскрове легування;

ЛО – лазерна обробка;

БСФ – боросилікатна фаза;

ТОМ – тугоплавка оксидна матриця;

АЗ – абразивний знос.

1 Літературний огляд

1.1 Електродні матеріали для нанесення електроіскрових покриттів

Для ЕІЛ металевих поверхонь, в тому числі різних класів сталей і сплавів, широко використовують інтерметаліди систем Ni-Al, Ni-Cr, Fe-Al, Ti-Al, металеві сплави систем Al-Si, Al-Co-Ce, Co-Cr, Zr-Ti-Ni-Cu-Be і метали. Мета цих робіт - підвищити фізико-механічні властивості робочих поверхонь за рахунок збільшення їх твердості, зносо-, корозійної і кавітаційної стійкості. Ця мета може бути досягнута в процесі електроіскрового легування внаслідок мікрометалургійних процесів і фазоутворення як по товщині покриття, так і на кордоні «основа-покриття», а також завдяки дискретності електроіскрових покриттів і можливості аморфізації осаджуваних сплавів внаслідок відносно високої швидкості їх охолодження при ЕІЛ.

1.1.1 Металеві сплави

Металеві сплави завдяки більш низьким (в порівнянні з твердими сплавами і тугоплавкими сполуками) температурам плавлення і холодноламкості еродують переважно в рідко-паровій фазі, що сприяє високому коефіцієнту масопереносу і суцільності електроіскрових покриттів. Утворення твердих розчинів металів які наносяться з матеріалом підкладки сприяє їх міцному металургійному зв'язку з покриттями. Ці властивості дозволяють використовувати металеві електроди для нанесення як одношарових металевих покриттів, так і в якості підшару в багат шарових покриттях, а їх дисперсне зміцнення - істотно підвищити твердість і зносостійкість покриттів. При нанесенні металевих ЕІЛ-покриттів на залізо і сталь поєднання вищеписаних властивостей, згідно оціночним розрахунками, найбільш яскраво виражено для хрому. Дійсно, ЕІЛ сталевих деталей хромом застосовується для підвищення їх зносостійкості і корозійної

стійкості, які забезпечуються утворенням в легованому шарі дисперсних виділень карбідів, нітридів, дисперсного мартенситу. Стійкість до зношування відновлених методом ЕІЛ хромом зношених валів електрогенераторів зі сталі 50ХФА перевершує стійкість до зношування нових валів в 15-20 разів [1]. Для створення на поверхні металевих підкладок щільних і адгезійно міцних оксидних шарів з оксидів алюмінію або хрому, або окалин на їх основі, стійких до окислення на повітрі до 600-1100 С, використовують, відповідно, алюміній або хромовміщуючі легуючі матеріали. Плівка оксиду хрому, що утворюється при окисленні покриттів на основі хрому, також як і Al_2O_3 , має хороші захисні властивості при окисленні на повітрі, хоча і не настільки високі, як у Al_2O_3 , і також підвищує їх при додаванні Y_2O_3 . Застосування міді для нанесення дискретних покриттів суцільністю 60-65% на алюмінієвий сплав АЛ-25 з подальшим поверхневим пластичним деформуванням (вигладжуванням) багаторазово підвищує його зносостійкість при різних методах трибологічних випробувань і в 1,5-2 рази - величину контактного тиску початку катастрофічного руйнування[2]. Нанесення таких покриттів на полиці кільцевої канавки поршня двигуна внутрішнього згоряння підвищує ресурс всього двигуна. Позитивний приріст катода при цьому досягається за рахунок використання мідних дротяних електродів у вузькому інтервалі технологічних параметрів легування. Завдяки високій швидкості охолодження частинок легуючого матеріалу на підкладці при ЕІЛ, для отримання покриттів можуть бути використані аморфні матеріали, що утворюють шар високої твердості, зносо- і корозійної стійкості.

Іноді ЕІЛ-покриття піддають лазерному оплавленню, що веде до зростання їх зносостійкості і є одним з перспективних шляхів поліпшення експлуатаційних властивостей[3]. Природа цього явища до кінця не з'ясована. Таким чином, метали, сплави і матеріали на їх основі є традиційними електродними матеріалами для ЕІЛ, що забезпечують

підвищення твердості, жаро-, зносо- і корозійної стійкості, відновлення зношених поверхонь. Ці можливості досягаються за рахунок утворення твердих розчинів і нерівноважних структур, введення зміцнюючих добавок, подрібнення (аж до наноструктурування) і аморфізації структури, утворення щільних оксидних шарів. Недоліком покриттів з металевих сплавів і матеріалів на їх основі є обмежена їх плавленням температура експлуатації, яка для найбільш високотемпературних покриттів системи MeCrAlY не перевищує 1250-1300 °C[4]. Тому для покриттів високотемпературного призначення використовують переважно композити на основі тугоплавких сполук.

1.1.2 Вольфрамкові тверді сплави

До теперішнього часу матеріали на основі карбіду вольфраму з кобальтової зв'язкою широко застосовуються як електродні матеріали для нанесення електроіскрових покриттів на деталі і інструменти з метою підвищення їх зносостійкості. Це пояснюється досить високою твердістю, зносостійкістю і суцільністю покриттів з таких сплавів. ЕІЛ дозволяє також формувати з них дискретні покриття з регульованою суцільністю.[5] Однак висока ерозійна стійкість сплавів марки ВК є також причиною низької продуктивності процесу ЕІЛ[6]. Дослідження ефективності ЕІЛ показали вплив на нього пористості матеріалу: максимальний приріст катода виявлений при пористості 7-8%, а наявність мікропор в міжзерновій зв'язці дозволяє досягти зернограничного руйнування по металевій зв'язці, що підвищує ерозію матеріалу. Зміст зв'язки в сплавах марки ВК також є чинником впливу: в загальному випадку коефіцієнт перенесення і поріг крихкого руйнування легованого шару мають максимум при вмісті металевої зв'язки 8-15%. Зміна приросту катода і ерозії анода пов'язана з цією залежністю. Ще одним методом є використання неметалічних добавок, які становляться крихкими, зокрема, бору, вуглецю, CrB₂, Al₂O₃ і

самофлюсуючих Ni-Cr сплавів, що дозволяє підвищити ерозію анода, поліпшити формування легованого шару і його зносо- і корозійностійкі властивості. Внаслідок високої летючості WO_3 , що утворюється при окисленні карбіду вольфраму на повітрі, застосування вольфрамових твердих сплавів обмежена температурами 600-700 °C. Для підвищення стійкості різців з матеріалів на основі WC при підвищених температурах широко застосовують нанесення зносостійких покриттів, в тому числі методом ЕІЛ. Так, нанесення електроіскрових покриттів з Al, Ti, Cr і композитів на основі тугоплавких боридів на твердий сплав BK8 дозволяє знизити швидкість його окислення на повітрі при 700-1000 °C на порядок. Поряд зі сплавами на основі системи WC-Co для ЕІЛ застосовуються також матеріали систем WC-TiC-Co і WC-TiC-TaC-Co, які крім меншого вмісту дефіцитного карбіду вольфраму можуть мати в деяких випадках більш високі функціональні властивості в порівнянні з матеріалами BK[7]. Таким чином, тверді сплави на основі карбіду вольфраму є найбільш вивченими матеріалами і широко застосовуються при електроіскровому зміцненні металевих поверхонь. Їх перевагою є висока твердість, абразивна стійкість і висока суцільність. До недоліків відносяться низький коефіцієнт перенесення при ЕІЛ, мала товщина покриттів і низька корозійна стійкість. Коефіцієнт масопереносу підвищують добавками, що ослабляють зернограничну міцність, а для збільшення товщини, зносо- і корозійної стійкості покриттів використовують добавки самофлюсуючих нікелевих сплавів. Недостатня стійкість до окислення при підвищених температурах усувається нанесенням захисних покриттів з безвольфрамових тугоплавких сполук.

1.1.3 Композити на основі тугоплавких сполук

Для роботи виробів при підвищених температурах, навантажено-швидкісних параметрах і в агресивних середовищах використовують переважно композити на основі тугоплавких сполук, в основному сполук

титану. Необхідно відзначити великий комплекс досліджень, проведених в Радянському Союзі в 70-80-ті роки ХХ ст. школою Верхотурова А.Д. в області вивчення механізму формування легованого шару і вторинної структури на аноді в широкому діапазоні режимів нанесення електроіскрових покриттів і складів композиційних матеріалів на основі тугоплавких сполук, в тому числі в області їх гомогенності. У наступні десятиліття для електроіскрового зміцнення сталей тугоплавких сполук вивчалися в основному матеріали на основі карбідів і боридів титану[8]. Одні з найперших закордонних досліджень ЕІЛ-покриттів з тугоплавких сполук відносяться до кінця 1990-х рр. У цих роботах вивчали покриття з TiB_2 на сталі, які показали високу адгезійну міцність зв'язку з підкладкою і стійкість до абразивного зношування. Потім інтерес дослідників змістився до матеріалів переважно на основі карбіду титану зі зв'язкою. Для підвищення зносостійкості робочої поверхні електродів з мідного сплаву, призначених для контактного зварювання оцинкованих залізних листів, було використано багатошарове покриття з композиту (TiC-Ni), що чергується з нікелевими шарами за схемою Ni (внутрішній шар) / (TiC- Ni) / Ni (зовнішній шар). Таке покриття суттєво зменшує адгезійна взаємодія (схоплювання) мідного електрода з розплавленим цинком і, відповідно, збільшує термін служби електрода. Для утворення вуглеця і азотовмісних тугоплавких сполук безпосередньо на оброблюваній поверхні в процесі ЕІЛ зрідка використовується легування графітовими або металевими електродами на високоенергетичних режимах в вуглецю або азотовмісній атмосфері. Новий метод отримання електродних матеріалів - високотемпературний синтез (СВС) з модифікуванням вихідної шихти нанорозмірними тугоплавкими добавками - дозволяє отримувати матеріали на основі безвольфрамових твердих сплавів систем TiC-Cr₃C₂-Ni, TiC- Ni, TiC-нікелевий сплав ХН70Ю, TiC-NiAl, TiC-Ti₃AlC₂, TiB₂-TiAl з зміцнюючих добавками з ZrO₂, Al₂O₃, NbC, Si₃N₄, W, Mo, WC, WC-Co, ультрадисперсних алмазів. ЕІЛ-покриття з

таких матеріалів мають підвищену твердість, суцільність, товщину, зносо- і жаростійкість, а також зменшені розмір зерна, коефіцієнт тертя і шорсткість. Енергія екзотермічної реакції може також використовуватися безпосередньо в процесі ЕІЛ. В останні роки інтерес дослідників зміщується в напрямку композиційної ультрависокотемпературної кераміки систем $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$, ZrC-ZrB_2 , $(\text{Zr, Al})\text{-N-ZrB}_2$. До 1990-2000 рр. дослідження були спрямовані переважно на різні способи нанесення покриттів з індивідуального ZrB_2 . В останні 5-10 років інтерес дослідників зміщується до композиційних матеріалів на основі ZrB_2 - компактним композитам, а також градієнтним і багатошаровим покриттям. Відомості по електроіскрове нанесення покриттів з цих матеріалів в зарубіжній літературі відсутні. Виняток становлять вітчизняні дослідження електроіскрового зміцнення алюмінієвих сплавів композиційної ZrB_2 -яка містить кераміку[9].

1.2 Фізико-хімічна модель процесу електроіскрового легування

Електроіскрове легування (ЕІЛ), незважаючи на короткочасність іскрових розрядів (10^{-6} - 10^{-3} с), є складним процесом, що включає в себе ряд фізико-хімічних явищ, пов'язаних один з одним і що протікають одночасно. Це є причиною великого числа факторів, що впливають на процес ЕІЛ. Наслідком складності і недостатньої вивченості процесу ЕІЛ є відсутність його фізико-хімічної моделі, що дозволяє описати процеси ерозії, формування змінених шарів, їх структуру та властивості. Існує схематичний опис процесів ЕІЛ, що відноситься до металів і металевих сплавів, і викладене в роботах основоположників методу Б.Р. і Н.І.Лазаренко. [10,11] Подальшим розвитком опису процесу ЕІЛ стала узагальнена модель А.Д.Верхотурова[12], який більш детально описує закономірності таких основоположних явищ як ерозія електродів і формування на них модифікованих шарів, а також їх взаємозв'язок (рис. 1.1). Відповідно до цієї моделі, іскровий розряд (рис. 1.1, а), який утворює плазмовий шнур з

температурою $3-7 \cdot 10^3$, надає термомеханічний вплив на поверхні електродів.

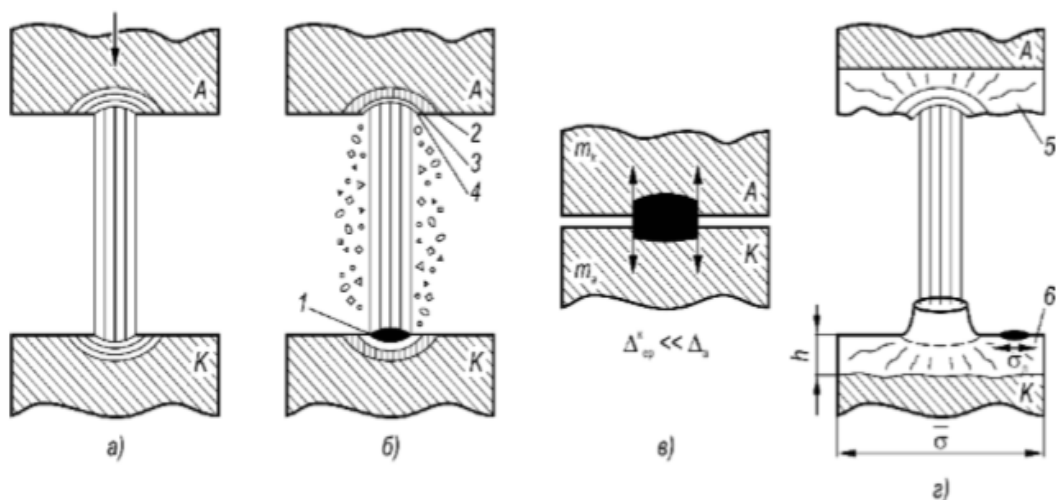


Рис. 1.1 Узагальнена модель процесу ЕІЛ: а - пробую міжелектродного проміжку; б - утворення ерозійних лунок на анод і катод з трьома зонами - випаровування (4), плавлення (3), напруженого стану (2); в - момент контакту електродів, якому супроводжують захоплювання і зворотній перенос; г - формування на аноді вторинної структури (5) і легованого шару (6) на катоді[12].

У місцях формування анодних і катодних плям розряду утворюються об'ємні джерела тепла, що призводять до виникнення ерозійних лунок. У самих лунках можуть бути виділені три зони: випаровування, плавлення і напруженого стану (рис. 1.1, б). Розмір перших двох зон визначається в основному тепловою складовою іскрового розряду і зростає зі зменшення температур плавлення і кипіння, а також коефіцієнта теплопровідності матеріалу. Зона напруженого стану є наслідком хвилі термічних і термомеханічних напружень в результаті імпульсного нагріву, реактивного впливу плазмового струменя і її розширення в момент спаду струму в імпульсі. Розрахунок внутрішніх термічних напружень при імпульсному нагріванні поверхні показує, що вони носять хвильовий характер і змінюються від розтягу до стиску. Такі циклічні навантаження сприяють крихкості і, так само як і процеси тріщиноутворення при кристалізації

розплавленого матеріалу, в результаті призводять до твердофазної ерозії поверхні електрода.

Більш детальні дослідження механізму ЕІЛ, в тому числі механізму іскрового розряду, до 60-х рр. XX ст. стримувалися відсутністю коштів вивчення процесів тривалістю 10^{-8} - 10^{-9} с. Прорив в техніці реєстрації наносекундних процесів, що стався в 1960-х рр., Дозволив дослідити деякі деталі механізму електричного розряду. Так, в роботі розглянуто явище вибухової електронної емісії (ВЕЕ) при електричному пробі міжелектродного проміжку, що лежить також і в основі фізики електроіскрової обробки матеріалів. При зближенні двох електродів між ними зростає щільність електричного поля. Оскільки поверхня катода завжди має шорсткість, то на наявних виступах створюється градієнт напруженості, де електричне поле локально посилюється в 10^1 - 10^2 разів, досягаючи величин 10^5 - 10^6 В · см⁻¹ і більше[13]. Такі виступи на катоді є джерелами автоелектронної емісії (АЕЕ), щільність струму якої може досягати 10^9 А · см⁻² і більше. Під дією такої високої щільності струму АЕЕ мікрровиступів швидко розігрівається і відбувається його мікрровибух в рідкопарової фазі, наслідком якого є вибухова електронна емісія (ВЕЕ). Емісія електронів відбувається у вигляді лавиноподібних порцій автоелектрону в кількості 10^{11} - 10^{12} - і триває зазвичай протягом 10^{-9} - 10^{-8} с, а потім припиняється внаслідок збільшення зони емісії, тепловідведення вглиб матеріалу, віднесення теплоти за рахунок випаровування і викиду рідкого металу. Крім струму АЕЕ з катодних мікрровиступів, мікрровибухів і збудження ВЕЕ може відбуватися і з інших причин: при ударі об катод шматочка речовини, прискореного до великій швидкості, при впливі на катод пучка заряджених або нейтральних частинок, наприклад, іонів, і т.д.[13]. Внаслідок мікрровибуху елемента поверхні матеріал катода переходить в рідку і парову фази, а іонізація пару в плазмі надає їм вид струменів або факелів. Спільно з пакетом автоелектронів вони вилітають нормально до

поверхні електрода зі швидкістю, що досягає декількох кілометрів в секунду. Ці властивості смолоскипів - висока швидкість поширення і високий тиск - роблять їх схожими з продуктами вибуху вибухових речовин. Вони здатні виробляти руйнування перешкод, в даному випадку - протилежного електрода. Електрична ерозія є процесом вторинним, викликаного не електричним розрядом безпосередньо, а механічною дією струменів парів речовини. При цьому оплавлення поверхні анода, викликане впливом пакета автоелектронів, і перенесення матеріалу катода струменем пари факела призводять до зміни складу і структури робочої поверхні електрода з утворенням так званої вторинної структури, що впливає, в свою чергу, на параметри електромасопереносу. З наведених літературних даних випливає, що сучасна фізико-хімічна модель процесу ЕІЛ досить схематична і її розробка поки ще далека від завершення. Її основні положення були сформульовані на основі досліджень систем «метал-метал». Помітно рідше зустрічаються дослідження систем «метал-Кермет (анод)», а кількість робіт по системам «метал-кераміка (анод)» обмежена. З огляду на постійно зростаючий інтерес науки і промисловості до дослідження і застосування зносо і корозійностійких керамічних і металокерамічних матеріалів, а також перспективність методу ЕІЛ в нинішніх економічних, енергетичних та екологічних реаліях, слід визнати за необхідне подальші дослідження механізму ЕІЛ, особливо в додатку до керамічних і металокерамічних матеріалів.

1.3 Фактори, що впливають на процеси електромасопереносу

Для оцінки впливу будь-яких чинників на електромасоперенос використовують його кількісні характеристики. До них відносяться: сумарний приріст катода D_k і сумарна ерозія анода D_a за питомий час обробки t , коефіцієнт масопереносу $K_t = D_k / D_a$ [6]. Питомий час обробки t дорівнює відношенню часу легування до оброблюваної площі катода, тобто відноситься до одиниці площі. Це дозволяє порівнювати масоперенос при

легуванні поверхонь різних розмірів. Сумарні приріст і ерозія характеризують абсолютні масові величини, а коефіцієнт масопереносу - ефективність нанесення матеріалу легуючого електрода на підкладку.

Процес електромасопереносу при ЕІЛ схильний до впливу безлічі факторів. Розглядаючи вплив матеріалу легуючого електрода, в першу чергу слід згадати про його властивості, а саме про його пористість. У загальному випадку ерозія матеріалу легуючого електрода зростає зі збільшенням пористості. Це пов'язано зі зниженням міцності матеріалу з ростом його пористості, так як вплив іскрових розрядів поряд з термічним має і механічний характер. Однак при пористості нижче 25% ця залежність може змінюватися зі зростанням часу обробки[6] і в загальному випадку не є прямо пропорційною.

Теплова складова іскрового розряду і тепло джоуля впливають на робочу поверхню матеріалу легуючого електрода, а також на деяку відстань вглиб його. Для матеріалів, створених методами порошкової металургії, це подібно до процесу спікання без додатка тиску і, в залежності від ступеня тепловиділення, початкової пористості і властивостей матеріалу, може призводити до більшого або меншого його спікання і зменшення пористості на певну глибину[6]. При цьому температура в глибині матеріалу (від десятків до сотень і тисяч мікрометрів) зазвичай не перевищує 1000-1500 °С, тоді як на самій поверхні в плямі розряду вона не менше 3000 °С, оскільки температура в самій плазмі іскрового розряду становить 3000-7000 °С [14].

Вплив таких температур на поверхню матеріалу легуючого електрода призводить до її оплавлення, а внаслідок короткочасності іскрового імпульсу (10^{-3} - 10^{-6} с) і надшвидкісного гартування розплавленого матеріалу - до утворення дрібнозернистого шару високої твердості. Наявність же зворотного масопереносу (рис. 1.1, в, г) змінює його склад, створюючи на поверхні анода композиційний шар, названий вторинною структурою (ВС). Фактично саме ВС є істинним об'єктом ерозії при тривалому ЕІЛ ($t > 1$ хв /

см²) і визначає ерозійні характеристики електродного матеріалу, склад і якісні характеристики покриттів. Як правило, ВС характеризується підвищеною ерозійною стійкістю в порівнянні з матеріалом основи, так що її поява призводить до зменшення ерозії легуючого електроду. На характер утвореної ВС впливають матеріал електродів, режим обробки і склад міжелектродного середовища. Циклічні термомеханічні впливи іскрового розряду призводять до руйнування ВС, але вони ж разом зі зворотним масопереносом і впливом міжелектродного середовища забезпечують регенерацію ВС. Для перехідних металів величина зворотного масопереносу становить ~ 10% і може бути значно вище для хімічно активних металів IV групи, легкоплавких металів з низькою теплопровідністю і металів, що утворюють з підкладкою необмежені тверді розчини. Інтенсивна хімічна взаємодія матеріалів електродів на початковому етапі ЕІЛ ($t \leq 3-4$ хв / см²) з ростом часу легування змінюється зменшенням як приросту катода, так і зворотного масопереносу. Крім утворення ВС і розпочатого процесу її тендітного руйнування це пояснюється також зміною її фазового складу і наближенням до складу катода, що знижує рушійну силу процесу легування[15].

Склад міжелектродного середовища сильно впливає на процес ЕІЛ. На відміну від легування в інертних середовищах, ЕІЛ в хімічно активних середовищах - повітряної, азото- і вуглецевмісної - супроводжується утворенням в перехідних металах твердих розчинів впровадження або з'єднань на межі зерен, що підвищує їх поріг холодноламкості і сприяє крихкому руйнуванню під дією циклічних навантажень іскрового розряду. Ерозія металів IV групи в цих середовищах, як правило, на порядок вище, ніж в аргоні. Але оскільки в ряду перехідних металів від IV до VI групи розчинність елементів О, С і N знижується, то для металів VI групи ця різниця вже нівелюється[16].

При ЕІЛ на повітрі на поверхнях обох електродів утворюються оксидні фази і, в меншій кількості, нітридні. Виникнення останніх ініціюється збільшенням енергії в імпульсі, тому рентгенографічно вони фіксуються не завжди. Поряд з крихким впливом цих фаз, їх утворення на поверхні анода перешкоджає схоплюванню електродів, сприяючи тим самим формуванню на катоді легованого шару[17].

1.4 Механізми абразивного зношування

Найважливішим фактором, що призводить до скорочення терміну служби різних деталей машин і механізмів і, як результат, до величезних фінансових втрат, є знос поверхні. До одного з основних видів зношування відноситься абразивне зношування.

1.4.1 Абразивне зношування.

Абразивний знос - це втрата матеріалу в результаті абразивного зношування, тобто проходження твердих частинок по поверхні будь-якого матеріалу. Абразивне зношування може бути розділене на зношування закріпленим абразивом і незакріплені. Якщо в першому випадку зношування орієнтація абразивних частинок фіксована щодо зразка, то при зношуванні незакріплені абразивом вони вільно обертаються між зразком і контртілом.

Абразивна зносостійкість композиційних керамічних матеріалів складним чином залежить від твердості, тріщиностійкості, міцності - збільшення твердості або тріщиностійкості не завжди супроводжується зменшенням інтенсивності зношування[18]. Підвищення зносостійкості керамічних матеріалів при абразивному зношуванні прямо пов'язане з підвищенням їх міцності - контактної і мікроструктурної міцності.

Зношування композиційних матеріалів, що поєднують в'язку металеву основу з частинками твердої фази, в умовах абразивного зношування має свої особливості. В цілому їх знос, перш за все, залежить від мікроструктурних

параметрів, таких як зміст, розмір, розподіл і міцність зв'язку частинок твердої фази з матрицею, пористість і т.д..

Експериментальні дані ясно показують (Рис. 1.2, 1.3), що тверді частинки в покритті відіграють домінуючу роль у визначенні її стійкості до зношування: ваговий знос (W) знижується з ростом об'ємного змісту твердої фази (f) і зменшенням середнього діаметру (d) її частинок. Цю залежність можна виразити [19] як

$$W = K d^{1/2} / f, \quad (1.1)$$

де K - коефіцієнт, що відноситься до впливу пористості та інших мікроструктурних факторів, таких як міцність зв'язку частинок твердої фази з матрицею і ін.

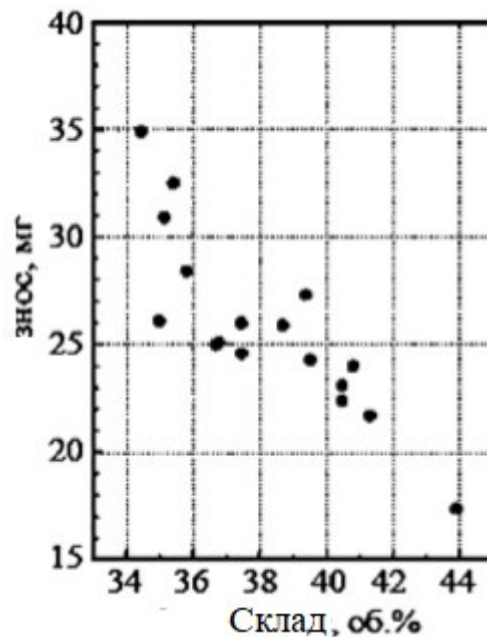


Рис. 1.2 Вплив об'ємного змісту карбідної фракції на ваговий знос покриття $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ [19].

За інших рівних умов для оцінки відносної зносостійкості композиційних матеріалів або покриттів з них може бути отримане таке співвідношення [19]:

$$W / W_{\text{ст}} = (d / d_{\text{ст}})^{1/2} (f_{\text{ст}} / f), \quad (1.2)$$

де d - розмір часток твердої фази;

f - об'ємний зміст твердої фази;

W_{ст} - ваговий знос стандарту.

Наведені залежності є прямим наслідком механізму зношування композиційних матеріалів з металевою зв'язкою. Відповідно до нього спочатку зношується м'якша фаза - зв'язка, оголюючи включення твердофазних частинок. Після першої стадії тверді частинки піддаються прямому впливу абразиву, що призводить до їх виривання і / або руйнування з подальшим винесенням часток із зони тертя[19]. На цій стадії - стадії стабільного зносу - матеріал композиту зношується рівномірно. Залежно від змісту металевого зв'язування композити з точки зору зносу можна розділити на дві групи - з низьким її вмістом і з високим.

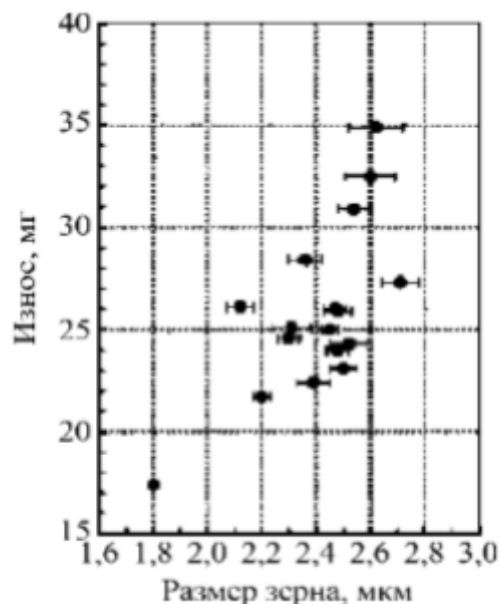


Рис. 1.3 Вплив розміру зерен карбіду на ваговий знос покриття Cr₃C₂- NiCr[19].

Критерієм поділу є домінуючий механізм зношування на стадії усталеного зносу, який визначається міжчастинковою відстанню твердої фази в композиті. При високому вмісті зв'язки в композиті знос є наслідком зношування зв'язки, яке, вже в свою чергу, призводить до оголення частинок твердої фази і їх подальшого виривання і / або руйнування[19]. Композити з низьким вмістом зв'язки, навпаки, зношуються по мірі зносу самих частинок твердої фази. Тому за швидкістю питомого зносу композити з високим

вмістом зв'язки чітко корелюють з металевими сплавами, помітно відрізняючись за цим параметром від композитів з низьким вмістом зв'язки. Так, на залежності об'ємного зносу від твору навантаження на дистанцію ковзання (матеріали нормалізовані по твердості) висококобальтові вольфрамові тверді сплави (~ 20-25% Co) добре збігаються з нормалізованою швидкорізальною сталлю ASP30 (Рис. 1.4). Низькокобальтові тверді сплави потрапляють в іншу групу, яка показує значно менший знос.

Крім того, на поверхні зносу низькокобальтових сплавів зміст частинок карбіду вольфраму вище, ніж в глибині. Це вказує на екструзію зв'язки і підтверджує припущення, що в таких матеріалах більшу частину навантаження несуть зерна карбіду вольфраму.

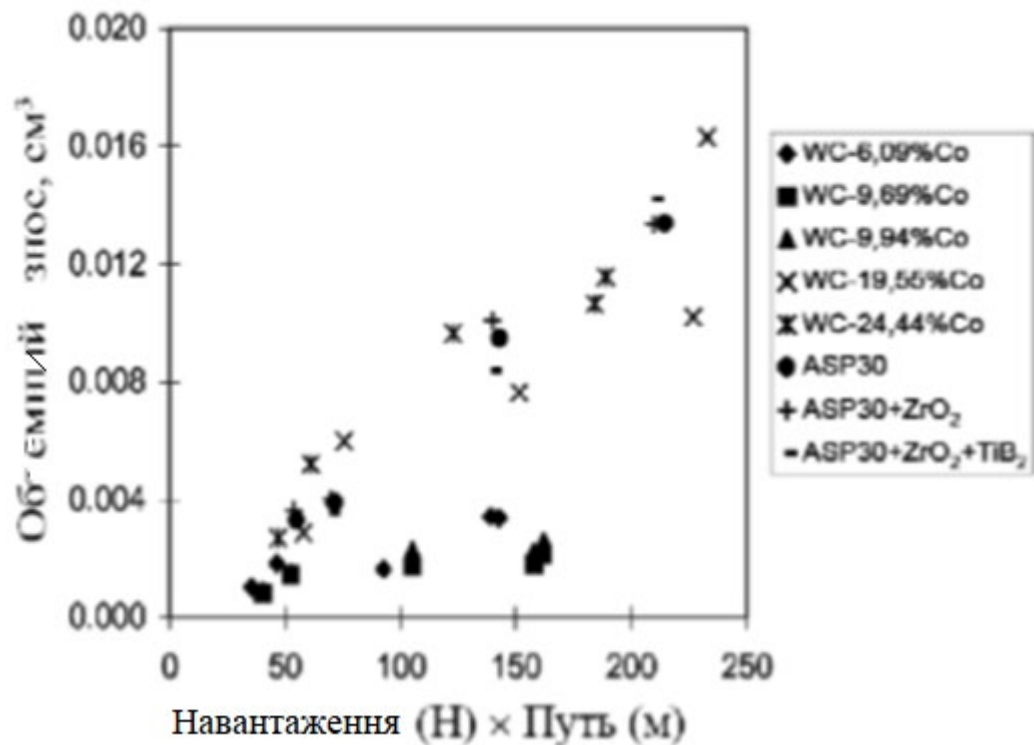


Рис. 1.4 Залежність об'ємного зносу твердого сплаву WC-Co і швидкорізальної сталі від пари «Навантаження · Шлях» при зношуванні нежорстким закріпленням абразивом[20].

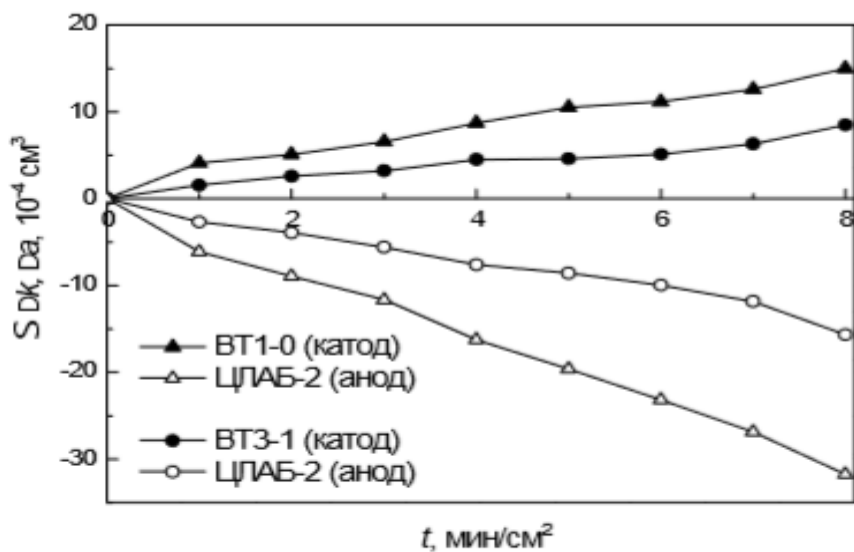
1.5 Кінетика електромасопереносу і структурно-фазові перетворення при електроіскровому і лазерноелектроіскровому легуванні титанових сплавів кераміки на основі ZrB_2

У всіх методах отримання покриттів в якості матеріалу покриття на Ti -сплавах традиційно використовують тугоплавкі сполуки титану[21]. Разом з тим, схильність титану до утворення пухких оксидних плівок може чинити негативний вплив на суцільність і міцність вторинних структур, що утворюються в процесі трибоокислення Ti -містять матеріалів. У зв'язку з цим становить інтерес порівняльне дослідження структурних і фазових перетворень в процесах лазерного і електроіскрового легування титанових сплавів матеріалами з тугоплавких сполук титану і цирконію, який, на відміну від титану, при окисненні утворює щільний оксидний шар ZrO_2 .

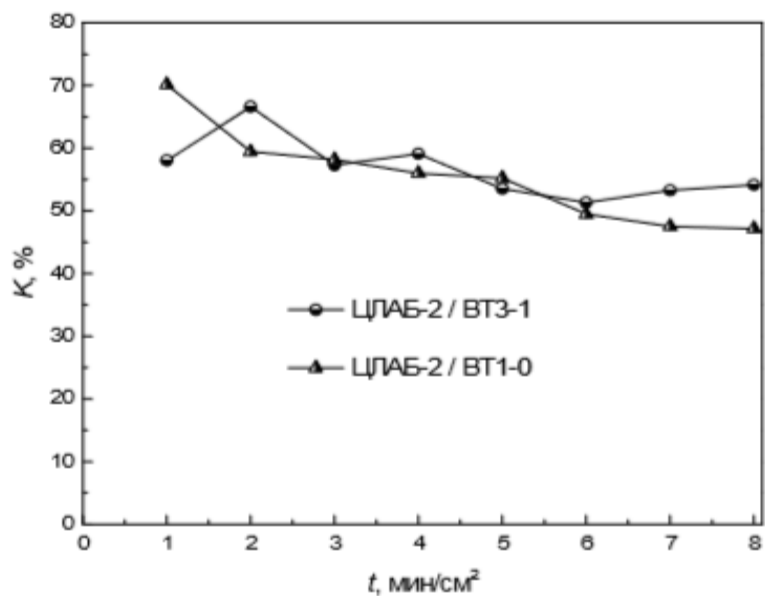
1.5.1 Кінетика електромасопереносу

Кінетика масопереносу при ЕІЛ сплавів $BT1-0$ і $BT3-1$ матеріалом ЦЛАБ-2 свідчить про вплив матеріалу підкладки і складу електрода на його електроерозійну стійкість (рис. 1.5, а). На відміну від сплаву $BT1-0$ з невеликою кількістю добавок ($Fe - 0,18 \text{ мас.}\%$, $Si - 0,10 \text{ мас.}\%$), Сплав $BT3-1$ містить до $6 \text{ мас.}\%$ Алюмінію і до $4 \text{ мас.}\%$ Хрому. Зворотній масоперенос титану, алюмінію і хрому в умовах високотемпературного окислення може призводити до появи на робочій поверхні електрода плівки високотемпературних корозійностійких з'єднань титаната алюмінію і хроміту титану, що захищає електрод від руйнівного термомеханічного впливу іскрового розряду. Цим можна пояснити зменшення ерозії електрода ЦЛАБ-

2 в 2-2,5 рази при ЕІЛ сплаву ВТ3-1 в порівнянні з ЕІЛ сплаву ВТ1-0.



а)



б)

Рис. 1.5 Кінетика масопереносу при ЕІЛ сплавів титану: а) - приріст катода Δk і ерозія анода Δa ; б) - коефіцієнт масопереносу.

Наявність оксидів бору і кремнію в продуктах окислення легуючих компонентів дозволяє припустити утворення на робочій поверхні електрода ЦЛАБ-2 вузького боросилікатного скла (за рахунок розчинення SiO_2 в розплаві оксиду бору), також сприяє підвищенню електроерозійної стійкості електрода. Поряд з підвищеним приростом катода внаслідок міцної

адгезійної взаємодії ZrB_2 з титаном це, мабуть, забезпечує порівняно високий коефіцієнт масопереносу $\sim 60\%$ (рис. 1.5, б).

1.5.2 Особливості мікроструктури, глобулоутворення і фазовий склад електроіскрових покриттів

В процесі ЕІЛ тонкі поверхневі шари зміцнюваного металу локально плавляться під дією іскрових імпульсів плазми тліючого розряду, що формується на повітрі в міжелектродному проміжку за участю продуктів електроерозії легуючого електроду (в рідкопаровій і твердій фазах), насичення розплаву легуючими компонентами і їх компактування на поверхні з наступним швидким охолодженням. Через фізико-хімічні процеси взаємодії легуючих компонентів один з одним і матеріалом підкладки в умовах високотемпературного окислення на повітрі склад легованого шару і робочої поверхні електроду відрізняється від складу матеріалу електроду[6]. В ЕІЛ-покритті ЦЛАБ-2 / ВТ1-0 в значній кількості присутні оксидні фази: оксиди Ti-Zr, c- ZrO_2 , a- SiO_2 . Таким чином, процес ЕІЛ супроводжується частковим окисненням структурних складових матеріалу електроду і утворенням нових фаз в складі покриття. Крім того, через масоперенос матеріалу підкладки в покриття і його несущості методом РФА виявляється Ti. ЕІЛ-покриття з матеріалу ЦЛАБ-2 на титановому сплаві є структурно-неоднорідним і на початковому етапі ЕІЛ ($t = 2$ хв / cm^2) містить досить рівномірно розподілені по поверхні глобули (горби) з середньою висотою до 200-250 мкм і діаметром до 700 мкм (рис. 1.6). Загальна площа робочої поверхні, яку займає глобулами, становить 10-12%. Легований шар в міжглобульному просторі має товщину 10-15 мкм і щільність 60-70%. Механізм утворення глобул до сих пір не з'ясовано. Передбачається, що їх виникнення є наслідком формування контактних містків зв'язку в процесі схоплювання електродів і селективності змочування легуючих компонентів матеріалом підкладки. Крім того, чим менше

контактний кут змочування (Q) легуючих компонентів матеріалом підкладки, тим менше висота глобул і займана ними площа робочої поверхні. З ростом $t > 4$ хв / см^2 глобули зникають внаслідок електромеханічного згладжування поверхні.

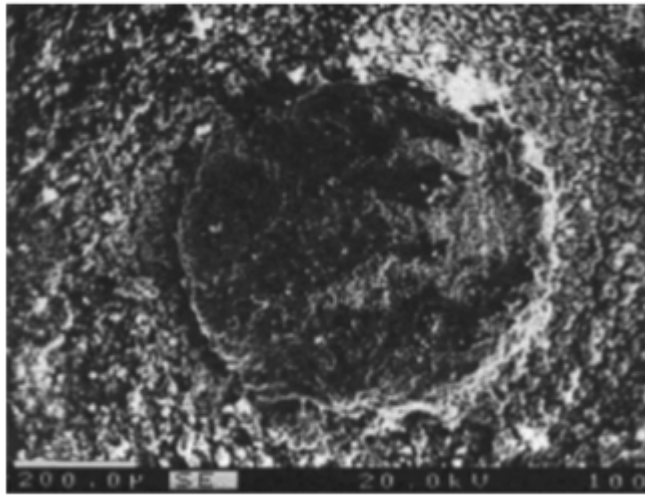


Рис. 1.6 Глобула на поверхні монослойного ЕІЛ-покриття з матеріалу ЦІАБ-2

Розподіл елементів на поверхні глобули ЕІЛ-покриття з матеріалу ЦІАБ-2 представлено на рис. 1.7. Концентраційний максимум цирконію в області глобули свідчить, що основною фазою глобули є диборид цирконію. Це визначає втричі більшу мікротвердість глобули (~ 9 ГПа) в порівнянні з основою. Область міжглобульного простору, являє собою титановий сплав, модифікований Zr-, La- і Si-містящими фазами. Концентраційні мінімуми кремнію, кисню та титану в області глобули вказують на те, що оксидні фази, фази, що містять Si і титан існують переважно в міжглобульному просторі. Таким чином, на початковому етапі ЕІЛ покриття армовано поверхневими глобулами на основі дибориду цирконію підвищеної твердості.

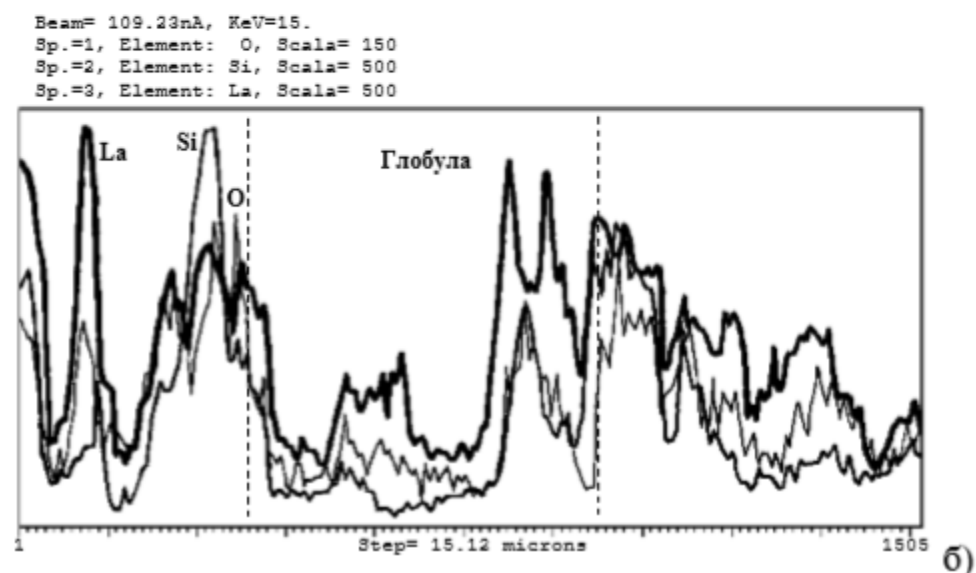
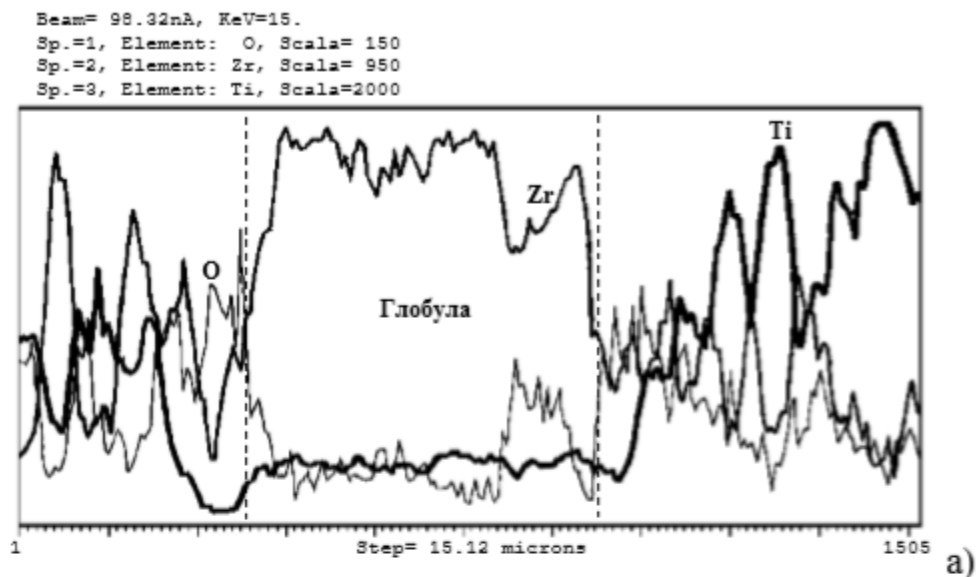


Рис. 1.7 Розподіл елементів на поверхні ЕІЛ-покриття системи ЦЛАБ-2 / ВТЗ-1: а) - O, Zr, Ti; б) - O, Si, La.

На рис. 1.8 показана мікроструктура поверхні ЕІЛ-покриття системи ЦЛАБ-2 / ВТ1-0, отриманого при тривалому нанесенні $t = 7$ хв / см^2 . Початкове покриття являє типову для електроіскрового нанесення гетерофазну, структурно неоднорідну поверхню, сформовану за участю рідкої фази. Рідка фаза присутня у вигляді бризок і згладжених ділянок поверхні (І), що утворилися в результаті злиття окремих крапель. Спектри МРСА показують (рис. 1.9, а, б), що згладжені ділянки поверхні (І) представляють титановий сплав підкладки, модифікований легуючими

компонентами. Це вказує на те, що рідка фаза з'являється в результаті розбризкування ванни розплаву, що утворюється на поверхні підкладки під дією іскрових імпульсів. Згладжені ділянки (I) хаотично розподілені в основному полі шорсткої поверхні (II) (рис. 1.8, а), збагаченої легуючими компонентами з домішкою титану (рис. 1.9, а, б).

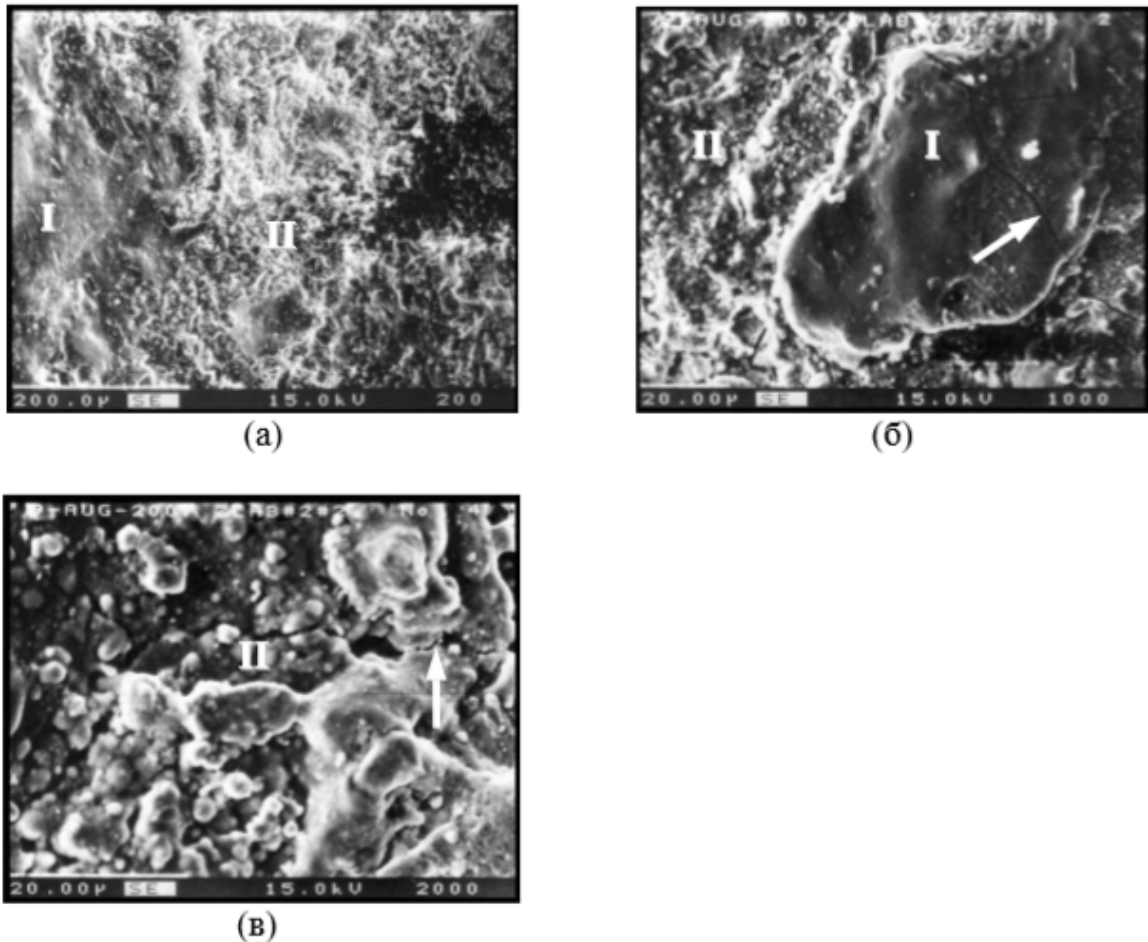


Рис. 1.8 Мікроструктура поверхні ЕІЛ-покриття системи ЦЛАБ2 / VT1-0: I - ділянка модифікованого Ті-сплаву (а, б); II - ділянка з тугоплавкими компонентами (в); (стрілками показані тріщини)

Така фазова і структурна неоднорідність ЕІЛ-покриття може бути обумовлена миттєвим неоднорідним розподілом температурних полів на робочій поверхні, в результаті чого фізико-хімічні процеси на локальних ділянках протікають при різних температурах. Згладжені ділянки поверхні на основі Ті (I) виникають в результаті кристалізації розплаву, в який шляхом

конвекції залучаються продукти електроерозії легуючого матеріалу.

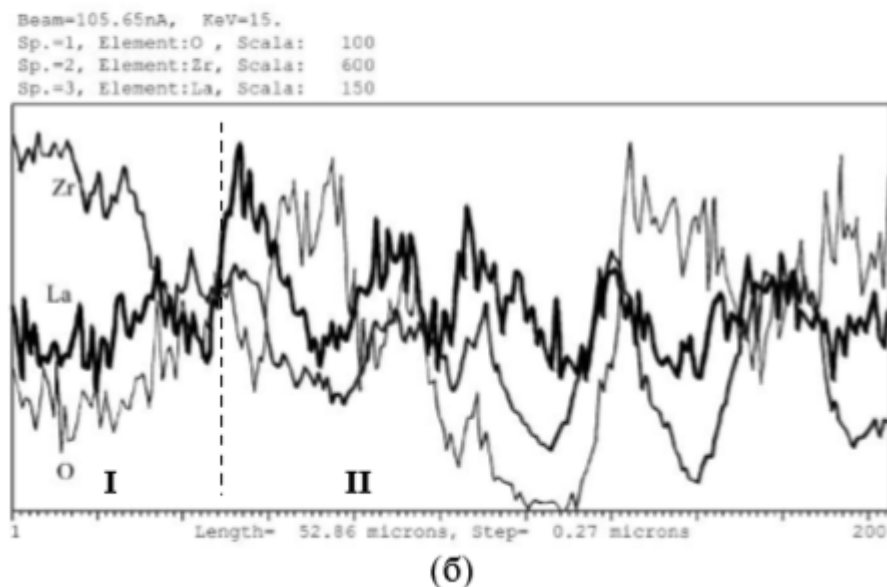
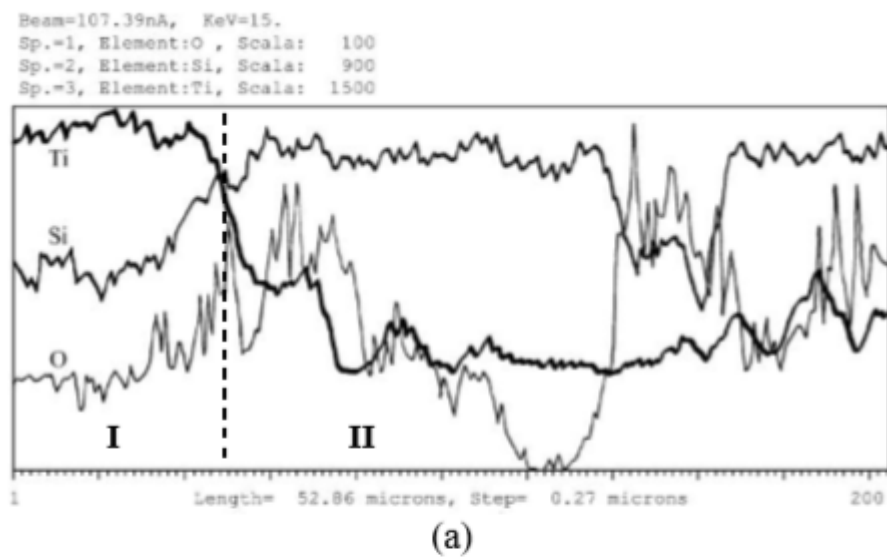


Рис. 1.9 Розподіл елементів на поверхні ЕІЛ-покриття системи ЦЛАБ-2 / ВТ1-0: (а) - Ti, Si, O; (Б) - Zr, La, O I - ділянка модифікованого Ті-сплаву II - ділянка на основі тугоплавких сполук

Шорстка частина поверхні (II) на основі легуючих компонентів (з домішкою Ti за рахунок його масопереносу з підкладки) сформована при температурах менше температури плавлення $T_{пл}$ титану в результаті адгезійної взаємодії продуктів електроерозії електроду з «холодними» ділянками поверхні ($T < T_{пл}$). Концентраційні мінімуми кремнію і кисню в області I, що відповідає модифікованому Ti-сплаву (рис. 1.9), свідчать про те,

що оксиди і кремнійвміщуючі фази, присутні в складі продуктів електроерозії електрода, слабо залучаються до конвективних потоків ванни розплаву, формуючи навколо області І світлу (товщиною порядку декількох мікрометрів) прикордонну зону (рис. 1.8, б). Наявність La і Zr в областях, відповідних Ti- сплаву (рис. 1.9), свідчить (з урахуванням мінімального вмісту кисню) про його насичення боридними компонентами. Початкове ЕІЛ-покриття навіть при тривалому нанесенні ($t = 7 \text{ хв} / \text{см}^2$) характеризується відсутністю регулярної сітки тріщин (рис. 1.8, а, в), типовою, наприклад, для композиційних TiC / Ni електроіскрових покриттів на мідному сплаві. Наявні в невеликій кількості тріщини розташовуються переважно на ділянках кристалізації розплаву (І) і на його кордоні (рис. 1.8, б, тріщини вказані стрілками). Відомо, що тріщини в ЕІЛ-покриттях є результатом виникнення залишкових термічних напружень розтягу, величина яких зростає зі збільшенням часу нанесення. Підвищена тріщиностійкість ЕІЛ-покриття з матеріалу ЦЛАБ2 може бути обумовлена декількома причинами, головна з яких - близькість коефіцієнтів термічного розширення титану ($9,2 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$) і диборида цирконію ($6,5 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$). Крім того, порівняно невелика теплопровідність (λ) титанового сплаву ($\lambda_{\text{Ti}} = 21,9 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$) в порівнянні зі сталями ($\lambda_{\text{Fe}} = 74,0 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$), алюмінієвими ($\lambda_{\text{Al}} = 221,5 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$) і мідними ($\lambda_{\text{Cu}} = 401,2 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$) сплавами знижує швидкість кристалізації рідкої фази в процесі формування покриття.

2 Обладнання, матеріали та методика експериментів

2.1 Параметри режиму легування

Електроіскрове легування зразків здійснювали на високочастотній лабораторній установці "Елітрон-22" в режимі: струм короткого замикання 0,9 А, частота імпульсів струму 1200 гц, енергія в імпульсі 0,08 Дж, питомий час обробки 1-7 хв / см². Як матеріали підкладки використовували титанові сплави ВТ-20 (Al - 5,5-7,0%; Мо - 0,5-2,0%; V - 0,8-2,5%; Zr - 1,5 2,5%), ВТЗ-1 (Al - 5,5-7,0%, Мо - 2,0-3,0%; Cr - 0,8-2,3%; Si - 0,15-0,4%; Fe - 0,2-0,7%) і ВТ1-0 (домішки, не більше: Fe - 0,18%; О - 0,12%; Si - 0,10%, решта - 0,42%).



Рис. 2.1.1 - Установка «Елітрон-22»

Сьогодні більшість установок випускається для ЕІЛ в газовому середовищі (на повітрі) компактним електродом. У цьому випадку можливі два варіанти установок: з вібрацією електроду і контактом в процесі обробки та з постійним міжелектродним зазором. У першому варіанті можна здійснювати процес зміцнення як ручним вібратором (рис. 2.1.2), так і за допомогою

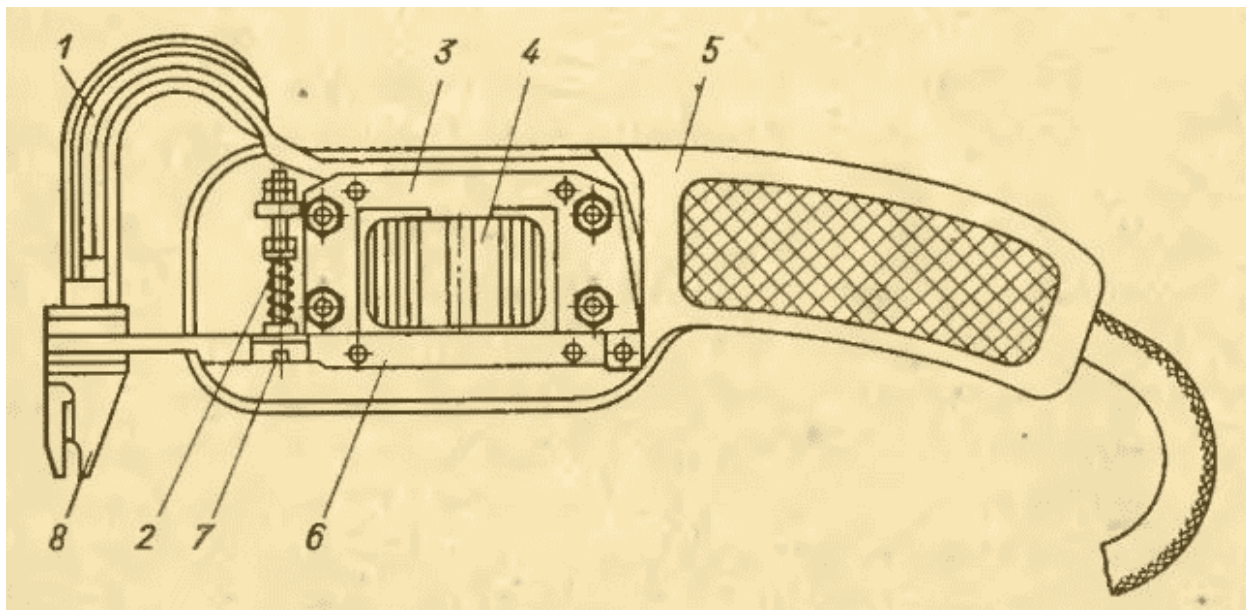


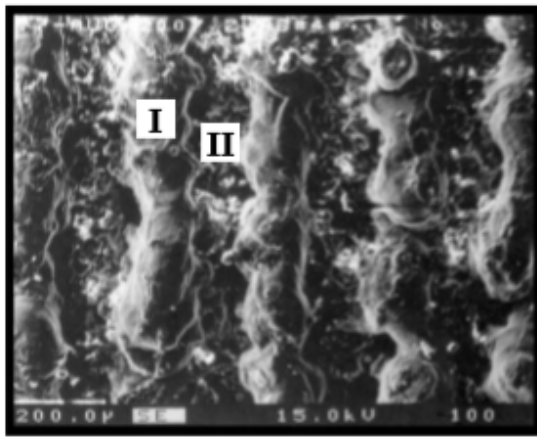
Рис. 2.1.2 Вібратор установки для електроіскрові обробки «Елітрон-22»:

1 - токопровід; 2-пружина; 3 - серцевина; 4 - котушка; 5 - корпус; 6 - якір; 7- гвинт; 8 - електродотримач.

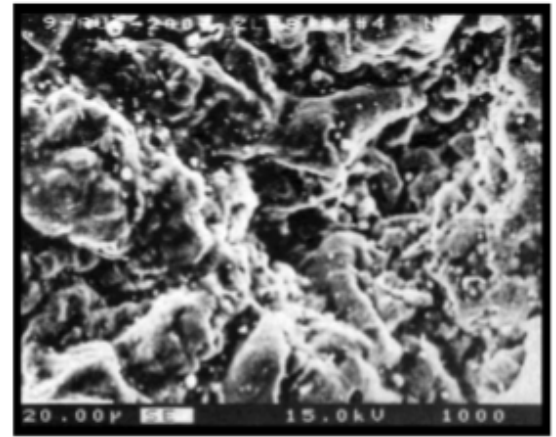
2.2 Параметри лазерного оплавлення

2.2.1 Мікроструктура і фазовий склад лазерно-електроіскрових покриттів

Лазерне оплавлення (ЛО) ЕІЛ-покриття здійснювали за схемою рис. 2.2.9. Нульовий коефіцієнт перекриття доріжок і гауссовський розподіл щільності потужності в плямі нагріву призводить до формування структурованої поверхні у вигляді чергування лазерних доріжок оплавлення (рис. 2.2.1).



(а)



(б)

Рис. 2.2.1 Структурована поверхня комбінованого покриття ЦЛАБ-2 / ВТ1-0 (а) і мікроструктура ділянки ЕІЛ між лазерними доріжками (б): І - лазерна доріжка оплавлення; ІІ - ділянка ЕІЛ-покриття.

Між згладженими оплавленими доріжками І знаходяться доріжки неоплавленого ЕІЛ-покриття ІІ, підданого нагріванню в процесі поверхневої лазерної обробки. Згідно МРСА, доріжки лазерного оплавлення І являють собою Ті-сплав, модифікований La- і Zr-містящими компонентами. Концентраційні мінімуми Si і O виявлені на ділянках І, сформованих в процесі кристалізації Ті-сплавів на поверхні як електроіскрового (рис. 2.2.2, а), так і комбінованого покриттів (рис. 2.2.3, а).

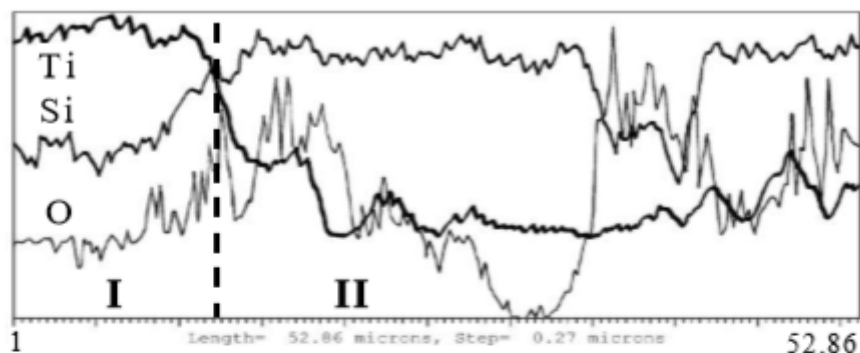
Це вказує на загальний характер формування складу зони кристалізації в обох випадках, можливо, пов'язаний з селективністю змочування матеріалом підкладки легуючих компонентів[22]. Як правило, змочуваність металами оксидів нижче, ніж металоподібних з'єднань, що

може

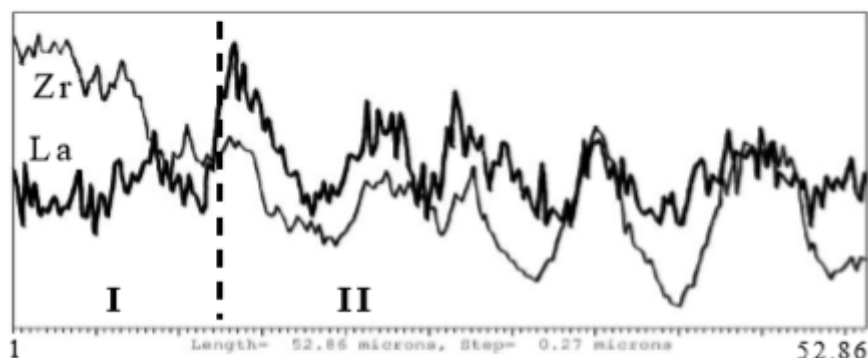
пояснити

отриману

закономірність.



а)

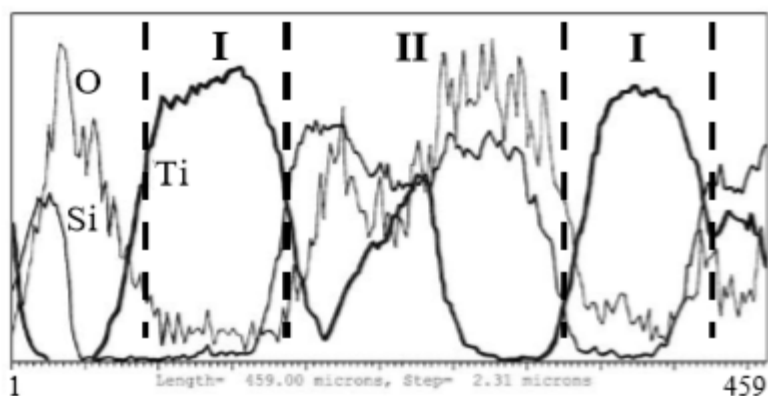


б)

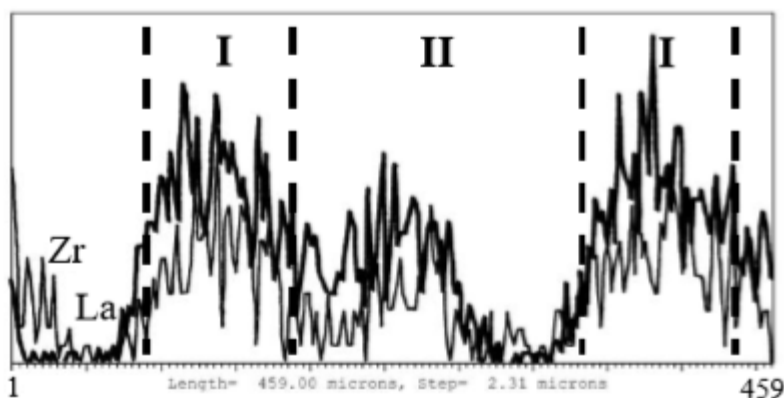
Рис. 2.2.2 Розподіл елементів на вихідній поверхні ЕІЛ- покриття ЦЛАБ-2 / ВТ-20: а - Ti, Si, O; б - Zr, La. I - ділянка модифікованого Ti-сплаву; II - поверхня ЕІЛ

Кількість тріщин на поверхні проміжних ділянок II неоплавленого ЕІЛ-покриття мало (рис. 2.2.1, б). Лазерний нагрів ЕІЛ-покриття дозволяє поліпшити його якість за рахунок інтенсифікації дифузійного масопереносу металу підкладки. Рівень залишкових напруг, що розвиваються в покритті, знижується в результаті лазерної обробки, так як тривалість охолодження підкладки та покриття після лазерного нагріву значно вище, ніж в разі ЕІЛ,

через більшу щільність енергії.



а)



б)

Рис. 2.2.3 Розподіл елементів на вихідній поверхні (ЕІЛ + ЛОНепр.) - покриття ЦЛАБ-2 / ВТ1-0: а - Ti, Si, O; б - Zr, La. I - лазерна доріжка; II - ділянка між лазерними доріжками.

2.2.2 Мікротвердість електроіскрових і лазерно-електроіскрових покриттів

Розподіл мікротвердості (Н m) по товщині глобули (h) ЕІЛ- покриття ЦЛАБ-2 / ВТ1-0 (рис. 2.2.4) вказує на наявність зони термічного впливу (ЗТВ) на глибині 250-400 мкм і на велику величину Нm самої глобули (20-23 ГПа). Однак матеріал глобули характеризується низькою тріщиностійкістю: мікроіндентування призводить до утворення тріщин. Причиною крихкості матеріалу глобули може бути недостатня температура компактування

(спікання) продуктів електроерозії електрода на оброблюваній поверхні. Висока температура плавлення титану (1660 °С) знижує обсяг ванни розплаву на поверхні Ті-сплаву (в порівнянні, наприклад, зі сталями), що в цілому зменшує температуру поверхні і, відповідно - температуру формування глобули. Уникнути цього можна за допомогою наступної лазерної обробки ЕІЛ- покриття в режимі оплавлення, яка інтенсифікує спікання легуючих компонентів і їх перемішування з Ті-сплавом.

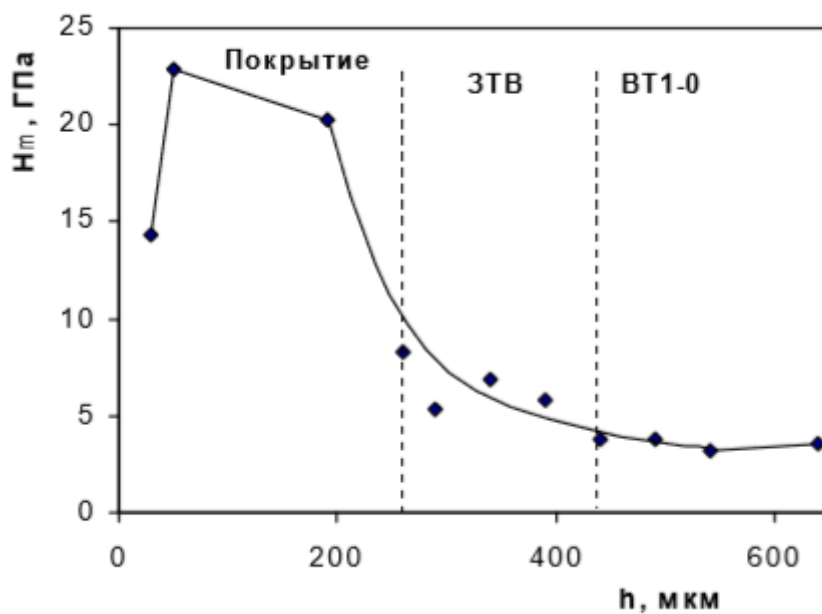
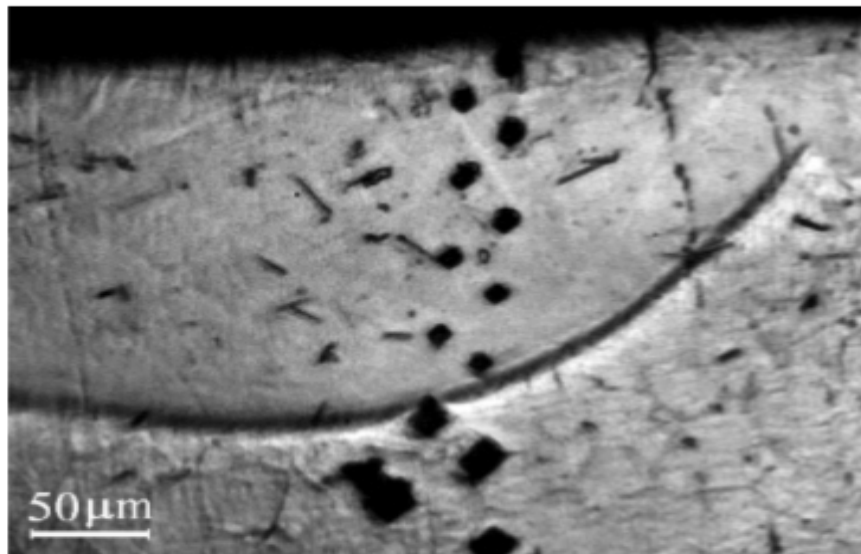


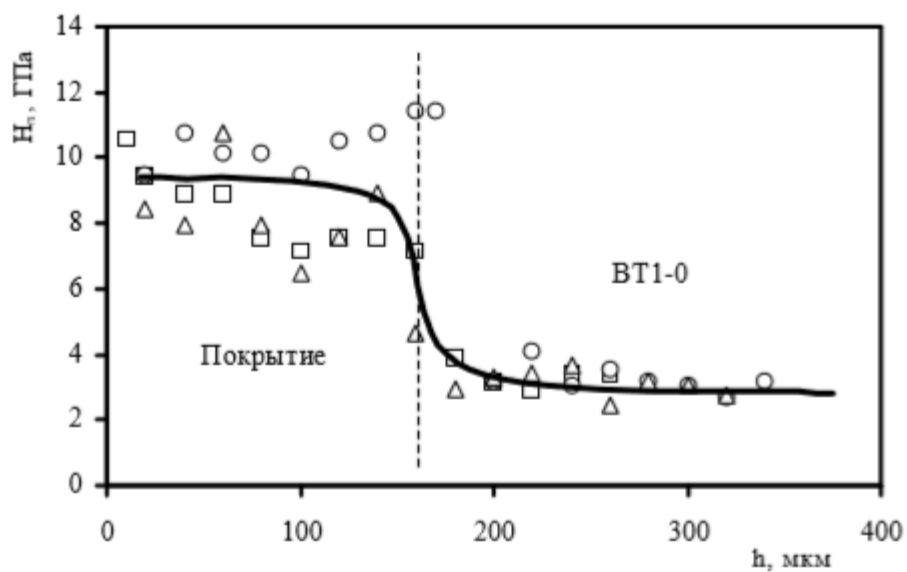
Рис. 2.2.4 Розподіл мікротвердості по товщині глобули ЕІЛ- покриття ЦЛАБ-2 / ВТ1-0.

Лазерне оплавлення ЕІЛ-покриття, отриманого при $t = 2 \text{ хв/см}^2$, призводить до формування структурно-однорідного зміцненого шару на основі Ті-сплаву, легованого тугоплавкими компонентами, з підвищеною тріщиностійкістю (тріщини при мікроіндентування відсутні, рис. 2.2.5, а). Середня величина мікротвердості H_m поверхневого шару товщиною $\sim 160 \text{ мкм}$ в 3 рази вище в порівнянні з основою і становить $9,5 \pm 1,5 \text{ ГПа}$ (рис. 2.2.5, б). Зменшення мікротвердості ЕІЛ-покриття після лазерного оплавлення порівняно з H_m вихідної глобули (рис. 4.9) є результатом

утворення в поверхневому шарі композиту на основі матриці з Ti-сплаву.



а)

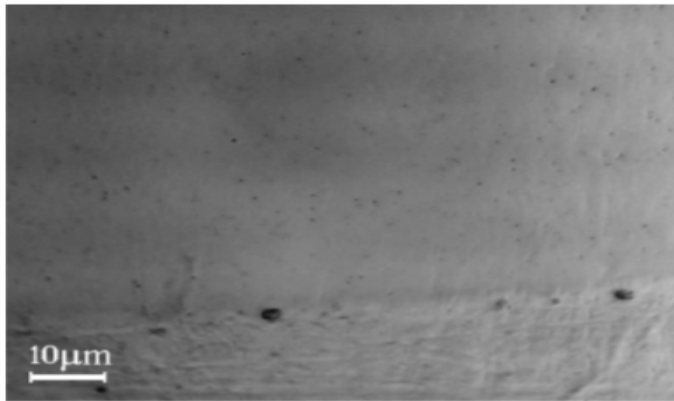


б)

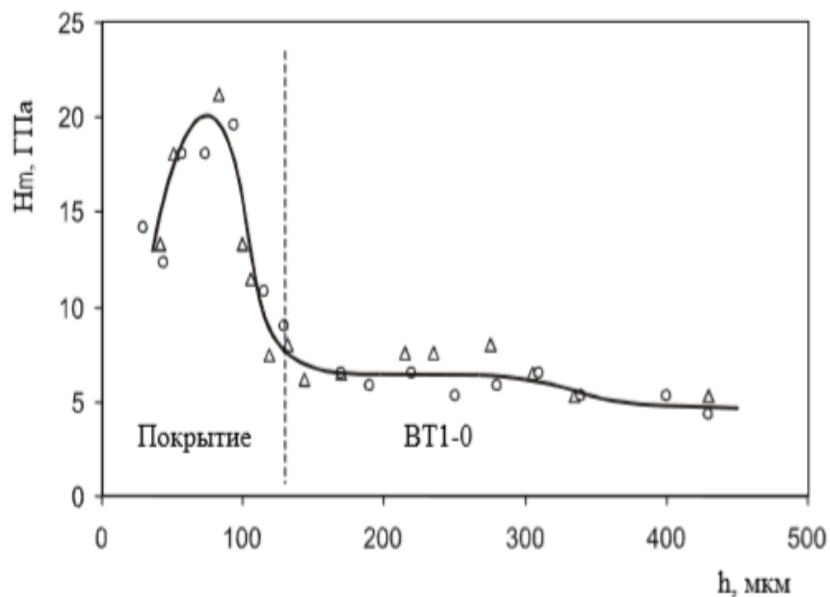
Рис. 2.2.5 Мікроструктура поперечного перерізу (а) і розподіл мікротвердості по товщині (б) ЕІЛ-покриття системи ЦЛАБ-2 / BT1-0 після його лазерного оплавлення в імпульсному режимі

Для порівняння на рис. 2.2.6 представлена залежність $H_m(h)$ для ЛП ЦЛАБ-3 / BT1-0, отриманого лазерним опромінюванням в середовищі аргону в безперервному режимі порошкового шару, нанесеного на поверхню

титанового зразка. За результатами РФА, отримана поверхня містить наступні фази (в порядку убутання інтенсивності ліній): ZrB_2 , $ZrSi_2$, LaB_6 , SiC , Ti . Таким чином, поверхневий шар являє собою композит на основі дибориду цирконію, в якому поряд з основними легуючими компонентами в невеликій кількості також присутній титан за рахунок його масопереносу з підкладки. Товщина шару підвищеної твердості становить 110-120 мкм.



а)



б)

Рис. 2.2.6 Мікроструктура (а) лазерного покриття ЦЛАБ-3 / ВТ1-0 (оплавлення в безперервному режимі) і розподіл мікротвердості вздовж осі введення енергії по товщині (б)

Висока його мікротвердість ($\sim 20 \pm 1,5$ ГПа) є результатом того, що при лазерному оплавленні порошкової суміші в безперервному режимі

формується поверхневий шар на основі тугоплавких компонентів з хорошим приляганням до основи (рис. 2.2.6, а). Екстремальна зміна H_m може свідчити про градієнт розподілу фазових складових по глибині. Воно є наслідком, з одного боку, розшарування фазових складових з різним змачуванням титановим сплавом в процесі конвективного перемішування, з іншого - збагаченням внутрішнього шару покриття титаном за рахунок його масопереносу з підкладки. Максимальна мікротвердість лазерного покриття на рівні $20 \pm 1,5$ ГПа свідчить про збагачення його середньої області дибориду цирконію, H_m якого становить $\sim 28-30$ ГПа. Збільшення мікротвердості електроіскрових і лазерних покриттів в порівнянні з основою може надавати позитивний вплив на підвищення опору абразивного зношування.

Лазерне оплавлення ЕІЛ-покриття здійснювали в Аг з використанням безперервного лазера ЛТН-103 (рис. 2.2.8) в режимі мінімального оплавлення (довжина хвилі випромінювання 1,06 мкм, щільність потужності $40,8 \cdot 10^4$ Вт / см², швидкість сканування 3 мм / с, діаметр променя 250 мкм, коефіцієнт перекриття дорівнює нулю, доріжки паралельні, крок доріжок 250 мкм, схема оплавлення показана на рис. 2.2.7

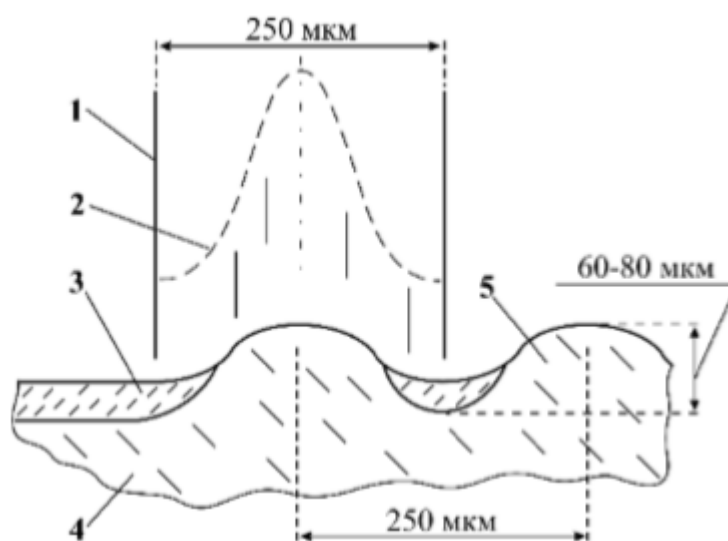


Рис. 2.2.7. Схема лазерного оплавлення ЕІЛ-покриття безперервним лазером. Вид в площині, перпендикулярній лазерним доріжкам: 1 - промінь лазера; 2 - розподіл щільності потужності; 3 - ЕІЛ-покриття; 4 - підкладка (Ті сплав); 5 - лазерна доріжка.



Рис. 2.2.8 - Загальний вигляд лазера ЛТН - 103

В обох випадках мало місце гауссовський розподіл щільності потужності в плямі нагріву. Крім лазерного оплавлення ЕІЛ-покриттів, вивчались лазерні покриття (ЛП). Лазерне покриття отримували шляхом лазерного оплавлення (ЛО) зразка, на поверхню якого легуючий порошковий композит на основі ZrB_2 насипали рівним шаром товщиною 150 -180 мкм. ЛО насипаного порошкового шару здійснювали в середовищі Ar на установці ЛТН-103 в безперервному режимі: потужність 200 Вт, діаметр

променя 250 мкм, швидкість променя 3 мм / с.

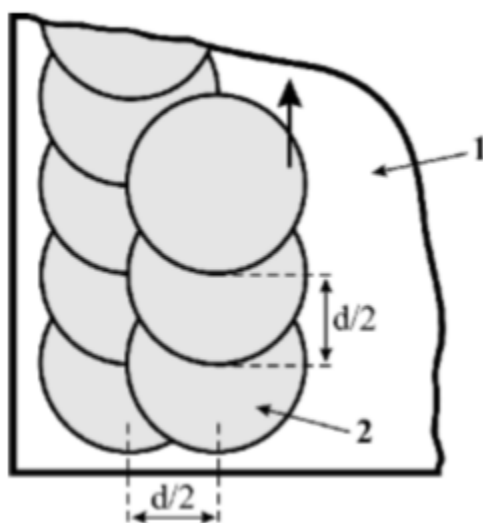


Рис. 2.2.9 Схема лазерного оплавлення ЕІЛ-покриття імпульсним лазером. Вид в площині покриття. Стрілкою показаний напрямок руху променя: 1 - ЕІЛ-покриття; 2 - лазерна доріжка.

2.3 Методи отримання і характеристика електродних матеріалів

Як електродні матеріали для ЕІЛ використовували композиційні кераміки систем $\text{AlN-ZrB}_2\text{-ZrSi}_2$ (ЦБСАН)[23], $\text{ZrB}_2\text{-ZrSi}_2\text{-LaB}_6$ (ЦЛАБ-2)[24] без металевої зв'язки і з Ni-Cr зв'язкою, $\text{LaB}_6\text{-ZrB}_2$ (ЦЛАБ-1)[25] і $\text{ZrB}_2\text{-ZrSi}_2\text{-LaB}_6$ з жаростійкою добавкою SiC (ЦЛАБ-3)[26], $(\text{Ti, Cr})\text{B}_2$ з Fe-Cr зв'язкою (ТХБФ)[27], розроблені у відділі 30 ІПМ НАНУ. Електроди отримували методом гарячого пресування під тиском 35 МПа. Фазовий склад і режими одержання електродних матеріалів наведені в табл. 2.3.1. Для порівняння використовували стандартний твердий сплав ВК3 системи WC-Co , який традиційно застосовується в промисловості.

Таблиця 2.3.1 Склад і режими одержання електродних матеріалів, використовуваних для нанесення ЕІЛ-покриттів

Склад матеріалів , об.%	Температура гарячого пресування, °С	Час спікання, хв
65,83AlN+29,96ZrB ₂ +4,21ZrSi ₂ (ЦБСАН)	1820–1860	25–45
59,19LaB ₆ +27,47ZrB ₂ + +15,33Ni+5,25Cr+0,42Al (ЦЛАБ-1)	1550–1600	25–35
59,24ZrB ₂ +23,04ZrSi ₂ +17,72LaB ₆ (ЦЛАБ-2)	1820–1860	25–35
41,19ZrB ₂ +16,02ZrSi ₂ +12,32LaB ₆ +30,47SiC (ЦЛАБ-3)	1820–1860	25–35
80,32(Ti,Cr)B ₂ +19,68FeCr (ТХБФ)	1600–1650	15–20
94,8WC+5,2Co (БК3)	—	—

Вихідні компоненти (табл. 2.3.2) суміші для гомогенізації і подрібнення змішували і розмелювали на планетарному млині в середовищі ацетону технічної чистоти протягом 6-8 годин. Суміші подрібнювали в барабанах, футерованих нітридом алюмінію. В якості тіл, які мелють використовували кулі з підшипникової сталі ШХ15 діаметром 8 мм.

Таблиця 2.3.2 Характеристики вихідних порошків

Порошок	Атомний склад, мас. %
ZrB ₂	B – 19,0, Zr – інше.
ZrSi ₂	Si – 36,9, C – 1,2, Zr – інше.
LaB ₆	La – 68,2, B – 31,8.
AlN техн.	N – 32,5, O – 1,2, C – 0,1. Середній розмір часток 2–5 мкм.

Зміст домішки заліза за рахунок намолю не перевищувало 5%. Для запобігання взаємодії з графітовими прес-формами використовували глину з гексагонального нітриду бору. Отримані електроди із залишковою

пористістю до 3% і розміром зерна 2-3 мкм піддавали механічній обробці із зняттям верхнього шару матеріалу, шліфуванням поверхні. Фізико-механічні властивості матеріалів (міцність на вигин $S_{\text{виг}}$, тріщиностійкість K_{1c} , твердість HV) представлені в табл. 2.3.3.

Таблиця 2.3.3 Фізико-механічні властивості електродних матеріалів

Матеріал електроду	$S_{\text{виг}}$, МПа	K_{1c} , МПа $\cdot\text{м}^{1/2}$	HV, ГПа
ЦБСАН	600 – 12	4,8	25,5*
ЦЛАБ-1	200 – 12	—	15,04
ЦЛАБ-2	620 – 10	4,5	27–28

*) Мікротвердість, H_m .

2.4 Обладнання для подрібнення порошків

Важливою технологічною операцією є змішування та розмелювання порошків для напилювання. Після зважування навески, порошки піддавались обробці у планетарному відцентровому млині марки XQM–2, загальний вид якого наведено на рис. 2.4.1.

Планетарний кульовий млин XQM-2 призначений для перемішування, гомогенізації, подрібнення, механічного легування, руйнування клітин, високотехнологічного виробництва матеріалів невеликого обсягу і навіть колоїдного подрібнення. Є ідеальним як сухим, так і вологим розмельним інструментом для досліджень зразків, з високою ефективністю і низьким рівнем шуму.



Рис. 2.4.1 Загальний вигляд планетарного кульового млину XQM-2

Даний кульовий млин успішно використовується практично у всіх промислових і наукових організаціях. Основні області застосування: сільське господарство, біологія та біотехнологія, виробництво кераміки і скла, виробництво хімікатів та будівельних матеріалів, екологічні дослідження, медицина, мінералогія, металургія.

Принцип роботи полягає в обертанні чотирьох барабанів відносно центральної осі і навколо власної осі, в протилежну сторону обертання ротора млина. Барабани планетарного млина обертаються навколо власних осей і навколо осі "переносного обертання", а розмельні кулі в стаканах піддаються накладеним обертальним рухам, так званій силі Коріоліса. При збільшенні швидкості подрібнення в розмельних барабанах збільшується відцентрова сила. Це досягається завдяки використанню спеціального планетарного редуктора, що забезпечує барабанам це специфічне обертання. Така схема дозволяє створювати перевантаження в десятки G, багаторазово збільшуючи ефективність подрібнювального устаткування і знижуючи енерговитрати на процес помолу. Також можливе використання вакуумних склянок, які дозволяють молоти зразки у вакуумному середовищі. Технічні характеристики планетарного кульового млина приведені в табл. 2.4.1

Таблиця 2.4.1 Технічні характеристики планетарного кульового млина XQM

- 2

Подрібнюючі ємності	4
Загальний об'єм, л	2
Розміри завантажуючого матеріалу, мм	
Крихкий, не більше	10
Інші, не більше	3
Мінімальний розмір	
Часток після подрібнення, мкм	0,1
Швидкість обертання, об/хв	70–700
Потужність, Вт	750 Вт
Вага, кг	21

Для підвищення подрібнюючої ефективності в ємність завантажували кулі різного розміру, кількість яких повинна становити 50 % від об'єму суміші: кулі

Ø 12 мм – 40 шт., кулі Ø 10 мм – 50 шт., кулі Ø 8 – мм 60 шт.

Експериментально встановлено, що за частотою обертання ємностей 120–125 об/хв на протязі 6–8 хв, відбувається формування керамічного порошку з необхідним гранулометричним складом (табл. 2.5).

Таблиця 2.4.2 Параметри процесу модифікації

Подрібнюючі ємності,	2
загальний об'єм, л	1
Розміри подрібнюючих куль, мм	
Ø 12	40 шт.

Ø 10	50 шт.
Ø 8	60 шт.
Мінімальний розмір часток	
після перемішування, мкм	40
Швидкість обертання, об/хв	120–125
Час перемішування, хв	6–8

2.5 Методи вивчення триботехнічних властивостей

2.5.1 Зношування нежорстким закріпленим абразивом

Випробування на абразивну зносостійкість (АЗ) проводили на повітрі на машині тертя Національного авіаційного університету України (НАУУ), використовуваної для порівняльної оцінки зносостійкості матеріалів і покриттів при терті в умовах нежорстко закріпленого абразиву (рис. 2.3). Прийнятий в дослідженнях метод визначення зносостійкості відповідає ГОСТ 23.208-79. Випробуваний зразок з покриттям розміром 30 × 30 мм притискається навантаженням. Випробування проводили при швидкості ковзання 0,163 м / с і навантаженнях 44,1 Н і 84,2 Н. Як абразив використовували кварцовий пісок (SiO₂) зернистістю 100-160 мкм. Знос вимірювали гравіметрично з точністю 0,0001 р. Об'ємний знос оцінювали з

урахуванням щільності матеріалу, що наноситься.

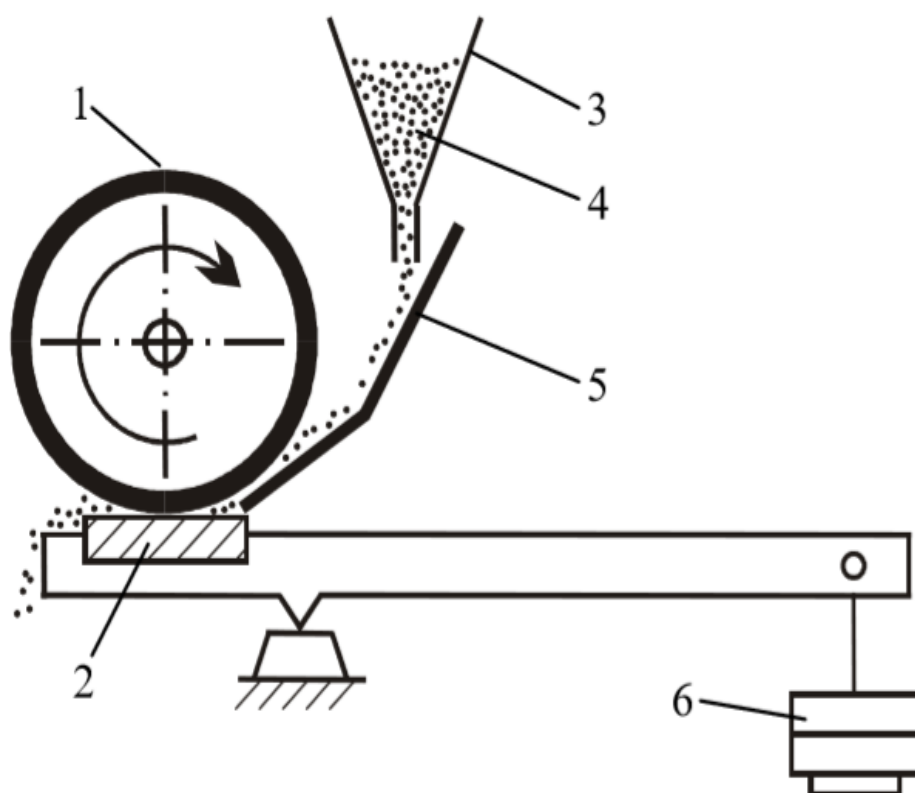


Рис. 2.5.1 Схема машини тертя в умовах нежорстко закріпленого абразиву: 1 - гумовий ролик, 2 - зразок, 3 - дозатор, 4 - пісок, 5 - лоток, 6 - навантаження

2.6 Методи дослідження кінетики масопереносу, складу, структури, фізико-механічних та фізико-хімічних властивостей робочих поверхонь

Кінетику масоперенесення вивчали гравіметричним методом з точністю 10^{-4} г, вимірюючи питомий (D_k) і сумарний ($kt D$) приріст катода, питому (Da) і сумарну ерозію ($at D$) анода через кожну хвилину обробки 1 см^2 поверхні з подальшою статистичною обробкою результатів по 3-5 зразкам. Коефіцієнт масопереносу (K) оцінювали як відношення $D D = t a / t k K$, де t - час обробки. Рентгенофазовий аналіз робочих поверхонь проводили на установці ДРОН-3 у $\text{Cu K}\alpha$ випромінюванні, мікротвердість вимірювали при

навантаженні 0,5 Н на приладі ПМТ-3. Мікрорентгеноспектрального аналізу, мікроструктуру і морфологію поверхні в характеристичний випромінюванні вивчали на мікроаналізаторах Camebax SX-50 і Jeol Suberprobe 733, забезпечених приставками для елементного аналізу. На установці LAS-2000 фірми "Riber" аналізували склад поверхні за допомогою методу EDX, а також проводили пошаровий аналіз складу за допомогою методу кількісної Оже-електронної спектроскопії при швидкості травлення поверхні іонами Ar + близько 10 нм / хв. Підготовку зразків для металографічних досліджень проводили традиційними способами, застосовуваними в металографії[28]. Міцність матеріалів при згині визначали при кімнатній температурі на універсальній машині для механічних випробувань типу 1231-Y10 виробництва НІКІМП (г. Москва) методом триточкового згину по ГОСТ 18228-72. Для випробувань застосовувалися зразки з розмірами $3,5 \times 5,0 \times 35$ мм, швидкість переміщення активного опору становила 6 мм / хв. Величина межі міцності при вигині розраховувалася за формулою

$$s_{\text{сг}} = \frac{M}{W} = \frac{3Nl}{2bh^2}, \quad (2.1)$$

де $M = \frac{Nl}{4}$ - максимальний момент згину, $W = \frac{bh^2}{6}$ - момент опору, N - навантаження при руйнуванні, Н; l - відстань між зовнішніми опорами навантажувальної системи, мм; b - ширина зразка, мм; h - висота зразка, мм. Для вимірювання критичного коефіцієнта інтенсивності напружень K_{Ic} використовували метод індентування.

З АНАЛІЗ ТА РОЗРАХУНКИ НАПРУЖЕНО – ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО ПОКРИТТЯ НА ПОВЕРХНЯХ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ В УМОВАХ ФРИКЦІЙНОГО КОНТАКТУ

В основі формування зміцнюючого шару на поверхнях шляхом легування під дією електричного розряду лежить взаємодія матеріалів катоду з висококонцентрованими потоками енергії та речовини анода. Основною енергетичною характеристикою процесу є енергія одиничного іскрового розряду, яка в загальному випадку описується виразом

$$W_p = \int_0^{t_i} U(t) \cdot I(t) dt \quad (3.1)$$

де t_i – тривалість одиничного іскрового розряду;

$U(t)$, $I(t)$ – падіння напруги та сили струму, відповідно, в між електродному просторі в часі.

Дія висококонцентрованої енергії стимулює протікання мікрометалургійних процесів в зоні електричного розряду. Зміцнюючий шар виникає в результаті складних плазмохімічних, теплофізичних та механотермічних процесів, які мають місце на мікролокальних ділянках взаємодії матеріалу з іскровим розрядом. При подачі електричного імпульсу, за певної напруженості поля і відстані між електродами, виникає електричний розряд. Через утворений канал провідності пучок електронів фокусовано співударяється об поверхню анода, розігрівуючи її до оплавлення. Від анода відокремлюється крапля розплавленого матеріалу і рухається до катода. Протягом кожного акту контактної взаємодії між краплею легуючого елемента та зміцнюваною поверхнею з'являються та руйнуються мікролокальні адгезійні зв'язки, які спричиняють пластичну деформацію модифікованого шару і механічний масоперенос.

Композиційна структура зміцненої поверхні має таку будову. Верхній шар складається з тонкоплівкових „острівкових” утворень (дискретна

структура), головним чином з матеріалу анода, які модифіковані елементами основи та міжелектродного середовища. Його суцільність залежить від умов та режимів процесу зміцнення. Далі знаходиться шар, що виник в результаті конденсації іонно-плазмової фази на зміцнюваній поверхні та складається із суміші матеріалів основи і електрода, а під ним шар, сформований за рахунок дифузії елементів електрода в зміцнювану матрицю-основу. Наступний шар – це зона термічної дії, яка являє собою трансформовану структуру основи зі зміненою щільністю дефектів кристалічної будови, що з'явилися при цьому і поступово переходять в структуру основи. В залежності від режимів процесу зміцнення величина і ступінь зміцнення кожного шару може варіюватись в широкому діапазоні, але найбільшу товщину має зона термічної дії, яка помітно впливає на експлуатаційні характеристики зміцнюваної поверхні. Така різноманітність властивостей шарів композиційної структури зміцненої поверхні є відповідальною за її напружено-деформований стан і, як наслідок, за зносостійкість. Зупинимось на цьому питанні більш детально.

3.1 Структурно-енергетичні особливості процесу формування покриття при електричному розряді

При електричному розряді, який супроводжує електроерозійний процес, ерозійні частинки, переміщуючись в міжелектродному просторі, накопичують в собі електричну, теплову і кінетичну енергії. Осідаючи на зміцнювану поверхню частинки віддають їй практично всю накопичену енергію у вигляді теплового імпульсу, внаслідок чого в зоні взаємодії виникає кратероподібне заглиблення. Розміри такого заглиблення визначається енергією теплового імпульсу, тому характер розподілу кратерів по зміцнюваній поверхні може бути показником структури і енергетики анодного потоку. В результаті, одними з основних параметрів процесу зміцнення при електричному розряді є температура, її градієнт та швидкість, які визначають практично всі структурні процеси, що відбуваються при

цьому. Висока швидкість процесів не дає можливості здійснювати виміри температурних характеристик, тому основним методом досліджень є теоретичний теплофізичний аналіз. Зв'язок між щільністю енергії в центрі імпульсного теплового джерела і температурою визначається на основі розв'язання задачі Стефана – рівняння теплопровідності з урахуванням фазових перетворень та рухливості границь кристалізації:

$$T_{пл} = \frac{E_0 \cdot erf\left(\frac{\alpha\sqrt{a}}{2}\right)}{\lambda \cdot \sqrt{2t_i}} \quad (3.1)$$

де $T_{пл}$ – температура плавлення; E_0 – щільність енергетичного потоку;

t_i – тривалість теплового імпульсу;

α – коефіцієнт температуропровідності;

a – коефіцієнт, який визначає умови поєднання рішень на межі плавлення;

λ – коефіцієнт теплопровідності.

Гradient температури в поверхневих шарах визначає чисельні значення термонапружень, які у випадку перевищення межі пружності матеріалу приводять до локальної термопластичної деформації, сприяючи виникненню дефектів кристалічної будови. З підвищенням енергії одиничного іскрового розряду температура та її gradient збільшуються. Це приводить до структурних змін в матеріалі основи – росту щільності дислокацій. Саме з величиною щільності дислокацій пов'язана зносостійкість зміцненої поверхні. Першочерговим актом триборуйнування є пластична деформація контактуючих шарів, яка пов'язана з ковзанням дислокацій. Це означає, що енергію активації руху дислокацій можна прийняти адекватною енергії активації механічного руйнування при терті. При підвищенні щільності лінійних дефектів кристалічної будови енергія активації руху дислокацій зменшується, а їх рухливість росте. Структура з максимальною щільністю дислокацій має підвищений опір зносу за рахунок підвищеної механічної міцності і руйнування більш мілкими частинками зносу.

Таким чином, напружено-деформований стан поверхні, зміцнюваної дією електричного розряду, визначатиме опір її до механічного зносу. Виконаємо розрахунки та визначимо вплив геометрії покриття дискретного типу на напружено-деформований стан основи.

4 Механізм і кінетика зносу.

Структурно-фазові перетворення на поверхні електроіскрових і лазерно-електроіскрових покриттів, які містять ZrB_2 на титанових сплавах в умовах зношування на повітрі

Створення покриттів, поверхня яких покращує свої трибологічні властивості в процесі експлуатації під навантаженням на повітрі, є пріоритетним напрямком трибологічного матеріалознавства[21]. До такого роду покриттів / матеріалів можуть бути віднесені композити на основі дибориду перехідних металів IV групи (TiB_2 , ZrB_2 , HfB_2), що утворюють в процесі окислення / трибоокислення окалини на основі оксиду бору, дисперсно-зміцненого діоксидом відповідного металу[29]. При терті без змащення в зоні контакту в процесі трибогартування в результаті структурно-фазових перетворень утворюється поліоксидний шар, який виступає в ролі твердого змащення, перебуваючи в квазірідкому стані за рахунок низької стійкості до зсуву при підвищених контактних температурах, створюваних навантажено-швидкісними параметрами[29]. За інших рівних умов термін служби / зносостійкість покриття визначається конкуренцією процесів утворення поліоксидного шару і його видалення (руйнування) із зони контакту під впливом трибонавантаження.

В рамках цієї концепції, зносостійкість покриття залежить від стабільності поліоксидного шару і, відповідно, від тих його властивостей, які перешкоджають його видалення з поверхні. Тому величина зносу DV повинна бути тим менше, чим більше адгезійна міцність зв'язку поліоксидного шару з покриттям ($F_{ад}$) і швидкість його спікання ($Scп$) в процесі трибосинтеза, при цьому адгезійна взаємодія з контртілом ($F_{кт}$) має бути мінімальним :

$$DV \sim F_{кт} (F_{ад} Scп)^{-1}, \quad (4.1)$$

де $Scп. = A (Dm / dn)$, a , m , n - коефіцієнти,

D - коефіцієнт дифузії кисню в оксиді,

d - діаметр частинок.

Крім того, для екстремальних умов експлуатації (при підвищених температур і / або навантажено-швидкісних параметрах) необхідно враховувати температури плавлення / випаровування (Тпл. / Исп.) І фізико-механічні властивості утворюються в процесі тертя оксидних фаз.

4.1 Формування поліоксидного шару на зношених поверхнях, кінетика і механізм абразивного зношування покриттів на сплаві ВТ-20

В умовах зношування нежорстким закріпленим абразивом в трибоконтакті «абразивний частка - поверхню зносу» на поверхні можливе формування поліоксидного шару за рахунок механо-активуючого впливу багаторазових циклів ковзання і прокатування під навантаження абразивних частинок, подрібнюють в процесі тертя на повітрі. Пластичне деформування приповерхневого шару ініціює як подрібнення його зерен структури, так і формування поліоксидного шару за рахунок механоактивованого процесу фазоутворення і трибоокислення.

4.1.1 Властивості поверхні покриттів після абразивного зношування

Процес шліфування зразків покриттів ЦЛАБ2 / ВТ1-0 здійснювали нежорстко закріпленим кварцовим абразивом на повітрі на машині тертя НАУУ за схемою, що використовує гумовий ролик для передачі навантаження на абразивні частинки. Навантаження становило 44,1 Н, шлях тертя 200 м. З дифрактограм поверхонь ЕІЛ-покриття до і після АЗ (рис. 4.1) випливає, що в результаті трибоокислення збільшується вміст складного оксиду (Ti, Zr) O₂, SiO₂ і, мабуть, В₂О₃, який не виявляється через його

аморфізації.

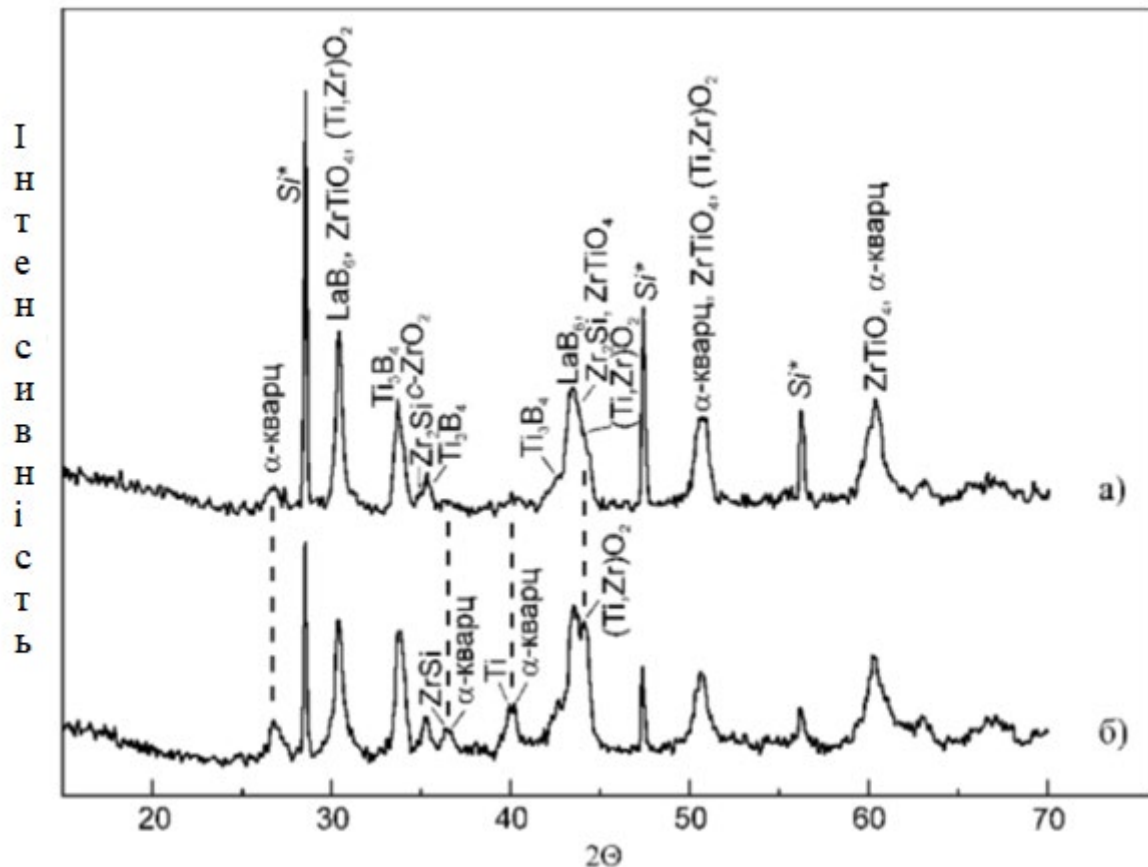


Рис. 4.1 Дифрактограми поверхні ЕІЛ-покриття ЦЛАБ-2 / ВТ1-0 до (а) і після (б) абразивного зношування.

В рівноважних умовах окислення боридів і силіцидів цирконію протікає при $T \leq 750$ С і $T \geq 750$ С, відповідно. Утворення складних оксидів титану-цирконію свідчить про те, що в умови нерівноважних процесів зношування нежорсткими закріпленим абразивом і електроіскрового легування окислення відбувається при значно менших температурах.

Після АЗ зберігається структурована поверхня комбінованого (ЕІЛ + ЛОнепр.) - покриття (рис. 1.6) у вигляді доріжок модифікованої титанової

матриці і проміжних ділянок ЕІЛ-покриття, збагачених киснем.

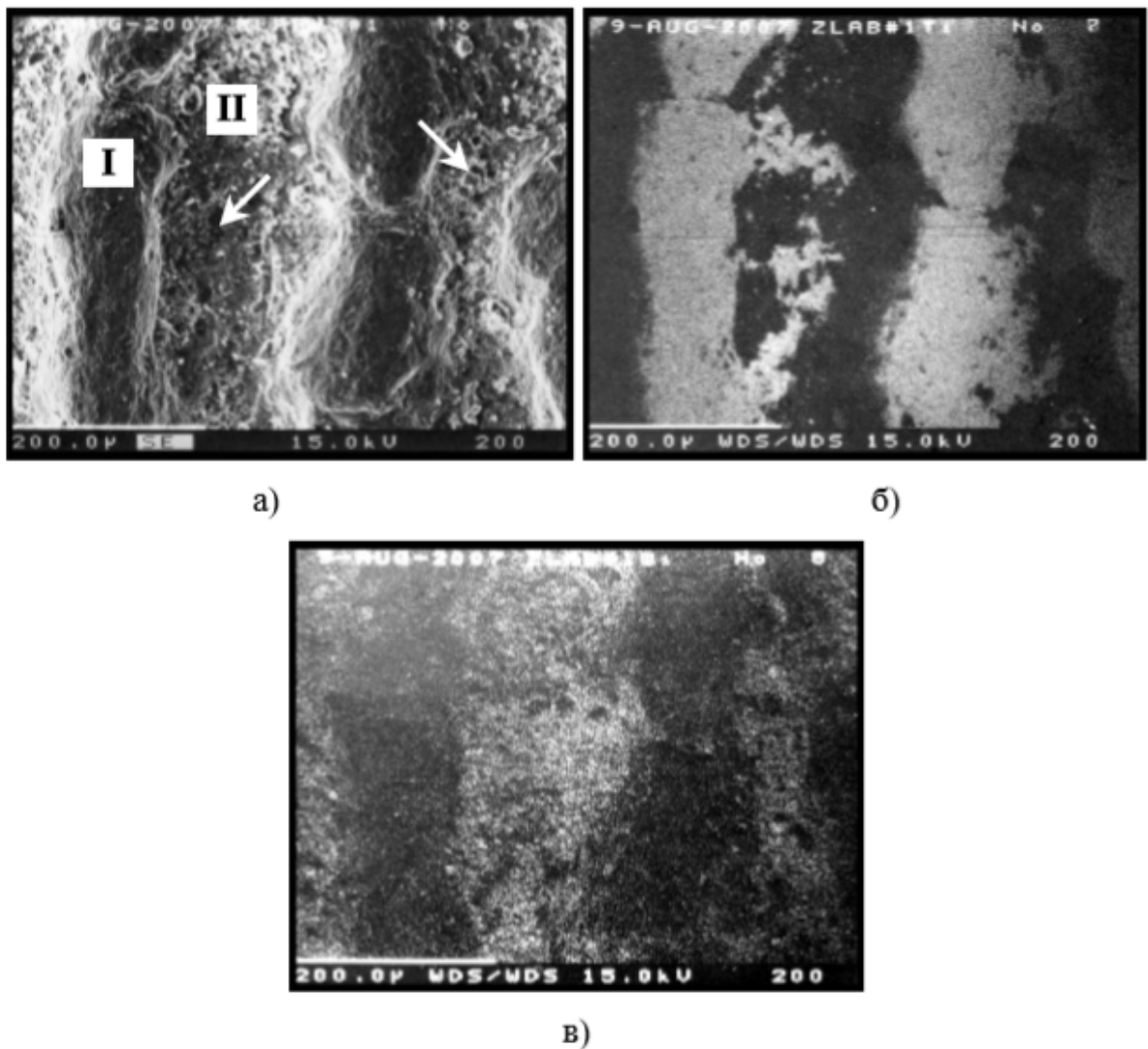


Рис. 4.2 Розподіл елементів на зношеній поверхні комбінованого покриття ЦЛАБ-2 / ВТ1-0 у вторинних електронах (а) і в характеристичному випромінюванні: б) - Ті К α ; в) - О К α (стрілки вказують на дефекти зносу)

Окремі поперечні тріщини спостерігаються переважно на лазерних доріжках (рис. 4.3, а). Зони ЛО слабо труяться в водному розчині HF, що може свідчити про подрібнення зерен структури (рис. 4.3, б, в). Поверхня доріжок ЛО, які виступають над ЕІЛ-покриттям на ~ 60 - 80 мкм, є робочою поверхнею зносу комбінованого покриття. Характер мікроструктури зношеної поверхні ЕІЛ-покриття (рис. 4.4, а, б) і комбінованого (ЕІЛ + ЛОнепр.) - покриття (рис. 4.5, а, б) істотно розрізняються і ця різниця вказує на зміну ведучого механізму зношування з крихкого руйнування матеріалу

для ЕІЛ-покриття на локальний знімання - для комбінованого. Глибокі тріщини на зношеній поверхні ЕІЛ-покриття - результат його крихкого руйнування абразивними частинками.

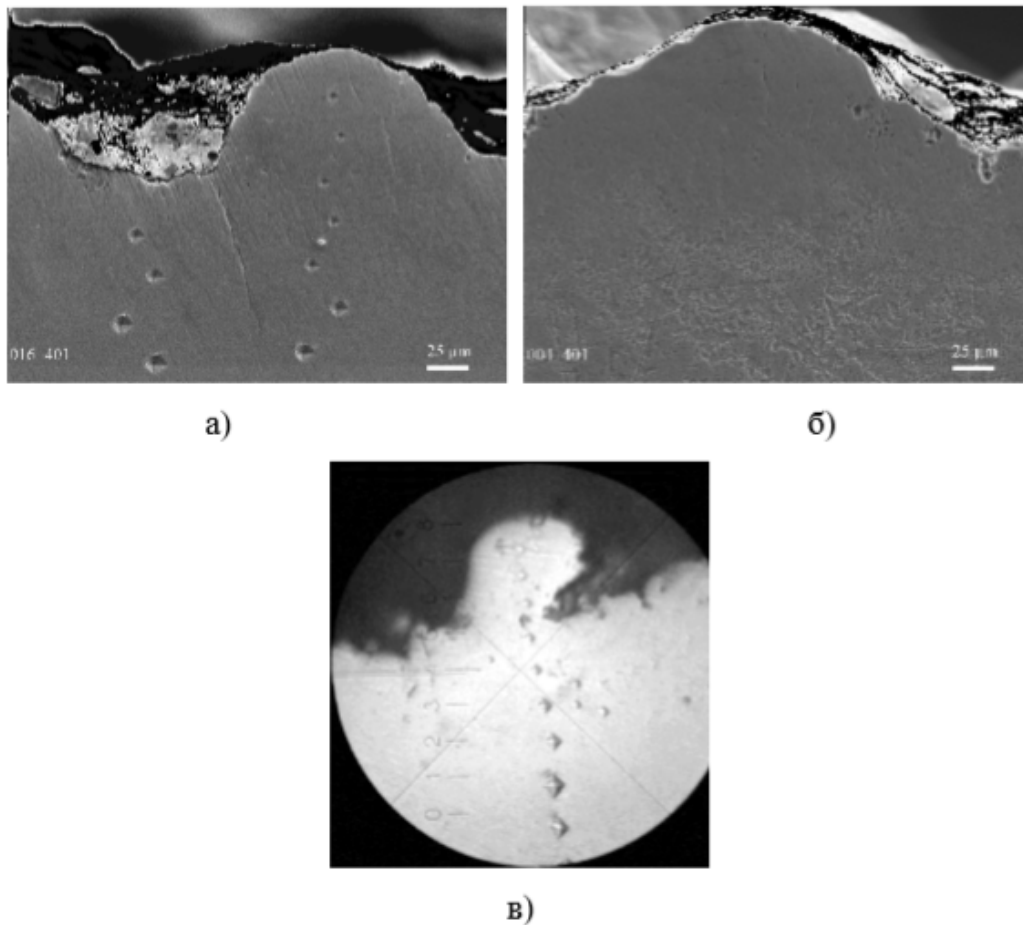


Рис. 4.3 Мікроструктура травленої поверхні поперечного перерізу комбінованого (ЕІЛ + ЛОнепр.) - покриття ЦЛАБ-2 / ВТ1-0 після абразивного впливу: а), б), в) - різні лазерні доріжки

Зношена поверхня комбінованого покриття (рис. 4.5, а, б) сформована в результаті локалізації знімання матеріалу з утворенням слідів зносу у вигляді виривів і канавок, які свідчать про пластичну деформацію як провідний механізм зношування. В цьому випадку, більш рівномірний і слабо виражений розподіл Si і, відповідно, більш рівномірний розподіл титану (рис. 4.5, в, г) вказують на меншу глибину дефектів зносу в порівнянні з ЕІЛ-покриттям (рис. 4.4, в, г). Неоднорідний розподіл Si (рис. 4.4, в) свідчить про те, що він заповнює в основному структурні дефекти зносу.

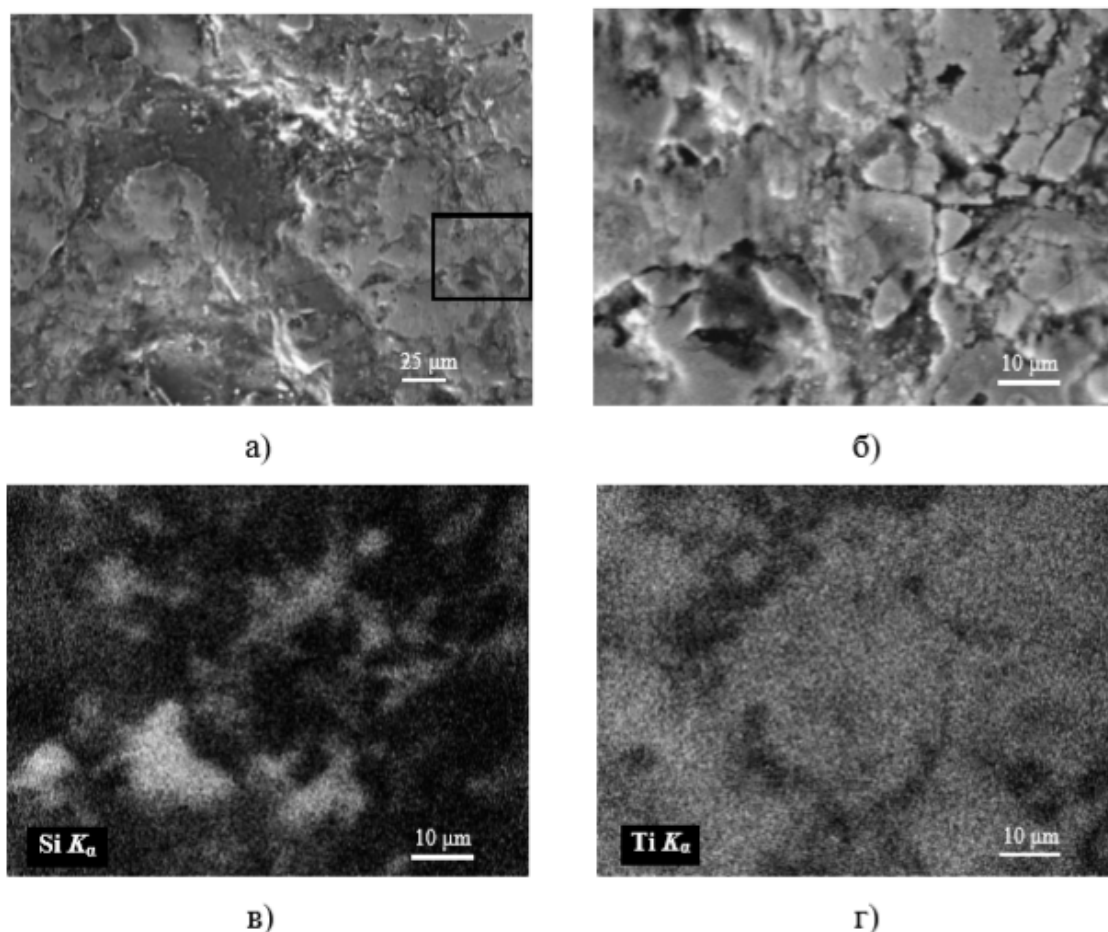


Рис. 4.4 Мікроструктура зношеної поверхні ЕІЛ-покриття ЦЛАБ-2 / BT-20 у вторинних електронах (а, б) і в характеристичному випромінюванні Si K α (в) і Ti K α (г)

Головна причина зміни механізму зносу з крихкого руйнування ЕІЛ-покриття на переважно пластичне деформування (ЕІЛ + ЛО) - покриття (рис. 4.4, рис. 4.5) складається в фазовій трансформації поверхні з тендітної керамічної в металеву. На (рис. 4.6) показана зміна H_m в поперечному перерізі вихідного ЕІЛ-покриття (крива 1) в зіставленні з вихідної (крива 2) і зношеної (крива 3) поверхнями доріжок ЛО. У всіх випадках H_m закономірно зменшується по глибині до значення $\sim 2,5$ ГПа, відповідно мікротвердості основи. Різниця в величині твердості доріжок ЛО в безперервному і імпульсному режимах пов'язано з різними схемами

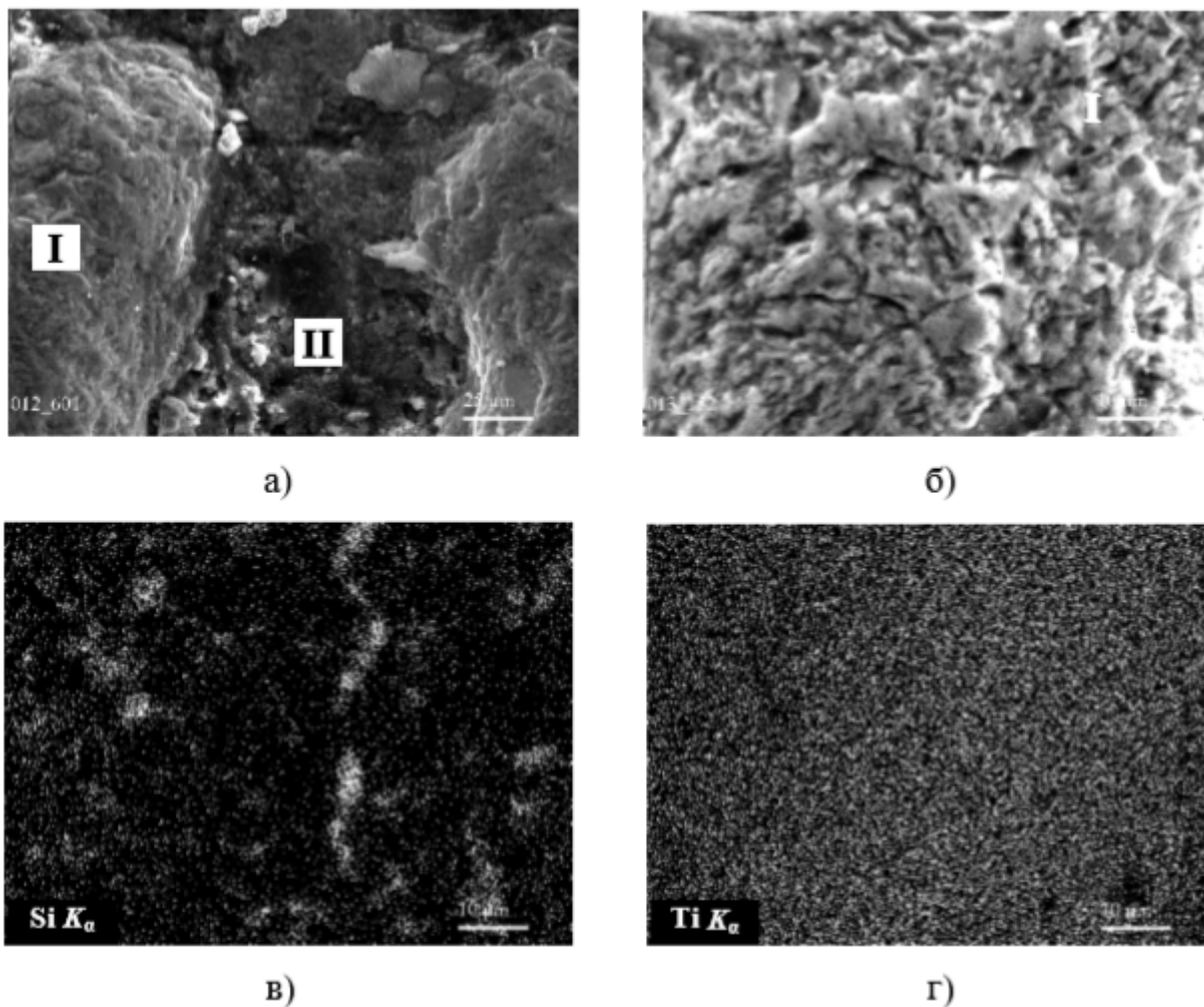


Рис. 4.5 Мікроструктура зношеної поверхні комбінованого (ЕІЛ + ЛОнепр.) - покриття ЦЛАБ-2 / ВТ1-0 у вторинних електронах (а, б) і в характеристичному випромінюванні Si K α (в) і Ti K α (г) (I - зношена поверхня лазерної доріжки; II - ЕІЛ-покриття).

Імпульсна ЛО ЕІЛ-покриття знижує твердість (рис. 4.6, крива 2) за рахунок високого коефіцієнта перекриття лазерних імпульсів і доріжок - 0,5 (рис. 2.2), що приводить практично до 4-кратного переплавлення шару. Як наслідок, відбувається інтенсивна взаємодія ZrB_2 з матеріалом основи з утворенням подвійного бориду $Ti_{0,5}Zr_{0,5}B_2$, змішаних оксидів Ti-Zr ($Ti_{0,5}Zr_{0,5}O_{19}$, $Ti_{0,28}Zr_{0,72}O_{28}$) твердого розчину Ti (Zr) і, можливо, TiB,

що призводить до майже повного зникнення ZrB_2 (рис. 4.7).

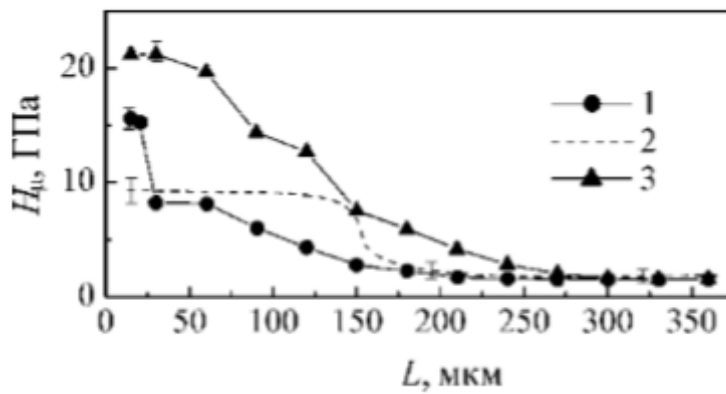


Рис. 4.6 Зміна мікротвердості по глибині покриттів ЦЛАБ-2 / ВТ1-0:

1- ЕІЛ-покриття; 2- доріжка ЛО_{імп.} до АЗ; 3- доріжка ЛОНепр. після АЗ.

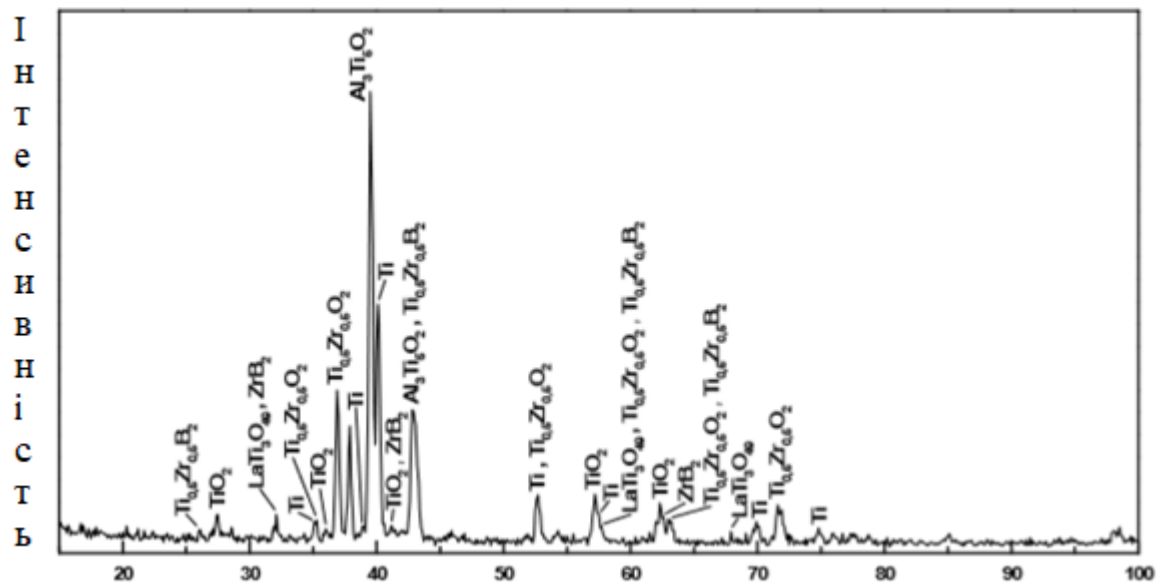


Рис. 4.7 Дифрактограма вихідної поверхні (ЕІЛ + ЛО_{імп.}) - покриття ЦЛАБ-2 / ВТ3-1.

Удвічі більше висока твердість (ЕІЛ + ЛОНепр.) - покриття (рис. 4.6, крива 3) також пов'язана зі схемою оплавлення (рис. 2.1), що приводить лише до нетривалого однократного впливу на ЕІЛ-покриття, в результаті чого в лазерних доріжках зберігається помітно більша кількість ZrB_2 , що не прореагував з титановим розплавом.

4.1.2 Мікроструктурні зміни по глибині зламу лазерно-електроіскрового покриття після абразивного зношування

Однією з причин підвищення твердості після АЗ може бути вплив на поверхню багаторазових циклів прокатування і ковзання абразивних частинок під навантаженням. При такому впливі на поверхню лазерно-електроіскрового покриття, що представляє собою модифікований легуючими компонентами титановий сплав підкладки, можливо пластичне деформування в поєднанні з фрагментацією елементів структури в поверхневому металевому шарі. Об'єктом дослідження був зразок сплаву VT10 з комбінованим покриттям системи ZrB_2 - $ZrSi_2$ - LaB_6 (ЦЛАБ -2) після АЗ: а) природна поверхня зразка після обробки; б) природний злам, утворений при руйнуванні зразка від ударної дії при кімнатній температурі; в) шліфи поперечного перерізу зразка. У зламі зразка досліджувалась зміна мікрорельєфу зношеної поверхні руйнування в поперечному перерізі. Аналіз елементів мікрорельєфу руйнування дозволив визначити особливості мікроструктури покриття по товщині і ідентифікувати механізм його руйнування, яка пояснювала б природу структурних перетворень в покритті в процесі АЗ і підвищення твердості покриття. Доріжки ЛО, наявні на поверхні покриття в початковому стані, в процесі АЗ деформуються - на їх бічних поверхнях з'являються добре виражені сходинки (рис. 4.8). Елементний склад доріжок оплавлення наступний - Ti, O, Zr (~ 1,0 мас.%). У зламі зразка в приповерхневої області виділяються дві зони, що різко відрізняються від об'ємної частини морфологією мікрорельєфу руйнування (рис. 4.9). Перша зона - це найближчий до поверхні шар зразка (товщина ~

170 мкм) в поєднанні з виступами на поверхні лазерних доріжок оплавлення.

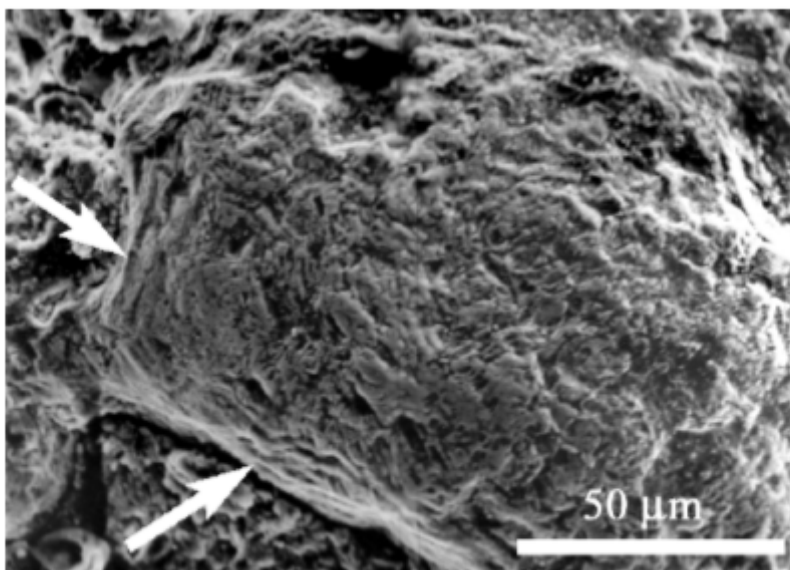
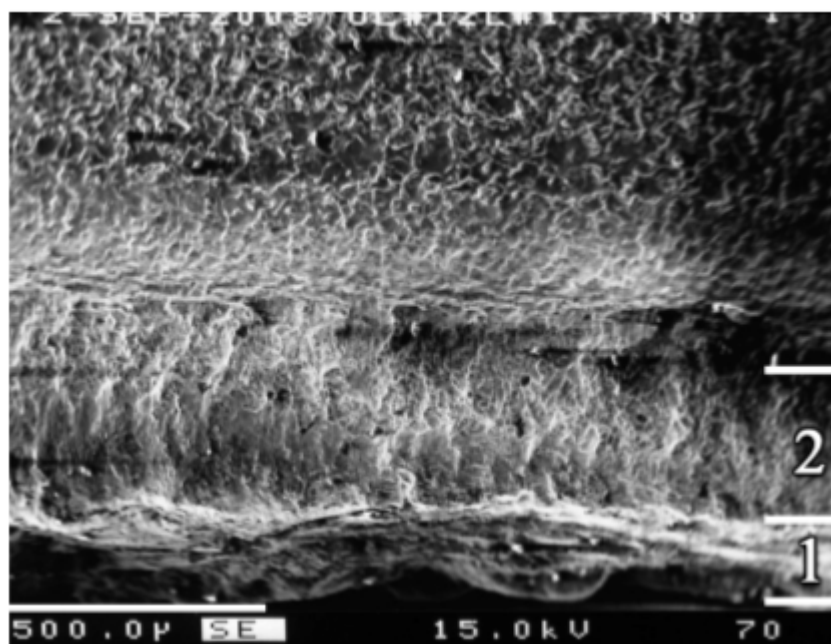


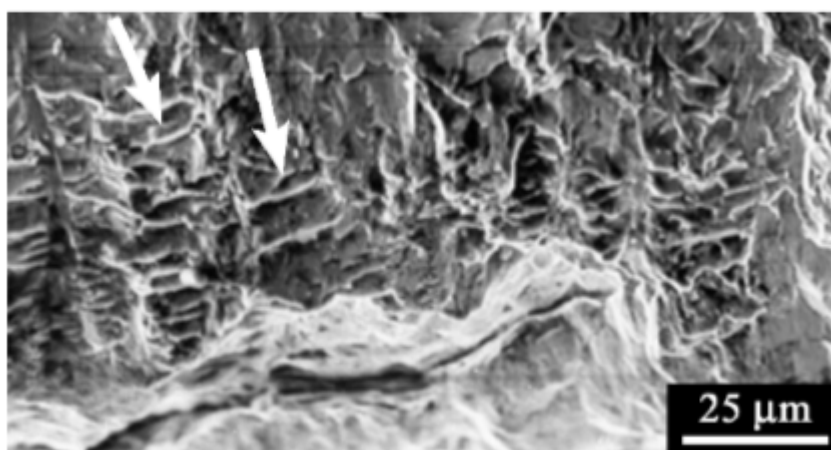
Рис. 4.8 Типова ділянка мікроструктури поверхні лазерної доріжки ЛО комбінованого покриття після АЗ. Система сходинок на бічній поверхні виступу вказана стрілками.

Для І зони характерними є два типи мікроструктур руйнування:

1. Руйнування шляхом послідовного відшарування мікрооб'ємів зразка в зоні (рис. 4.10). У поперечних перетинах шарів видно ступені відколу (рис. 4.11). У розвинутій поверхні шарів іноді зустрічаються системи сходинок з плоскими поверхнями огранки (рис. 4.12), що характерно для мікроструктур відколу кристалів. Між шарами часто виявляються включення округлої форми розмірами ≈ 1 мкм (рис. 4.13). Базовий елементний склад шарів (за даними рентгеноспектрального мікроаналізу) - титан, кисень, з зазначеними включеннями - титан, кисень, цирконій, кремній, залізо. Зміст цирконію у включеннях, розташованих в різних ділянках зони, може сильно відрізнятися (від десятих часток мас.% До одиниць і більше).



a)



б)

Рис. 4.9 Типова мікроструктура зламу зразка з комбінованим покриттям після АЗ: а - загальний вигляд (1 - приповерхнева зона шаруватої будови; 2 - зона стовпчастої будови); б - збільшений фрагмент області зони 2 (стрілками вказані елементи розшарування).

2. Руйнування шляхом відшарування з сильним диспергуванням шарів - до елементів розмірами 1-3 мкм (рис. 4.14). Для другої зони зразка характерним є мікрорельєф руйнування у вигляді елементів стовпчастої будови, що представляють собою ділянки мікророзшарування. Такі елементи розташовані приблизно ортогонально по відношенню до першої

зони, а складові їх шари паралельні верствам першої зони (рис. 4.8).

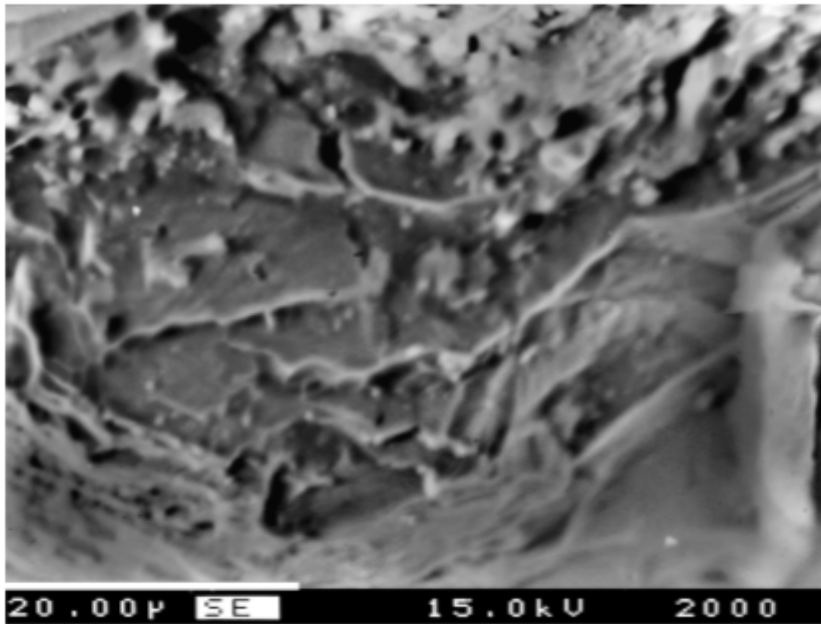


Рис. 4.10 Мікрорельєф розшарування, що утворюється при руйнуванні ділянки зони I

Аналіз шліфа зразка в першій зоні підтверджує наявність в матричній складовій (сплав ВТ1-0) виділень, збагачених титаном, киснем і цирконієм. Є включення поліедрічної огранки розмірами до 5 мкм (рис. 4.15).

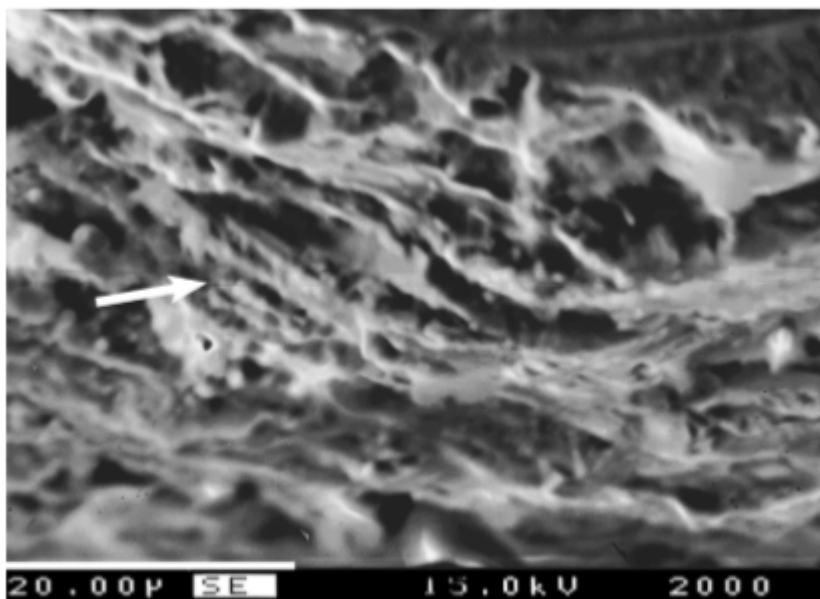


Рис. 4.11 Мікроструктури руйнування областей в зоні І зі ступенями відколу (вказані стрілкою).

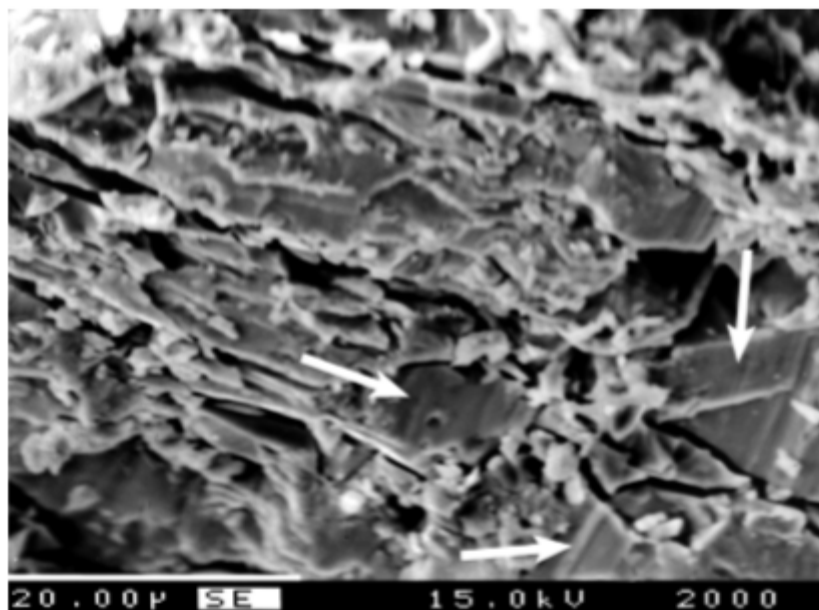


Рис. 4.12 Мікрорельєф зламу області в зоні І (рис. 4.6, а), обумовлений розшаруванням в поєднанні зі сколом ділянок (вказані стрілками).

Результати структурного дослідження показують, що після АЗ на поверхні комбінованого покриття формується приповерхнева область (товщиною ~ 250 мкм) з градієнтною мікроструктурою. Останнє підтверджується наявністю в зламі двох зон, що відрізняються мікробудовою поверхні руйнування. Шарувату будову в мікроструктурі руйнування такої області можна пояснити особливостями структурного стану титану (підданого ЕІЛ і лазерному оплавленню з наступним абразивним впливом), а саме наявністю деформаційної текстури. Саме такі мікроструктури формуються при руйнуванні шляхом розшарування металів, текстурованих при обробці прокаткою, наприклад Мо[30]. Для титану подібний мікрорельєф зламу може формуватися при кімнатній температурі і передбачається, що він обумовлений руйнуванням за механізмом нестійкого пластичного зсуву[31]. Підтвердженням текстуроутворення в покритті при

АЗ може служити також формозміна доріжок оплавлення безпосередньо на поверхні покриття (рис. 4.6, а, рис. 4.8). Наявність в зламі областей розшарування з сильною фрагментацією ділянок розшарування свідчить про те, що в таких ділянках є внутрішні низькоміцні кордони розділу, сформовані, мабуть, в умовах АЗ.

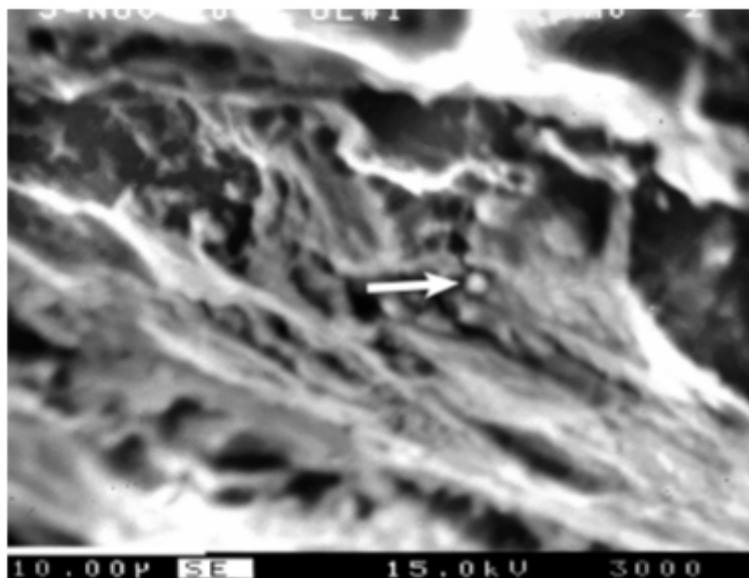


Рис. 4.13 Виділення, які виявляються в поверхні руйнування області зони I (рис. 4.6, а), утвореної за механізмом розшарування.

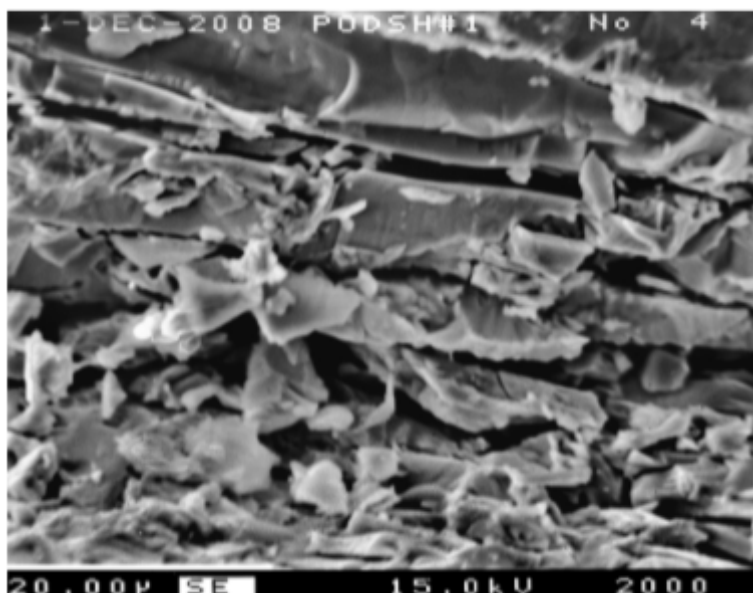


Рис. 4.14 Мікрорельєф зламу області в зоні I (рис. 4.6, а), обумовлений розшаруванням в поєднанні з диспергуванням.

Різниця в мікробудові зламів виділених двох зон в приповерхневої області зразка можна пояснити особливостями мікроструктури, що утворюється в процесі АЗ. У розглянутих умовах на її формування в цілому впливає як зміна напруженого стану по товщині покриття, так і наявність вихідного макрорельєфа на поверхні, що обумовлює в цілому сильну неоднорідність деформації.

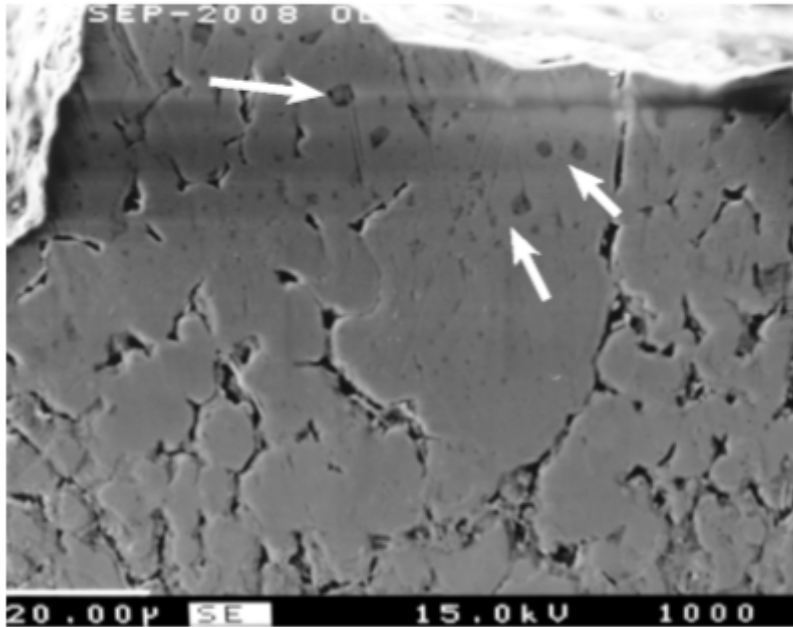


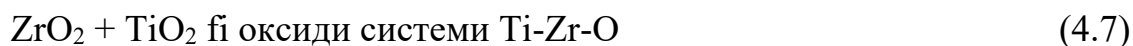
Рис. 4.15 Мікроструктура поперечного перерізу приповерхневої зони І (рис. 4.6, а) з високою щільністю виділень (вказані стрілками)

Результати аналізів зміни мікроструктури та механізму руйнування по товщині комбінованого покриття призводять до наступних висновків. Наявність в першій зоні зламу елементів відколу і виявлення сходинок свідчить про те, що розшарування по площинах ковзання проходить в поєднанні з істинно крихким руйнуванням. Це можна пояснити сумарною дією декількох факторів, що впливають на структурний стан деформованого титану, і, в кінцевому підсумку, на його властивості міцності[32]. Відомо, що домішки Zr, O і Si, виявлені в досліджуваному поверхневому шарі, підвищують твердість титану. Крім того, в сформованій приповерхневій зоні є виділення, які можуть бути джерелами напруг, що також сприяє крихкості шару. Поряд з цим спостерігається значна деформація титану під дією

навантаження в процесі АЗ. При цьому пластична деформація супроводжується формуванням текстури і подрібненням елементів структури в приповерхневої області, що підтверджується аналізом мікробудови поверхні зламу зразка. Сукупність цих факторів може сприяти формуванню малопластичних (тобто, з підвищеною твердістю) приповерхневого шару комбінованого покриття.

4.1.3 Формування поліоксидного шару на поверхні покриттів в процесі абразивного зношування

Для дослідження формування поліоксидних шарів в процесі АЗ вивчено зміна складу поверхні покриття шляхом пошарового кількісного ожеспектрального аналізу вихідної поверхні ЕІЛ-покриття (рис. 4.16, а), комбінованого (ЕІЛ + ЛОімп.) - покриття ЦЛАБ-2 / ВТ3-1 до АЗ (рис. 4.16, б) і комбінованого (ЕІЛ + ЛОнепр.) - покриття ЦЛАБ-2 / ВТ1-0 після АЗ (рис. 4.17). Аналіз отриманих залежностей вказує на формування в процесі АЗ нанорозмірного поліоксидного шару змінного по товщині складу. Найбільш ймовірні компоненти поліоксидного шару на поверхні електроіскрового і комбінованого покриттів утворюються в результаті окислення легуючих компонентів і матеріалу підкладки (Ti) в зоні трибоконтакту за таких реакцій:



В рівноважних умовах реакції (4.1), (4.2) протікають при $T \leq 750 \text{ C}$ і $\geq 750 \text{ C}$, відповідно. При механоактивуючому трибовпливу на поверхню окислення може відбуватися при значно менших температурах.

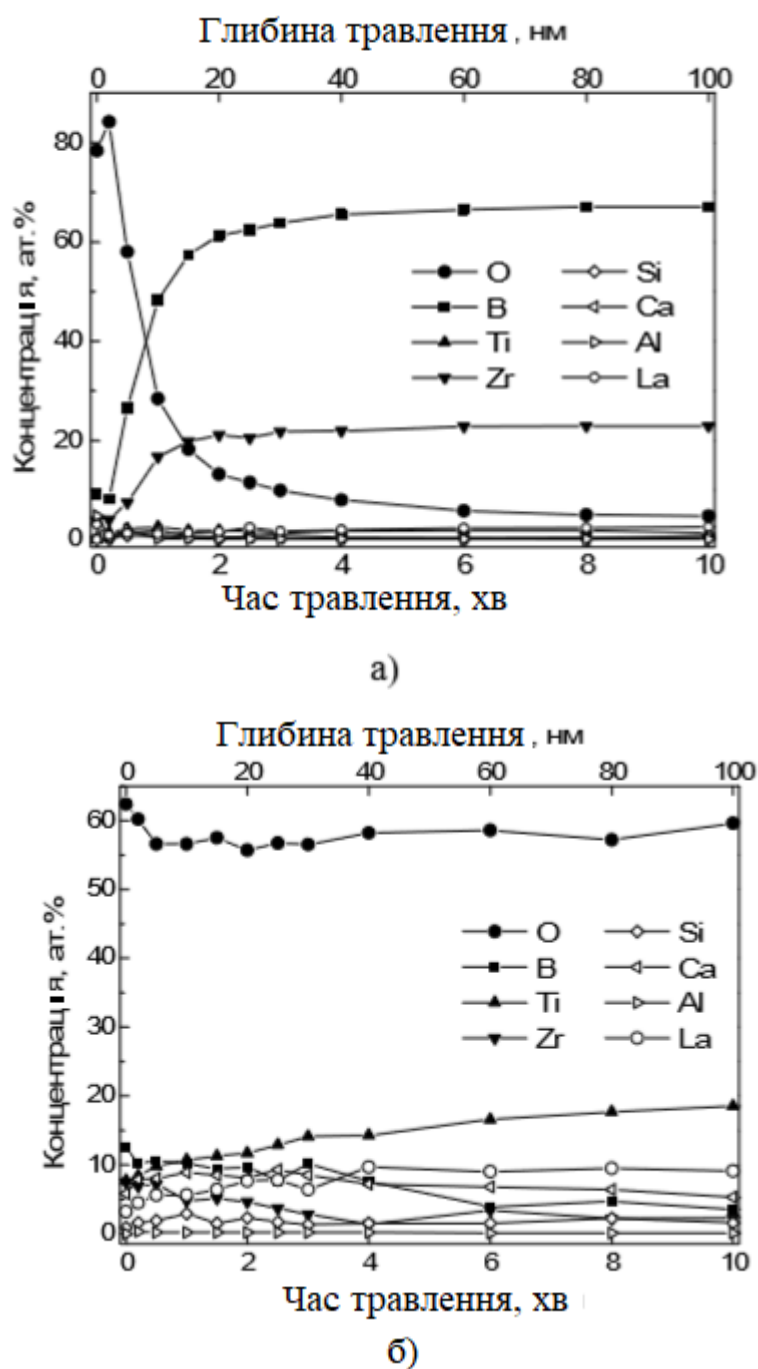


Рис. 4.16 Концентраційні профілі елементів вихідної поверхні покриття: а - ЕІЛ; б - (ЕІЛ + ЛОімп.).

Основна зміна елементного складу по товщині поверхневого шару глобули вихідного ЕІЛ-покриття відбувається на глибині до 15 нм (рис. 4.16, а). Різке збільшення кількості кисню (до 85 ат.%) В напрямку до зовнішньої поверхні при наявності бору і цирконію вказує на те, що в поверхневому шарі вихідного покриття (≈ 15 нм) присутні в основному оксиди бору і

цирконію, що утворюються внаслідок окислення по реакціях (4.1) - (4.3) в процесі ЕІЛ на повітрі.

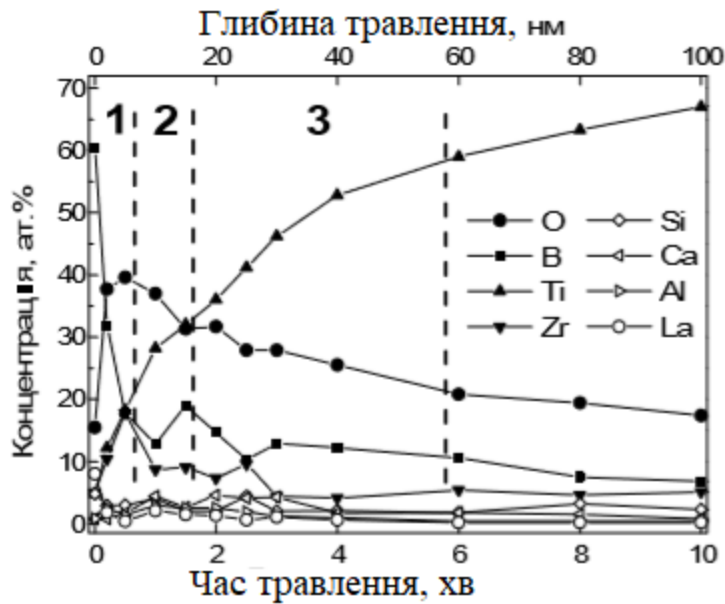


Рис. 4.17 Концентраційні профілі елементів зношеної поверхні доріжки оплавлення (ЕІЛ + ЛОнепр.) - покриття після АЗ.

Це узгоджується з сучасною моделлю окислення дибориду перехідних металів IV групи[29], згідно з якою при їх окисленні утворюється оксид бору, що містить зерна діоксиду відповідного металу. На глибині > 15 нм вміст кисню різко зменшується (≈ 10 ат.%), а бору і цирконію - стабілізується на рівні 65 і 20 ат.%, Відповідно, що відповідає присутності основної фази покриття - диборида цирконію. Незначний вміст титану в покритті ($\sim 1,9$ ат.%) Пов'язано з його дифузійним масопереносом з підкладки. Ca і Al знаходяться в вигляді домішок на рівні 0,6 і 0,1 ат.%, Відповідно. Таким чином, вихідна поверхня ЕІЛ-покриття на глибині ≈ 15 нм являє собою оксид бору, що містить оксид цирконію в присутності незначних кількостей оксидів лантану і кремнію (рис. 4.16, а). Після лазерного оплавлення ЕІЛ-покриття на повітрі в поверхневому шарі різко зростає вміст кисню і титану (рис. 4.16, б), це свідчить про перемішування легуючих компонентів з матеріалом основи і глибоке проникнення кисню з утворенням оксидного шару завтовшки > 100 нм.

Зіставлення рентгенофазового (рис. 4.7) і оже-аналізів (рис. 4.16, б) призводить до висновку про те, що вихідна поверхня комбінованого покриття являє собою шар змінного складу, в якому зовнішня частина товщиною до декількох сотень нанометрів, збагачена оксидами титану-цирконію і лантану, плавно (на глибину до декількох десятків мікрометрів і вище) переходить в твердий розчин Ti (Zr) з залишками непрореагованого ZrB_2 і відповідних оксидних фаз. Розподіл елементів по глибині зношеної поверхні доріжки ЛО комбінованого покриття після АЗ (рис. 4.17) істотно відрізняється від вихідної поверхні електроіскрового і комбінованого покриттів (рис. 4.16). На зношеній поверхні формується тришарова поліоксидна градієнтна плівка змінного складу товщиною ~ 60 нм: 1 - зовнішній шар ~ 5 нм; 2 - проміжний шар ~ 15 нм; 3 - внутрішній шар, що примикає до основи, товщиною ~ 40 нм. В процесі АЗ комбінованого покриття на поверхні зносу, згідно реакцій окислення, можливе утворення боросилікатні фази на основі оксиду бору, діоксиду цирконію та оксидних фаз титану. При цьому у зв'язку зі зниженням вмісту кисню по глибині, в зовнішньому шарі, очевидно, переважають вищі, а в більш глибоких шарах - нижчі оксиди титану. У табл. 4.1 представлені результати оцінки співвідношення основних фазових складових покриттів до і після АЗ, отримані з аналізу концентраційних профілів елементів (рис. 4.16, рис. 4.17). Виділено дві основні фазові складові поліоксидного шару - тугоплавка тверда оксидна матриця (ТОМ), що включає оксиди титану, цирконію, лантану, алюмінію з високими значеннями твердості H_m (~ 6 , ~ 12 , ~ 6 , ~ 20 ГПа) і температури плавлення $t_{пл.}$ (~ 1800 , ~ 2700 , ~ 2200 , ~ 2050 °C), і легкоплавка м'яка боросилікатного фаза (БСФ) на основі аморфного B_2O_3 ($T_{розм'якшити.} = 300 - 700$ °C, $H_m = 1,5$ ГПа). Основою зовнішнього нанорозмірного поліоксидного шару вихідного ЕІЛ-покриття, що утворюється в процесі окислення при нанесенні на повітрі, є БСФ (~ 60 об.%), Тоді як основу зовнішнього наношара (ЕІЛ + ЛОнепр.) - покриття

становить ТОМ (~ 46 об.%). Можна припустити, що в разі АЗ ЕІЛ-покриття формується нанорозмірний поліоксидний шар на основі БСФ, зміцненої твердими включеннями оксидів Zr, Ti і Al, а в разі комбінованого покриття - поліоксидний шар на основі ТОМ, в якій БСФ грає роль сполучної у вигляді міжзернового прошарку в твердій матриці.

Таблиця 4.1 Співвідношення фаз (об.%) На поверхні покриттів ЦЛАБ-2 на титановому сплаві до і після АЗ (на глибині $h = 5$ нм)

Покриття	Тверда оксидна матриця(ТОМ), об. %	Боросилікатна фаза (БСФ), об. %	Інші фази, об. %	S, об. %
ЕІЛ (глобула до АЗ)	4,10 TiO ₂ 0,98 Ti ₂ O 16,49 ZrO ₂ 6,75 La ₂ O ₃ 3,14 CaO 3,47 Al ₂ O ₃ (S = 34,94)	57,65 B ₂ O ₃ 2,45 SiO ₂ (S = 60,10)	4,96 ZrB ₂ (S = 4,96)	100,0
ЕІЛ+ЛО _{імп.} (дорожка ЛО до АЗ)	5,20 TiO ₂ 11,76 Ti ₂ O 16,67 ZrO ₂ 17,57 La ₂ O ₃ 16,69 CaO 0,32 Al ₂ O ₃ (S = 68,21)	25,09 B ₂ O ₃ 5,40 SiO ₂ (S = 30,49)	— —	98,7
ЕІЛ+ЛО _{непр.} (дорожка ЛО після АЗ)	11,0 TiO ₂ 6,91 Ti ₂ O 21,35 ZrO ₂ 1,19 La ₂ O ₃ 3,79 CaO 2,39 Al ₂ O ₃ (S = 46,64)	5,29 B ₂ O ₃ 10,88 SiO ₂ (S = 16,16)	9,59 ZrB ₂ 6,65 Zr _{0,5} Ti _{0,5} B ₂ 10,61 Ti 9,34 Zr 1,01 B (S = 37,20)	100,0

(ЕІЛ + ЛО_{непр.}) - покриття становить ТОМ (~ 46 об.%). Грунтуючись на моделі Parthasarathy, можна припустити, що в разі АЗ ЕІЛ-покриття формується нанорозмірний поліоксидний шар на основі БСФ, зміцненої твердими включеннями оксидів Zr, Ti і Al, а в разі комбінованого покриття - поліоксидний шар на основі ТОМ, в якій БСФ грає роль сполучної у вигляді міжзернового прошарку в твердій матриці. Таким чином, можна зробити

наступний висновок. Зношування нежорстким закріпленим абразивом на повітрі лазерно-електроіскрового покриття, яке містить ZrB_2 на титані призводить до інтенсивних фазових перетворень і трибоокисленню в зоні контакту «абразивна частка SiO_2 - покриття» з утворенням поліоксидного шару завтовшки ~ 60 нм, що представляє собою тришарову градієнтну плівку змінного складу. Зовнішній шар поліоксидного шару являє собою фазу на основі оксиду бору, що підтверджується спектрами вторинної іонної маспектрометрії, що містять іони (в порядку убутання): O^+ , B^+ , Ti^+ , TiO^+ , TiO_2^+ , TiO_3^+ , TiO_4^+ , Zr^+ , Zr_2O^+ , Si_2^+ , SiO^+ , Si_2O^+ , SiO_2^+ , La^+ , LaO^+ , $La_2SiO_2^+$, Al^+ .

4.1.4 Кінетика і механізм абразивного зношування покриттів

Вивчено кінетику абразивного зношування електроіскрових і комбінованих покриттів, які містять ZrB_2 . Склади електродних матеріалів і схеми нанесення покриттів наведені в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 Склад електродних матеріалів і схеми нанесення покриттів на сплав ВТ-20

Матеріал електроду	Склад електроду	Сумарний зміст твердих фаз $SC_{тв.ф.}$, об. % (ZrB_2 , LaB_6 , SiC , WC)	Зміст боридної фази C , об. %		Схема нанесення ($t_{ЭИЛ} =$ 7 мин/см ²)
			ZrB_2	TiB_2	
Сплав ВТ-20, без покриття					
ВКЗ	$WC + 3\% Co$	94,8	—	—	ЕІЛ
ТХБФ	$(Ti, Cr)B_2, FeCr$	—	—	80,32	те ж
ЦЛАБ-1	$LaB_6, ZrB_2, NiCr$	86,66	27,47	—	— " —
ЦБСАН	$AlN, ZrB_2, ZrSi_2$	29,96	29,96	—	— " —
ЦЛАБ-3	$ZrB_2, LaB_6, SiC, ZrSi_2$	83,98	41,19	—	— " —
ЦЛАБ-3	$ZrB_2, LaB_6, SiC, ZrSi_2$	83,98	41,19	—	— " — *
ЦЛАБ-3	$ZrB_2, LaB_6, SiC, ZrSi_2$	83,98	41,19	—	ЕІЛ + $ЛО_{imp}$ (на повітрі)
ЦЛАБ-2	$ZrB_2, LaB_6, ZrSi_2$	76,96	59,24	—	ЕІЛ
ЦЛАБ-2	$ZrB_2, LaB_6, ZrSi_2$	76,96	59,24	—	ЕІЛ + $ЛО_{imp}^{**}$ (в Ar)

* $t = 2 \text{ хв /см}^2$;

** на сплаві ВТ1-0.

На рис. 4.18 представлені залежності інтенсивності зношування (I) ЕІЛ-покриттів на сплаві ВТ-20 від шляху (L) / часу (t) процесу для різних складів матеріалу електроду, часу (t) і способу нанесення покриттів. Для порівняння такі ж залежності отримані для титанового сплаву ВТ-20 без покриття і для ЕІЛ-покриття $WC + 3\% Co$. Вибір електродного матеріалу ВКЗ обумовлений найвищою абразивною зносостійкістю низькокобальтового сплаву в ряду твердих сплавів $WC-Co$ [20]. Отримані трьохстадійні кінетичні залежності I (L, t) є типовими для тертя ковзання[33] і відображають зміну стану поліоксидного шару в контактній зоні «абразивна частка - поверхня покриття» в процесі абразивного зношування.

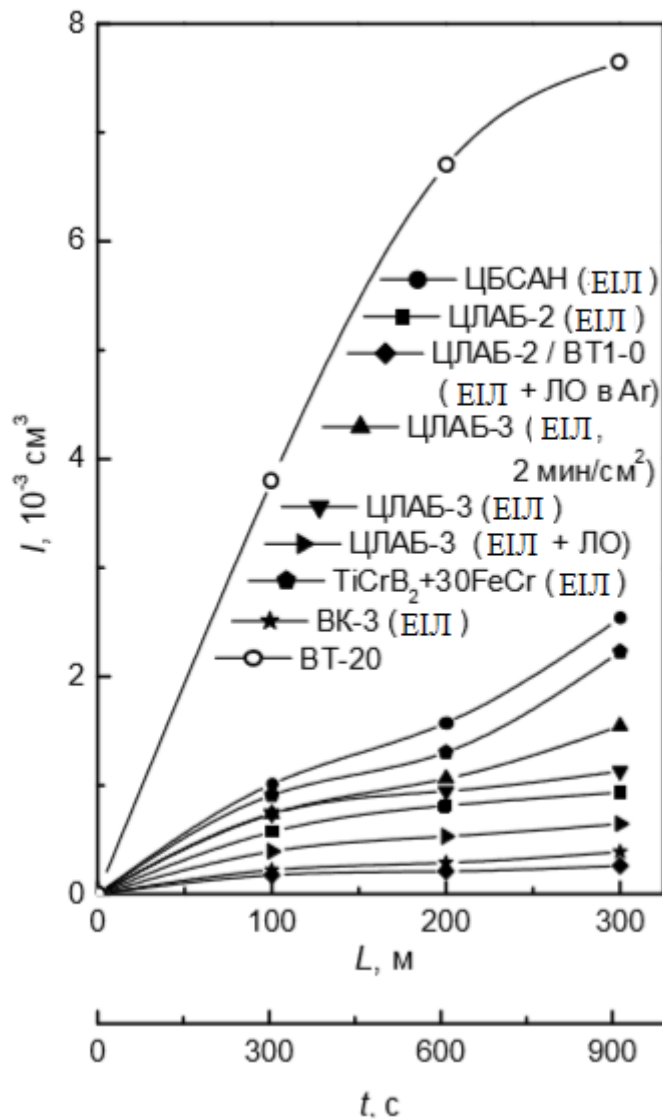


Рис. 4.18 Кінетичні залежності абразивного зношування покриттів ($P = 44.1 \text{ Н}$; $t = 7 \text{ хв} / \text{см}^2$)

Перша стадія кінетики зношування ($L \leq 100 \text{ м}$) являє собою жорсткий режим зношування, відповідний формуванню поліоксидного шару (етап підробітки). На цій стадії швидкість зносу поверхні, яка визначається як $\tan \alpha = I / L$ (τ), найбільша для непокритого сплаву ВТ-20 (рис. 4.8) і знижується для ЕІЛ-покриттів в ряду ЦБСАН - ЦЛАБ-3 - ЦЛАБ-2 в міру збільшення об'ємного змісту ZrB_2 в матеріалі легуючого електрода (табл. 4.3), відповідно, і в складі покриття. Значення L , відповідне переходу «жорсткий знос в слабкий знос», для вихідного сплаву ВТ-20 без покриття ($\sim 200 \text{ м}$) вдвічі більше, ніж для покриттів ($\sim 100 \text{ м}$). Це вказує на те, що швидкість

формування поліоксидного шару на поверхні покриття вище, ніж на титановому сплаві без покриття. На II стадії процесу ($100 \text{ м} \leq L \leq 200\text{-}300 \text{ м}$), що відповідає режиму слабкого зносу, швидкість зношування покриттів різко зменшується (табл. 4.3), що відповідає стабільній фазі сформованого поліоксидного шару. Зберігається той же ряд зменшення як швидкості, так і величини зносу в міру збільшення об'ємного змісту ZrB_2 в матеріалі електрода (рис. 4.18, табл. 4.3). У тому ж напрямку зростає тривалість другої стадії. III стадія процесу ($L \geq 200\text{-}300 \text{ м}$) характеризується різким збільшенням інтенсивності зношування ЕІЛ-покриттів ЦБСАН, ТХБФ і ЦЛАБ-3 в результаті зносу покриттів і видалення поліоксидного шару. При цьому як величина, так і швидкість зносу зменшуються в ряду покриттів: ЦБСАН - ЦЛАБ-3 - ЦЛАБ-2 (рис. 4.18, табл. 4.3), як це мало місце на I і II стадіях. Результати (рис. 4.18) показують, що найбільшу зносостійкість покриттів забезпечує електродний матеріал ЦЛАБ-2. Така ж концентраційна залежність величини зносу виявлена раніше для цих покриттів на алюмінієвому сплаві АЛ25 (рис. 4.19). При цьому інтенсивність зношування сплавів АЛ25 і ВТ-20 зменшується, відповідно, в 3-4 і 5-7 разів у порівнянні зі сплавом без покриття. Крім позитивного впливу ZrB_2 , зменшення величини зносу сприяє збільшення часу ЕІЛ (рис. 4.18, ЦЛАБ-3: $t_{\text{ЕІЛ}} = 2 \text{ і } 7 \text{ хв} / \text{см}^2$) за рахунок підвищення товщини покриття. Однак в значно більшому ступені інтенсивність зношування зменшується після ЛО покриття

(рис. 4.18, ЦЛАБ-2 і ЦЛАБ-3) - на 75%.

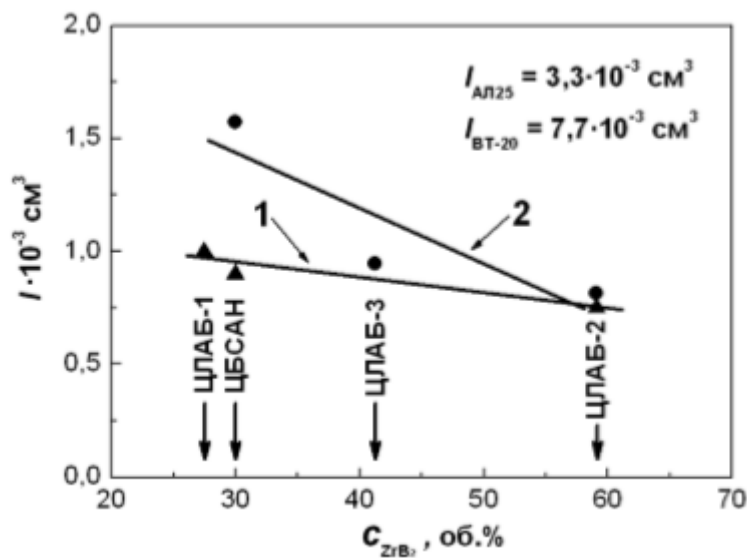


Рис. 4.19 Залежність абразивного зносу ЕІЛ-покриттів на сплавах АЛ25 (1) і ВТ-20 (2) від вмісту ZrB_2 в електродних матеріалах ($L = 200$ м, $P = 44.1$ Н)

Вплив навантаження (P) на інтенсивність зношування покриття неоднозначний (табл. 4.3). З ростом P абразивний знос покриттів ЦЛАБ-2 і ЦБСАН збільшується, але для всіх покриттів, отриманих з використанням електрода ЦЛАБ-3, що містить карбід кремнію, він зменшується. Добавка SiC , який окислюється з утворенням SiO_2 в процесі тертя при підвищеному навантаженні, надає зміцнюючий вплив на БСФ. Найбільше зниження зносу з ростом навантаження спостерігається для комбінованого покриття ЦЛАБ-3. Його зносостійкість в 5 разів вище, ніж зносостійкість ЕІЛ-покриття $WC + 3\% Co$ при $P = 84,2$ Н (табл. 4.3). Трьохстадійна кінетика процесу зношування (рис. 4.18) і окислення поверхні зносу покриттів (рис. 4.2, в; рис. 4.7, б; рис. 4.1, б) підтверджують формування зносостійкої плівки в контактній зоні «абразивний частка - поверхня покриття» в процесі ковзання абразивних частинок по поверхні.

Таблиця 4.3 Параметри зношування ЕІЛ-покриттів ($t_{\text{ЕІЛ}} = 7 \text{ хв} / \text{см}^2$) на сплаві ВТ-20

Матеріал покриття	Склад ZrB_2 (об.%)	Швидкість зношування, $- 10^{-3} \text{ см}^3/\text{мин}$			Абразивний знос $I - 10^{-3} \text{ см}^3 (L = 50 \text{ м})$	
		$L \leq 100 \text{ м}$	$100 \text{ м} \leq L \leq 200 \text{ м}$	$200 \text{ м} \leq L \leq 300 \text{ м}$	$P = 44.1 \text{ Н}$	$P = 84.2 \text{ Н}$
ЦБСАН	29,96	0,198	0,1100	0,189	0,55	1,03
ЦЛАБ-3*	41,19	0,145	0,0633	0,0949	0,40	0,30
ЦЛАБ-3	41,19	0,145	0,0407	0,0361	0,40	0,14
ЦЛАБ-2	59,24	0,112	0,0477	0,0239	0,32	0,54
ЦЛАБ-3**	41,19	0,0771	0,0272	0,0227	0,22	0,023
ЦЛАБ-2***	59,24	0,0341	0,0068	0,0102	0,10	
ВКЗ	—	0,0433	0,0131	0,0197	0,13	0,12

* $t_{\text{ЕІЛ}} = 2 \text{ хв} / \text{см}^2$;

** ЕІЛ + ЛО_{имп.} (на повітрі);

*** ЕІЛ + ЛО_{непр.} (в Аг) на сплаві ВТ1-0.

4.1.5 Залежність абразивної зносостійкості покриттів від об'ємного вмісту ZrB_2 в матеріалі електрода

Відомо[20], що в разі нежорстко закріпленого абразиву інтенсивність абразивного зношування (I) двокомпонентних композиційних матеріалів системи «тверда фаза-металева зв'язка» залежить від розміру зерна (d) і об'ємного вмісту твердої фази (W). Ця залежність виражається формулою[24]

$$I = K d l / 2 / W, \quad (4.8)$$

де K - коефіцієнт, що враховує структурні дефекти поверхні покриття. У нашому випадку композиційної кераміки за участю декількох твердих фаз, сумарне об'ємне зміст твердих фаз (ZrB_2 , LaB_2 , SiC) в матеріалі електрода (відповідно, і в складі покриття) збільшується в ряду: ЦБСАН-ЦЛАБ-2-ЦЛАБ-3-ЦЛАБ-1 (табл. 4.2). Мікротвердість цих фаз має близькі величини в діапазоні 27-28 ГПа. Беручи до уваги однаковий розмір зерна в матеріалі

електрода (2-3 мкм), можна припустити, згідно з формулою (4.8), що найбільшу зносостійкість має мати покриття з матеріалу ЦЛАБ-3 з максимальним сумарним вмістом твердих фаз. Але реально, відповідно до отриманих результатів (рис. 4.18, рис. 4.19), зазначений вище ряд не збігається зі збільшенням зносостійкості покриттів. Знос зменшується з ростом об'ємного змісту ZrB_2 в матеріалі електрода в ряду: ЦЛАБ-1-ЦБСАН-ЦЛАБ-3-ЦЛАБ-2. Це призводить до висновку про те, що в разі композиційної кераміки з декількома твердофазними компонентами величина W у формулі (4.8) повинна відповідати об'ємному вмісту ($W \phi$) тієї твердої фази, яка грає домінуючу роль в загальному ефекті зменшення зносу. Тоді формула (4.8) набуває вигляду

$$I = K d l / 2 / W \phi. \quad (4.9)$$

Може бути кілька причин позитивного впливу ZrB_2 на зносостійкість покриттів. Одна з них пов'язана з механічною міцністю матеріалу, що визначає опір поверхні деформування, який виникає в результаті силових і температурних впливів в процесі зношування. На прикладі системи B_4C-VB_2 була показана пряма кореляція величини абразивного зносу з контактною і мікроструктурною міцністю кераміки. Модуль пружності (E), що є однією з характеристик міцності матеріалу, виявляється найбільшим у ZrB_2 в порівнянні з іншими твердими фазами легуючого композиту: $E_{ZrB_2} = 496$ ГПа, $E_{\beta-SiC} = 432$ ГПа, $E_{LaB_6} = 398$ ГПа. Для металів і сплавів в умовах жорстко закріпленого абразиву існує пряма пропорційна залежність між величиною E і стійкістю до абразивного зношування. Можливо, ця залежність зберігається і в разі керамік, що підтверджується результатами роботи. Тому абразивний знос зменшується з ростом вмісту в покритті диборида цирконію, що володіє найбільшим модулем пружності. Іншою причиною зниження зносу є збільшення частки поверхні, покритої поліоксидним шаром (з ростом змісту ZrB_2) за рахунок збільшення кількості фази B_2O_3 , а також частки складних оксидів системи $Ti-Zr-O$, що

утворюються, за даними РФА (рис. 4.1, б), на зношеній поверхні ЕІЛ-покриття по реакціях (4.1), (4.2), (4.6), (4.7). Згідно з експериментальними результатами роботи, сумарний об'ємний знос зменшується зі збільшенням швидкості спікання оксидних частинок в поліоксидном шарі, яка визначається швидкістю дифузії кисню в оксиді. У складних оксидах системи Ti-Zr-O дифузія кисню повинна бути вище, ніж в діоксидах TiO_2 і ZrO_2 за рахунок зв'язків Ti-Zr, які ослаблюють міжатомну взаємодію «метал-кисень». З цих позицій збільшення частки складних оксидів у складі поліоксидного шару з ростом об'ємного змісту ZrB_2 в матеріалі електрода має сприяти підвищенню зносостійкості покриттів (рис. 4.18, рис. 4.19). ЕІЛ-покриття з матеріалу ТХБФ на основі TiCrB_2 в 1,6 рази поступаються за абразивної зносостійкістю покриттям, які містять ZrB_2 (рис. 4.18), незважаючи на підвищений вміст в них боридних фази (80,32 об.%), Більш високі модуль пружності TiCrB_2 (~ 520 ГПа) і твердість (32 ГПа) в порівнянні з ZrB_2 (496 і 28 ГПа відповідно). Причиною цього може бути утворення ZrO_2 в складі поліоксидного шару покриттів, які містять ZrB_2 , на відміну від поліоксидних фаз TiO_x ($x \leq 2$) з різним коефіцієнтом піллінгу-Бедвордса в покриттях, які містять TiB_2 , що знижують рівень захисних властивостей поверхні. Окислення поверхні зносу і трьохстадійний характер кінетики зношування свідчать про формування поліоксидного шару в процесі зношування. Тому для композиційних керамік в формулу (4.9) необхідно було б ввести коефіцієнт r , що враховує швидкість формування поліоксидного шару:

$$I = K d l / 2 / (r W \phi). \quad (4.10)$$

Отримані результати показують перспективність розроблених нових керамічних композитів на основі ZrB_2 , що забезпечують отримання покриттів з підвищеною зносостійкістю в порівнянні з покриттями, які містять TiB_2 і з покриттями з вольфрамових твердих сплавів при підвищених навантажено-швидкісних параметрах. Аналіз властивостей поверхонь зносу і складу

поліоксидних шарів, що утворюються в процесі АЗ покриттів, які містять ZrB_2 на титанових сплавах (пп. 4.1.1-4.1.3) призводить до висновку, що основним механізмом зношування ЕІЛ-покриттів при АЗ є крихке руйнування, комбінованих - пластичне деформування, при цьому в обох випадках має місце окислювальний знос. Причиною збільшення зносостійкості ЕІЛ-покриттів з ростом об'ємного змісту ZrB_2 в матеріалі електрода є збільшення частки поверхні, покритої поліоксидним шаром, за рахунок збільшення кількості склоподібної БСФ, що грає роль твердого змащення. Підвищення в 4 рази зносостійкості комбінованого покриття в порівнянні з електроіскровим обумовлено зниженням втрат на крихке руйнування при зношуванні за рахунок збільшення пластичності, а також формуванням поліоксидного шару у вигляді ТОМ на основі складних оксидів системи Ti-Zr-O, що забезпечують більш високий рівень фізико-механічних властивостей і більшу міцність зчеплення з Ті сплавом (підкладкою) в порівнянні з БСФ. З ростом навантаження для матеріалу ЦЛАБ-3 (відмінного від ЦЛАБ-2 добавкою SiC), проявляється ефект зниження інтенсивності АЗ за рахунок збільшення в поліоксидном шарі змісту SiO_2 , що підвищує фізико-механічні властивості БСФ.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Мета розділу - рішення і огляд таких питань:

- забезпечення безпечних та здорових умов праці;
- безпечної роботи устаткування;
- пожежної безпеки на об'єкті;
- відсутності травматизму на підприємстві;
- створення безпечних і нешкідливих умов праці.

5.1 Аналіз шкідливих та небезпечний факторів

При електроіскровому легуванні мають місце наступні небезпечні та шкідливі фактори:

- небезпечний рівень напруги в електричних ланцюгах;
- пожежонебезпека;
- підвищений рівень шуму та вібрації;
- підвищений рівень запиленості.

Основними причинами враження електричним струмом є доторкання до струмоведучих частин, що знаходяться під напругою в робочому режимі.

Джерелом можливого враження електричним струмом є основне технологічне обладнання, до якого прикладена напруга 1500В (в режимі іонного очищення) та 300В (в режимі нанесення покриття) постійного

струму, та електрообладнання, напруга живлення якого 380В змінного струму.

Попереднє знежирення інструмента передбачає використання бензину, ацетону та спирту.

В повітрі робочої зони будуть присутні шкідливі пари цих речовин, які викликають алергічні захворювання в виробничих умовах.

Гранично допустимі концентрації: бензину 100 мг/м³, ацетону 200 мг/м³, спирту 1000 мг/м³.

В процесі нанесення покриття інструмент нагрівається до високих температур 100-150°C . Після нанесення покриття інструмент охолоджується з камерою до температури 50-70°C. Потім оператор повинен дістати його для остаточного охолодження на повітрі, тому при таких умовах виникає небезпека отримати опік шкіри. Гранично допустима температура поверхонь 80°C.

5.2 Інженерні рішення для забезпечення безпеки технологічного процесу та запобігання дії шкідливих та небезпечний виробничих факторів

Для попередження дії цієї токсичної речовини передбачені:

- окреме приміщення для приготування розчинів та робіт з токсичними речовинами, яке обладнане загальною обмінною та місцевою витяжною, вентиляцією;
- місцева витяжна вентиляція на робочих місцях від вакуумної камери та витяжної шафи . Швидкість повітря в робочому перерізі місцевої вентиляції повинна бути не менша 0,6 м/с;

- очищення видаленого вентиляцією повітря, що забруднене шкідливими речовинами, для цього вентиляція оснащується фільтром для очищення повітря від пилу;

- світлова та звукова сигналізація, яка сповіщає про припинення роботи вентиляції;

Індивідуальні засоби захисту (респіратор фільтруючий універсальний РУ-60М).

Для попередження дії шуму та вібрації передбачене використання активних трубчастих глушників абсорбційного типу для облицювання звукопоглинаючими матеріалами внутрішньої поверхні повітропроводів (мінераловатні щити, $\alpha = 0,98$ при $f = 1000\text{Гц}$, $\delta = 30$ мм для глушіння шуму високих частот).

Для попередження враження електричним струмом:

- захист ізоляції зовнішньої електропроводки від термічних та механічних пошкоджень;

- установка ізоляційних огорожень, захисних кожухів. Прилади для відключення живлення у шафі керування та автоматичні вимикачі;

- надійне заземлення всіх струмоведучих частин обладнання, які мають бути під напругою;

- опір ізоляції між корпусом та підкладкотримачем (до якого прикладена напруга до 1500В постійного струму) 20МОм;

- опір між пристроєм заземлення і будь — якою металічною частиною установки, крім конструктивно ізольованих елементів, не більше 0,1 Ом.

Мікроклімат

Мікрокліматичні вологості, швидкості руху повітря в робочій зоні або в зоні обслуговування та на постійних робочих місцях, встановлені відповідним нормами.

Оптимальними (комфортно) мікрокліматичними умовами вважаються такі умови, при яких має місце найвища працездатність і хороше самопочуття. Допустимі умови передбачають можливість напруженої роботи механізму терморегуляції, яка не виходить за межі можливості організму, а також дискомфортні відчуття.

Допустимі норми температури, відносної вологості та швидкості руху повітря в робочій зоні виробничих приміщень повинні дотримуватись допустимі норми повітря всередині виробничих приміщень для теплого періоду року обов'язкові для всіх параметрів (середня температура о 13 год. найбільш теплого місяця) не перевищує $+25^{\circ}\text{C}$.

Параметри мікроклімату (ДСН 3.3.6.042-99) в таблиці 5.1

Незалежно від мікрокліматичних умов у робочій зоні виробничих приміщень вміст шкідливих речовини не повинен перевищувати ГДК.

Для поліпшення температурних параметрів, потрібно встановити ребристі батареї, не менше семи секцій на одну.

Таблиця 5.1 - Параметри мікроклімату на робочому місці

Холодний	Період	Категорія робіт	Енерговитрати, кКл/г.	Параметри						ІЧ випромінювання				Примітка
	Фактичні			Допустимі										
	W, °C			W, %	V, м/с	T, °C	W, %	V, м/с		Відстань до джерела, м.	Випромінювання, Вт/м².	Норма		
Пб				18	77	0,8	15-21	75	0,4		0,4	45	140	Система вентиляції 1.Місцевий відсмоктувач від камери 2.Водяне опалення

Вентиляція

Для електродугового напилення застосовуються місцева витяжна вентиляція. Вона дає змогу вловлювати шкідливі речовини безпосередньо у місцях їх виділення. Пристрої місцевої витяжної вентиляції поділяють на всмоктувачі відкритого та закритого типу.

В даному випадку застосовуємо місцеву витяжну вентиляцію у вигляді вентилуючої камери.

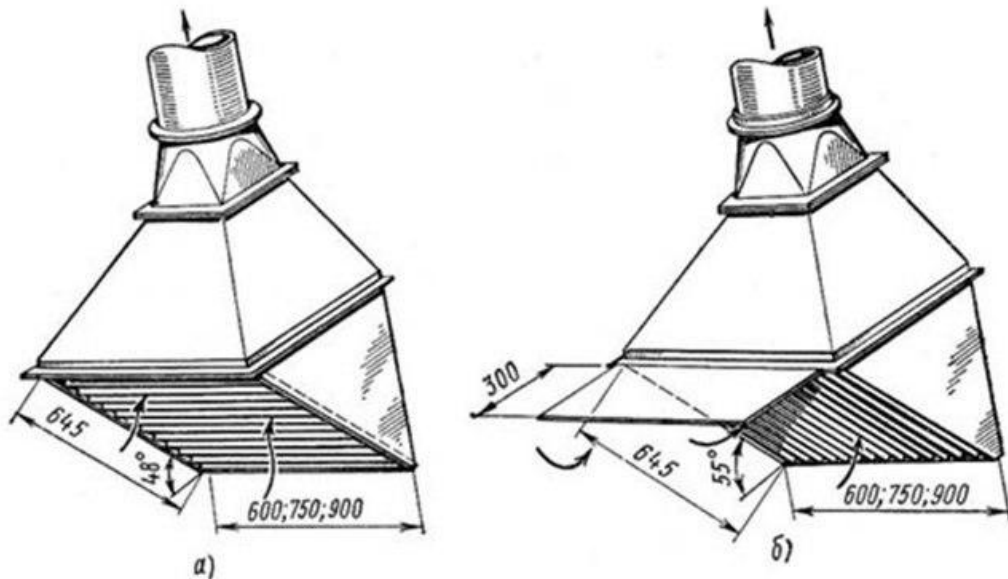


Рис. 5.1 Загальний вид вентиляючої камери

Освітлення

Освітлення повинно відповідати вимогам ДБН В.2.5-28-2006. Штучне освітлення передбачається у всіх виробничих та побутових приміщеннях для компенсації нестачі природного світла та для освітлення приміщень у темний період доби. Від того, наскільки кваліфіковано воно спроектоване залежить безпека праці та самопочуття працівників, продуктивність їхньої праці та якість продукції. Відомо, що раціонально виконане штучне освітлення приміщень при одній і тій же витраті електроенергії підвищує продуктивність праці на 15—20%. Разом з тим неправильно вибране та недостатнє освітлення робочих місць може бути причиною функціональних зорових порушень у працівників.

З метою оптимізації виробничого освітлення передбачають:

- * обмеження прямої блискучості за рахунок добору конструкції світильників;
- * очищення світильників, вікон від забруднень один раз на 3 місяці;

* фарбування стін титановими або цинковими білилами з високим коефіцієнтами відбивання для видимого світла за низьким коефіцієнтом для ультрафіолетових променів.

На нашому робочому місці створюються суміщене освітлення (штучне та природне - однобічне бокове).

Таблиця 5.2 - Технічні характеристики люмінісцентної лампи ЛД 100

Потужність, Вт.	Напруга мережі на лампі, В.	Світловий потік номінальне, лм.	Колірна температура, К
100	220	2340	4000

Шум, вібрація

Джерелами шуму на ділянці, що аналізується, є джерело живлення, вентилятори, та транспортно-технологічні пристрої. За часовою характеристикою шум є постійний (рівень звуку за 3 години роботи установки 68 дБ. Отже виробничий шум перевищує припустимий, тому проводиться захист. Для захисту від шуму передбачаємо використання активних трубчастих глушителів абсорбційного типу для облицювання звукопоглинаючим матеріалами (ЗПМ) внутрішню поверхню захисної камери $\alpha = 0,98$ при $f = 1000\text{Гц}$, $\delta = 80\text{мм}$ для глушіння шуму НЧ, δ — 30мм для шуму ВЧ. Для захисту від вібрації передбачаємо: віброізоляцію обладнання (віброізолюючі опори, тощо). Пасивна віброізоляція (віброізолювана підлога, підставки на робочих місцях). В результаті цих заходів рівень вібрації L знижується на 40% .

Умови праці згідно 3-ого класу III-го ступеня. Вплив електромагнітних полів джерелами електромагнітних полів є – зварювальний генератор трансформатор, струмовідводи, пристрої автоматики. Вони належать до вузлових груп антропогенних джерел електромагнітного випромінювання. Для захисту від ЕМП (ДСН 3.3.6.096-2002) застосовуємо екранування джерел випромінювання екранами з металевих листів; або сіток у вигляді замкнених камер, шаф або кожухів.

Значення напруженості електричного поля $E = 0,85 \text{ кВт/м}^2$ та магнітної $H = 100 \text{ А/м}$, поля не виходять за межі гранично допустимих $E \leq 1 \text{ кВт/м}^2$, $H = 1400 \text{ А/м}$, на частоті 50 Гц.

Заходи індивідуального захисту

Виріб та призначення засобів індивідуального захисту органів дихання повинні провадитися згідно з вимогами ГОСТ 12.4.034-85.

Для захисту рук необхідно застосовувати рукавиці згідно з ГОСТ 12.4.010-75.

Для зниження небезпеки ураження електричним струмом працюючі повинні забезпечуватися килимками згідно ГОСТ 4997-75, а також в умовах підвищеної небезпеки (обмежених просторах) – калошами згідно з ГОСТ 13385-78, рукавицями типу Ен та Ев згідно нормативно-технічної документації.

5.3 Вимоги безпеки в надзвичайних ситуаціях

Пожежна безпека

Згідно з НАПББ.03.002-2007 приміщення з точки зору вибухопожежної небезпеки належить до категорії Г (негорючі речовини й матеріали у гарячому, розжареному, розплавленому станах процеси обробки яких супроводжуються виділенням променистої теплоти, іскор, полум'я, горючі гази, рідини, тверді речовини, які спалюються чи утилізуються у вигляді палива).

У приміщенні виділяється (ДНАОП 0.00-1.21-98) зона П-Па, де обертаються тверді горючі речовини. Категорія за БЕМЗ (безпечний експериментальний максимальний зазор між фланцями оболонки, мм ПА ($>0,9$ мм). Група вибухобезпеки сумішей (за температурою самозапалювання/ ($T_1 / T_{C/V} > 450$ °C). Ступінь вогнестійкості будівлі - І (не допускається поширення вогню на основні будівельні конструкції) мінімально припустиме обмеження вогнестійкості — 2,5 год, максимально припустиме обмеження поширення вогню для внутрішніх стін. Категорія захисту від блискавки - І/СН 305-77/, від прямих ударів використовують блискавководи стержньові.

Пожежна безпека забезпечується:

- * запобіганням спалаху ізоляції при КЗ за рахунок максимального струменевого захисту;

- * запобіганням утворення горючого середовища за рахунок надійної герметизації обладнання, обмеженням застосування і

зберігання горючих і вибухонебезпечних речовин; застосуванням пожежної сигналізації з датчиком (ІДФ-І, ДПД і ін.); Застосовуємо

вогнегасники типу УО, ОП-ІОА (вибрати тип і кількість відповідно до НАПБ Б.03.002-2007).

Передбачається також аварійне стравлювання горючих газів із апаратури.

Рекомендована періодична очистка робочого місця цеху, апаратури від горючих відходів, відкладання пилу, вилучення пожежонебезпечних відходів виробництва, заміна ЛВЖ і ГЖ на пожежобезпечні технічні миючі засоби.

Передбачені пристрої, які забезпечують обмеження поширення пожежі.

Приміщення обладнується засобами колективного та індивідуального захисту людей від небезпечних факторів пожежі та протидимного захисту.

Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях

У випадку пробією електричної напруги на корпус зварювального агрегату необхідно відключити рубильник і довести до відома про це майстра або начальника дільниці.

У випадку потрапляння кого-небудь під напругу, необхідно відключити зварювальний агрегат від мережі, покласти потерпілого на дерев'яну поверхню, викликати лікаря за телефоном 103 і, якщо це необхідно, зробити пострадалому штучне дихання.

У випадку загорання пристрою для легування необхідно відключити рубильник і приступити до гасіння пожежі за допомогою вогнегасника.

Кожен робітник і службовець, що виявив пожежу або загорання, зобов'язаний:

- негайно сповістити про це в заводську пожежну охорону за телефоном 101;

- приступити до гасіння вогню пожежі наявними в цеху (на дільниці) засобами пожежогасіння (вогнегасник, пісок, пожежний кран тощо);

- викликати до місця пожежі посадових осіб (начальника цеху, дільниці).

У випадку одержання травми необхідно довести до відома про це майстра, начальника дільниці та звернутися в медпункт.

6 Розроблення стартап-проекту

Розділ магістерських дисертацій «Розроблення стартап-проекту» присвячено реалізації першого етапу розроблення стартап-проекту, а саме висвітленню маркетингових аспектів створення стартапу: відбору ідей, створенню концепції продукту, визначення перспектив ринкової реалізації проекту та розроблення маркетингової стратегії. Розділ є завершальною частиною магістерської дисертації і виконується у вигляді оцінювання можливостей та формування заходів із ринкового впровадження інноваційних пропозицій магістранта.

Метою розділу є формування інноваційного мислення, підприємницького духу та формування здатностей щодо оцінювання ринкових перспектив і можливостей комерціалізації основних науково-технічних розробок, сформованих у попередній частині магістерської дисертації у вигляді розроблення концепції стартап-проекту в умовах висококонкурентної ринкової економіки глобалізаційних процесів.

Завдання розділу полягає в маркетинговому аналізі перспектив реалізації запропонованих магістрантом науково-технічних рішень та пропозицій, оцінювання можливостей їх ринкового впровадження.

Опис ідеї проекту (товару, послуги, технології)

Таблиця 6.1 Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямок застосування	Вигоди для користувача
1	Авіація	1. Порівняно висока зносостійкість*. 2. Дуже висока жаростійкість.
2	Будівництво	
3	Військова техніка	

* порівняно з ВКЗ

Таблиця 6.2 Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	Мій Проект	(потенційні) товари/концепції конкурентів	W	N	S
1	Економічні	ZB ₂	BK3	-	-	+
2	Призначення (технічні)	Легування	Легування	-	+	-
3	Надійності	Більш суцільне покриття	Менш суцільне покриття	-	-	+
4	Технологічні			-	+	-
5	Ергономічні	Простий процес складання	Простий процес складання	-	+	-
6	Органолептичні			-	+	-
7	Естетичні	Добре	Добре	-	+	-
8	Транспортабельності	Легко	Легко	-	+	-
9	Екологічності	Шкідливі фактори	Шкідливі фактори	-	+	-
10	Безпеки			-	+	-

Таблиця 6.3 Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	5
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	1200
3	Динаміка ринку	Зростає
4	Наявність обмежень для входу	Немає
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	
6	Середня норма рентабельності в галузі %	70

Таблиця 6.4 Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
Нанесення зносостійкого, жароміцного покриття	Будівельні компанії, авіаційні заводи.	Замість дефіцитного, менш продуктивного ВКЗ	До виробу: якість покриття. До компанії: виготовлення продукції в строк

Таблиця 6.5 Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Якість	Неякісне покриття	Відмова

Таблиця 6.6 Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Економічність	Заміна ВКЗ на ZrB_2	Зварювальні матеріали дешевше
2	Якість	Підвищується абразивна зносостійкість	Зростає якість покриття

Таблиця 6.7 Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	ІПМ НАНУ ім. І.М.Францевича	Визначити фактори сили постачальників	Визначити фактори сили споживачів	Фактори загроз з боку замінників
Висновки:	+	+	-	-

Таблиця 6.8 Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Якість	Зносостійкість (порівняно з ВКЗ) вища у 1,3 рази, а у разі лазерного оплавлення у 4 рази
2	Економічність	Зварні матеріали дешевше

Таблиця 6.9 Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «назва проекту»

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з ПІМ НАНУ ім. І.М.Францевича						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Якість виробу	15	-	-	-	-	-	+	-
2	Економічність	13	-	-	-	-	+	-	-
3	Простота виготовлення		-	-	-	+	-	-	-

Таблиця 6.10 SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: економічність; якість	Слабкі сторони: немає
Можливості: дешевизна виробу	Загрози: не відповідність вимогам

Таблиця 6.11 Вибір цільових груп потенційних споживачів

Опис цільової потенційних клієнтів	профілю групи клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
Авіація		Висока	Низький	Низька	Висока

Таблиця 6.12 Визначення базової стратегії розвитку

Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
Якість	Висока	Середні	Дешевизна продукції

Таблиця 6.13 Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
Ні	Як шукати нових, так і забирати існуючих у конкурентів	Так. Пошук матеріалів	Дешевизна та якість продукції

Таблиця 6.14 Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
Зносо- та жаростійке покриття	Якість та дешевизна	Дешевизна, якість

Висновок: заміна порошку ВКЗ, який традиційно використовується при легуванні з метою отримання зносостійкого покриття на ZrB_2 є доцільною, оскільки знижує коштовність отриманого покриття та одночасно підвищує його якість (якщо проводити лазерне оплавлення, то у декілька разів).

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Була розроблена технологія електроіскрового легування на основі електродних матеріалів, що містять ZrB_2 для запобігання абразивного зношування. Дослідним шляхом були обрані оптимальні режими електроіскрового легування, була досліджена література по цій тематиці. На отриманих результатах досліджень були зроблені наступні висновки.

1. На поверхні ЕІЛ і (ЕІЛ + ЛО) покриттів, що містять ZrB_2 на Ti -сплавах в умовах АЗ на повітрі формується нанорозмірний поліоксидний шар, на основі чи склоподібної боросилікатної фази (БСФ) - в разі ЕІЛ, чи тугоплавкої оксидної матриці (ТОМ) на основі оксидів $Ti-Zr$ - в разі (ЕІЛ + ЛО) -покриття. Варіюванням складу матеріалу електрода і способу нанесення покриття можна управляти трибологічною поведінкою контакту.

2. В результаті ЛО ЕІЛ-покриття внаслідок структурно-фазових перетворень на поверхні відбувається зміна механізму АЗ від крихкого руйнування ЕІЛ-покриття до пластичного деформації - (ЕІЛ + ЛО). Ця зміна призводить до підвищення зносостійкості за рахунок зниження втрат на крихке руйнування і трансформації фазового складу нанорозмірного поліоксидного шару.

3. Зносостійкість корелює зі змістом фаз (ZrB_2 , SiC) в матеріалі електрода / покритті, які зміцнюють поліоксидний поверхневий шар, що збільшується при переході від ЕІЛ- до (ЕІЛ + ЛО) –покриття, незважаючи на зниження твердості (з 17 до $\sim 9,5$ ГПа), що в сукупності свідчить про домінуючий вплив цього шару на трибологічну поведінку контакту.

4. Показано, що провідними механізмами зношування ЕІЛ-покриттів є крихке руйнування і окислювальний механізм, для (ЕІЛ + ЛО) - пластичне деформування, окислювальний механізм і втомні процеси.

5. Після ЛО ЕІЛ-покриття зберігається двофазна структура сплаву ВТЗ-1 з подрібненим зерном і з'являється наноструктурована евтектика.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1]. - Снежков В. А. Восстановление эксплуатационных свойств деталей при капитальном ремонте / В. А. Снежков, Ю. В. Полоскин, Н. И. Лазаренко // Электронная обработка материалов. – 1977. – № 3. – Р. 83–86.
- [2]. - Износостойкость алюминиевого сплава с дискретными электроискровыми покрытиями / Е. К. Соловых, Б. А. Ляшенко, Э. К. Посвятенко [та ін.] // Проблеми тертя та зношування : Наук.-техн. зб. – К. : НАУ, 2006. – Вип. 46. – С. 160–168.
- [3]. - Паустовский А.В. Влияние импульсного лазерного излучения на структуру и свойства электроискровых покрытий из сплавов типа ВК и ТК / А. В. Паустовский, В. П. Ботвинко // Порошковая металлургия. – 1991. – № 2. – С. 55–57.
- [4]. - Защитные покрытия на жаропрочных никелевых сплавах (обзор) / И. А. Подчерняева, А. Д. Панасюк, М. А. Тепленко [и др.] // Порошковая металлургия. – 2000. – № 9/10. – С. 12–27.
- [5].- Ляшенко Б. А. Упрочняющие покрытия дискретной структуры / Б. А. Ляшенко, А. Я. Мовшович, А. И. Долматов // Наукоемкие технологии. Сер. Технологические системы. – 2001. – № 4. – С. 17–25.
- [6].- Электродные материалы для электроискрового легирования / [Верхотуров А. Д., Подчерняева И. А., Прядко Л. Ф., Егоров Ф. Ф.]. – М. : Наука, 1988. – 224 с.
- [7].- Плескач В. М. Электроискровое легирование твердыми сплавами Т15К10 и ВК8 с целью повышения износостойкости / В. М. Плескач, П. А. Аверченко // Электронная обработка материалов. – 1979. — № 2. – С. 37– 39.
- [8].- Исследование упрочнения сталей при локальном электроискровом нанесении карбидов переходных металлов / Г. А. Бовкун, З.

И. Владкова, В. Н. Моляр [и др.] // Электронная обработка материалов. – 1988. – № 1. – С. 10–12.

[9]. - Структурообразование и массоперенос износостойких покрытий при электроискровом легировании Al–Si сплавов композиционной керамикой системы LaB₆–ZrB₂ / И. А. Подчерняева, А. Д. Панасюк, С. С. Затуловский [и др.] // Сверхтвердые материалы. – 2003. – № 6. – С. 50–59

[10]. - Лазаренко Б. Р. Электроискровой способ изменения исходных свойств металлических поверхностей / Б. Р. Лазаренко, Н. И. Лазаренко. – М. : Изд-во АН СССР, 1958. – 117 с.

[11]. - Лазаренко Н. И. Электроискровое легирование металлических поверхностей / Н. И. Лазаренко, Б. Р. Лазаренко // Электронная обработка материалов. – 1977. – № 3. – С. 12–16.

[12]. - Верхотуров А. Д. Физико-химические основы эрозии материалов при электроискровом легировании / Верхотуров А. Д. – Владивосток : Институт машиноведения и металлургии ДВО АН СССР, 1991. – 67 с. – (Препринт / ДВО АН СССР, Институт машиноведения и металлургии).

[13]. - Месяц Г. А. Эктон – лавина электронов из металла / Г. А. Месяц // Успехи физических наук. – 1995. – Т. 165, № 6. – С. 601–626.

[14]. - Исследование температуры и состава плазмы при электроискровом легировании спектральным методом / В. Д. Алексанян, Б. К. Бобров, А. Д. Верхотуров [и др.] // Электрофизические и электрохимические методы обработки. – 1982. – № 1. – С. 9–10.

[15]. - Игнатенко И. П. Формирование поверхностного слоя при электроискровом легировании легкоплавкими металлами / И. П. Игнатенко,

А. Д. Верхотуров, М. З. Маркман // Электронная обработка материалов. – 1979. – № 3. – С. 18–20.

[16]. - Верхотуров А. Д. Формирование вторичной структуры на аноде в процессе электроискрового легирования / А. Д. Верхотуров, И. А. Подчерняева, // Электронная обработка материалов. – 1987. – № 1. – С. 26–

[17]. - . Верхотуров А. Д. Влияние схватывания электродов на эрозию анода в процессе электроискрового легирования / А. Д. Верхотуров // Электронная обработка материалов. – 1984. – № 6. – С. 22–26.

[18]. - Стойкость композитов В 4 С–VB2 при абразивном изнашивании и трении в паре со сталью / О. Н. Григорьев, Б. А. Галанов, В. А. Котенко [и др.] // Огнеупоры и техническая керамика. – 2005. – № 10. – С. 2–8.

[19]. - Богомолова Н. А. Практическая металлография / Н. А. Богомолова. – М. : Высш. школа, 1978. – 272 с.

[20]. - Формирование и свойства электроискровых покрытий на твёрдом сплаве ВК6 / И. А. Подчерняева, В. А. Лавренко, В. И. Березанская [и др.] // Порошковая металлургия. – 1994. – №11/12. – С. 19–24.

[21]. - Костецкий Б. И. Трение, смазка и износ в машинах / Б. И. Костецкий – К. : Техніка, 1970. – 396 с.

[22]. - Поверхностное модифицирование сплава АЛ9 при электроискровом легировании материалами системы $\text{AlN-Ti(Zr)B}_2\text{-Ti(Zr)Si}_2$ / И. А. Подчерняева, А. Д. Панасюк, В. В. Щепетов [и др.] // Порошковая металлургия. – 2004. – № 3/4. – С. 54–62.

[23]. - Патент 79775 Україна, МПК C04B 35/581, C04B 35/58, C22C 29/00. Керамічний електродний матеріал на основі нітриду алюмінію для електроіскрового легування алюмінію і його сплавів / Панасюк А. Д.,

Подчерняєва І. О., Варюхно В. В., Юречко Д. В., Уманський О. П., заявник і патентовласник Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М.Францевича НАНУ. – № 20041008518. – Заявл. 20.10.2004 ; опубл. 25.07.2007, Бюл. № 11.

[24]. - Патент 60724 А Україна, МПК С04В 35/58, С10М 103/00, С09К 3/14, F16N 15/00. Керамічний антифрикційний матеріал на основі дибориду цирконію / Панасюк А. Д., Григорьев О. М., Подчерняєва І. О., Щепетов В. В., Юречко Д. В., Тепленко М. А., заявник і патентовласник Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М.Францевича НАНУ. – № 2003021199. – Заявл. 11.02.2003 ; опубл. 15.10.2003, Бюл. № 10.

[25]. - Жаро- и износостойкие композиционные материалы и покрытия на основе $AlN-TiB_2$ / О. Н. Григорьев, И. А. Подчерняева, А. Д. Панасюк [и др.] // Новые огнеупоры. – 2004. – № 7. – С. 68–74.

[26]. - Патент 82157 Україна, МПК С04В 35/58, С04В 35/581, С04В 35/582, В22F 1/00. Композиційний антифрикційний жаростійкий матеріал для захисних покриттів / Подчерняєва І. О., Панасюк А. Д., Григорьев О. М., Панашенко В. М., Жигинас В. В., Лабунець В. Ф., заявник і патентовласник Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М.Францевича НАНУ. – № а200612636. – Заявл. 01.12.2006 ; опубл. 11.03.2008, Бюл. № 5.

[27]. - Патент 25933 Україна, МПК С22С 29/00. Композиційний зносостійкий матеріал на основі дибориду титану / Уманський А. П., Панасюк А. Д., Коновал В. П., Ігнатович С. Р., Дворник Є. П., Гулевець В. Д., заявник і патентовласник Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М.Францевича НАНУ. – № u200704682. – Заявл. 27.04.2007 ; опубл. 27.08.2007, Бюл. № 13.

[28]. - Беккерт М. Справочник по металлографическому травлению / М. Беккерт, Х. Клемм. – М. : Металлургия, 1979. – 336 с.

[29]. - Кульков С. Н. Особенности процессов изнашивания керамических и металлокерамических композитов в условиях высокоскоростного сухого скольжения по стали / С. Н. Кульков, Л. Н. Савченко, С. Ф. Гнюсов // Порошковая металлургия. — 2009. — № 1/2. — С. 36–45.

[30]. - Структура, текстура и механические свойства деформированных сплавов молибдена [Текст] / В. И. Трефилов, Ю. В. Мильман, Р. К. Иващенко ; ред. В. И. Трефилов. — Киев : Наукова думка, 1983. — 230 с.

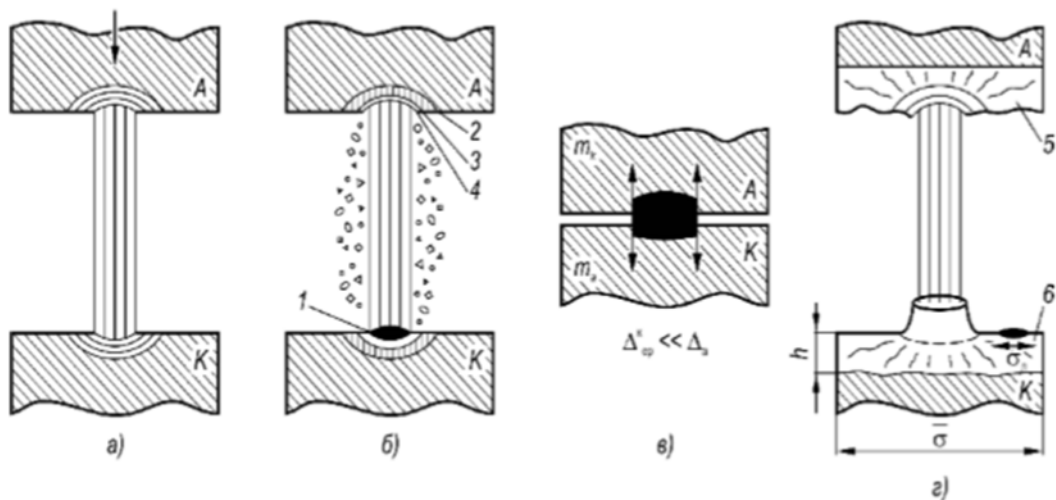
[31]. - Низкотемпературная деформация и разрушение объёмного наноструктурного титана, полученного интенсивной пластической деформацией с помощью равноканального углового прессования / В. З. Бенгус, Е. Д. Табачникова, В. Д. Нацик [и др.] // Физика низких температур. — 2002. — Т. 28, №11. — С. 1211–1226.

[32]. - Бровер Г. И. Некоторые особенности структуры и свойств поверхностных слоёв титана после лазерных закалки и легирования / Г. И. Бровер, А. В. Бровер, Л. Д. Дьяченко // Известия вузов. Цветная металлургия. — 2005. — №6. — С. 51–56

[33]. - Беркович И. И. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения : учеб. для ВУЗов / И. И. Беркович, Д. Г. Громаковский / под ред. Д. Г. Громаковского. — Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2000. — 268 с.

Додаток А

Узагальнена модель процесу ЕІЛ



а - пробій міжелектродного проміжку; б - утворення ерозійних лунок на анод і катод з трьома зонами - випаровування (4), плавлення (3), напруженого стану (2); в - момент контакту електродів, якому супроводжують захоплення і зворотній перенос; г - формування на аноді вторинної структури (5) і легованого шару (6) на катоді.

До магістерської дисертації на тему: «Абразивна зносостійкість електроіскрових композиційних покриттів на основі ZrB_2 »

Виконав Єрко О.О. гр ЗП-71мп,ЗФ

Керівник д.т.н. проф. Копилов В.І.

Додаток Б

Склад і режими одержання електродних матеріалів, використовуваних для нанесення ЕІЛ-покриттів

Склад матеріалів , об.%	Температура гарячого пресування, °С	Час спікання, хв
65,83AlN+29,96ZrB ₂ +4,21ZrSi ₂ (ЦБСАН)	1820–1860	25–45
59,19LaB ₆ +27,47ZrB ₂ + +15,33Ni+5,25Cr+0,42Al (ЦЛАБ-1)	1550–1600	25–35
59,24ZrB ₂ +23,04ZrSi ₂ +17,72LaB ₆ (ЦЛАБ-2)	1820–1860	25–35
41,19ZrB ₂ +16,02ZrSi ₂ +12,32LaB ₆ +30,47SiC (ЦЛАБ-3)	1820–1860	25–35
80,32(Ti,Cr)B ₂ +19,68FeCr (ТХБФ)	1600–1650	15–20
94,8WC+5,2Co (БК3)	—	—

Характеристики вихідних порошків

Порошок	Атомний склад, мас. %
ZrB ₂	B – 19,0, Zr – інше.
ZrSi ₂	Si – 36,9, C – 1,2, Zr – інше.
LaB ₆	La – 68,2, B – 31,8.
AlN техн.	N – 32,5, O – 1,2, C – 0,1. Середній розмір часток 2–5 мкм.

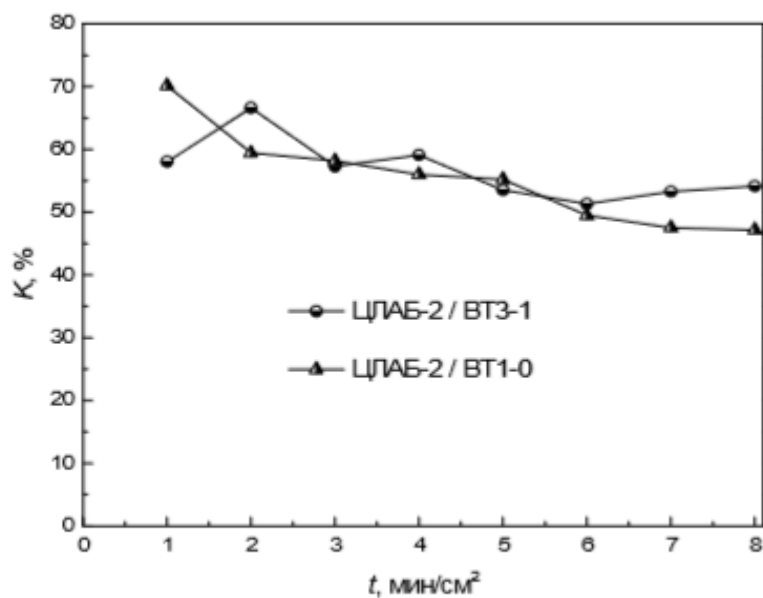
До магістерської дисертації на тему: «Абразивна зносостійкість електроіскрових композиційних покриттів на основі ZrB₂

Виконав Єрко О.О. гр ЗП-71мп,ЗФ

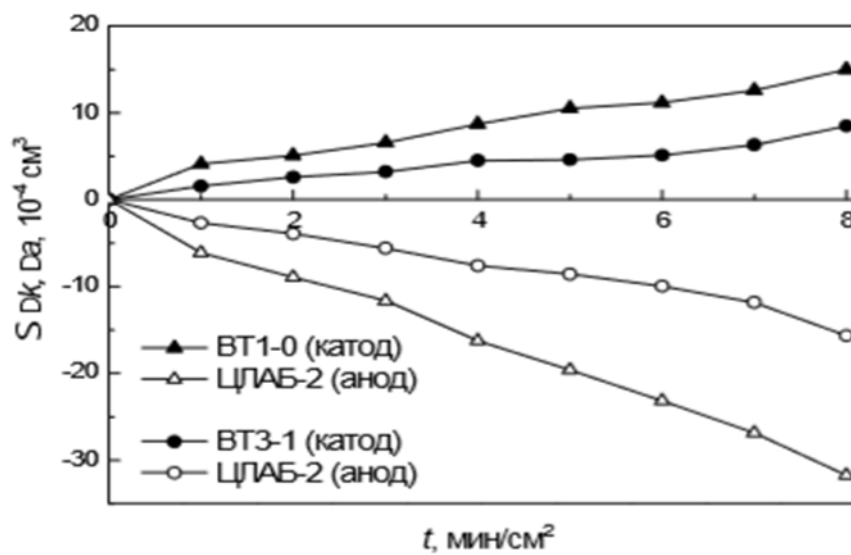
Керівник д.т.н. проф. Копилов В.І.

Додаток В

Кінетика масопереносу при ЕІЛ сплавів титану



б)



а)

а) - приріст катода Δk і ерозія анода Δa ; б) - коефіцієнт масопереносу

До магістерської дисертації на тему: «Абразивна зносостійкість електроіскрових композиційних покриттів на основі ZrB_2

Виконав Єрко О.О. гр ЗП-71мп,ЗФ

Керівник д.т.н. проф. Копилов В.І.

Додаток Д

Загальний вид високочастотної установки для електроіскрового легування "Елітрон-22"



Загальний вигляд лазера ЛТН – 103



До магістерської дисертації на тему: «Абразивна зносостійкість електроіскрових композиційних покриттів на основі ZrB_2

Виконав Єрко О.О. гр ЗП-71мп,ЗФ

Керівник д.т.н. проф. Копилов В.І.

Додаток Ж

Співвідношення фаз (об.%) на поверхні покриттів ЦЛАБ-2 на титановому сплаві до і після АЗ (на глибині $h = 5$ нм)

Покриття	Тверда оксидна матриця(ТОМ), об. %	Боросилікатна фаза (БСФ), об. %	Інші фази, об. %	S, об. %
ЕІЛ (глобула до АЗ)	4,10 TiO_2 0,98 Ti_2O 16,49 ZrO_2 6,75 La_2O_3 3,14 CaO 3,47 Al_2O_3 (S = 34,94)	57,65 B_2O_3 2,45 SiO_2 (S = 60,10)	4,96 ZrB_2 (S = 4,96)	100,0
ЕІЛ+ЛО _{імпл.} (дорожка ЛО до АЗ)	5,20 TiO_2 11,76 Ti_2O 16,67 ZrO_2 17,57 La_2O_3 16,69 CaO 0,32 Al_2O_3 (S = 68,21)	25,09 B_2O_3 5,40 SiO_2 (S = 30,49)	— —	98,7
ЕІЛ+ЛО _{непр.} (дорожка ЛО після АЗ)	11,0 TiO_2 6,91 Ti_2O 21,35 ZrO_2 1,19 La_2O_3 3,79 CaO 2,39 Al_2O_3 (S = 46,64)	5,29 B_2O_3 10,88 SiO_2 (S = 16,16)	9,59 ZrB_2 6,65 $Zr_{0,5}Ti_{0,5}B_2$ 10,61 Ti 9,34 Zr 1,01 B (S = 37,20)	100,0

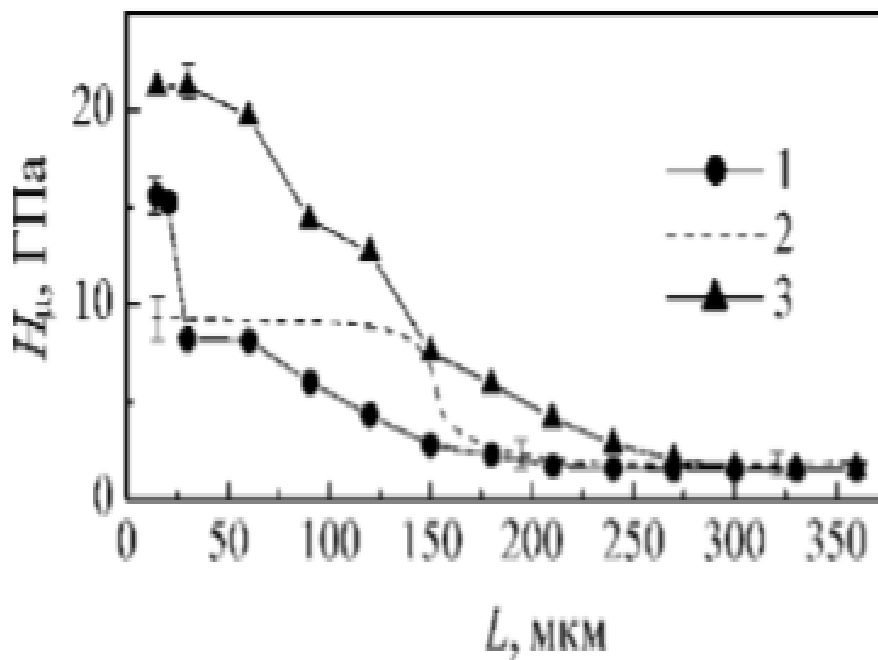
До магістерської дисертації на тему: «Абразивна зносостійкість електроіскрових композиційних покриттів на основі ZrB_2

Виконав Єрко О.О. гр ЗП-71мп,ЗФ

Керівник д.т.н. проф. Копилов В.І.

Додаток К

Зміна H_m в поперечному перерізі вихідного ЕІЛ- покриття



(крива 1) в зіставленні з вихідної (крива 2) і зношеної (крива 3) поверхнями доріжок ЛО

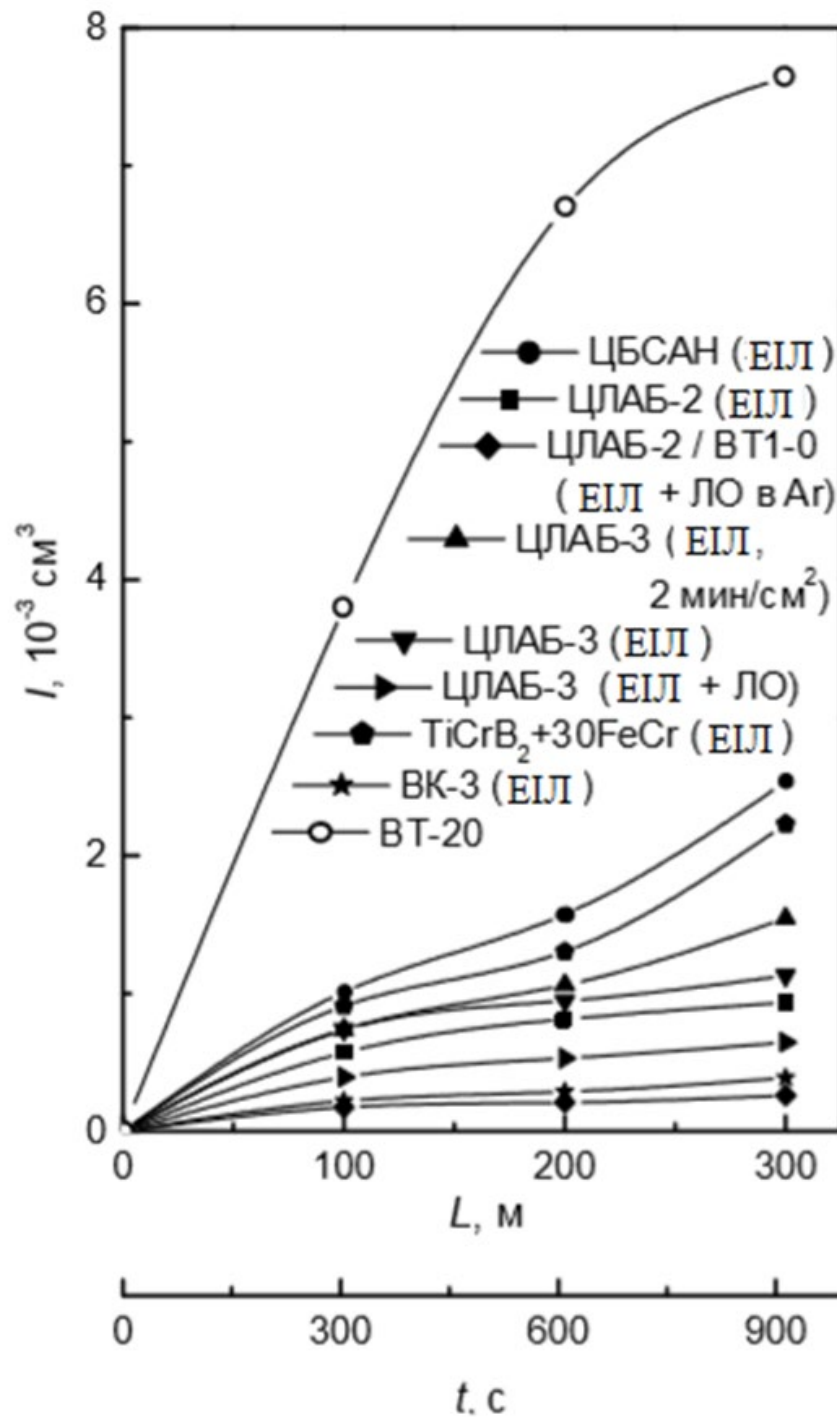
До магістерської дисертації на тему: «Абразивна зносостійкість електроіскрових композиційних покриттів на основі ZrB_2 »

Виконав Єрко О.О. гр ЗП-71мп,ЗФ

Керівник д.т.н. проф. Копилов В.І.

Додаток Л

Кінетичні залежності абразивного зношування покриттів



($P = 44.1 \text{ Н}$; $t = 7 \text{ хв} / \text{см}^2$)

До магістерської дисертації на тему: «Абразивна зносостійкість електроіскрових композиційних покриттів на основі ZrB_2 »

Виконав Єрко О.О. гр ЗП-71мп,ЗФ

Керівник д.т.н. проф. Копилов В.І.

Додаток М

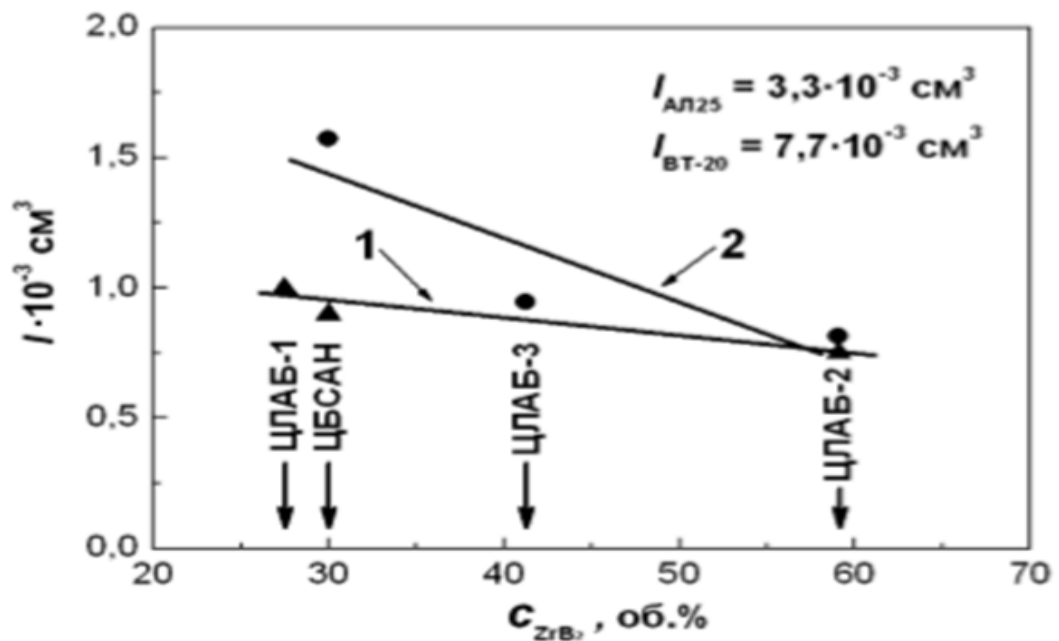
Склад електродних матеріалів і схеми нанесення покриттів на сплав ВТ-20

Матеріал електроду	Склад електроду	Сумарний зміст твердих фаз $SC_{тв.ф., об. \%}$ (ZrB ₂ , LaB ₆ , SiC, WC)	Зміст боридної фази $C, об. \%$		Схема нанесення ($t_{ЭИЛ} = 7 \text{ мин/см}^2$)
			ZrB ₂	TiB ₂	
Сплав ВТ-20, без покриття					
ВКЗ	WC + 3% Co	94,8	—	—	ЕІЛ
ТХБФ	(Ti,Cr)B ₂ , FeCr	—	—	80,32	те ж
ЦЛАБ-1	LaB ₆ , ZrB ₂ , NiCr	86,66	27,47	—	— " —
ЦБСАН	AlN, ZrB ₂ , ZrSi ₂	29,96	29,96	—	— " —
ЦЛАБ-3	ZrB ₂ , LaB ₆ , SiC, ZrSi ₂	83,98	41,19	—	— " —
ЦЛАБ-3	ZrB ₂ , LaB ₆ , SiC, ZrSi ₂	83,98	41,19	—	— " — *
ЦЛАБ-3	ZrB ₂ , LaB ₆ , SiC, ZrSi ₂	83,98	41,19	—	ЕІЛ +ЛО _{мш.} (на повітрі)
ЦЛАБ-2	ZrB ₂ , LaB ₆ , ZrSi ₂	76,96	59,24	—	ЕІЛ
ЦЛАБ-2	ZrB ₂ , LaB ₆ , ZrSi ₂	76,96	59,24	—	ЕІЛ +ЛО _{мш.} ** (в Ar)

* $t = 2 \text{ хв/см}^2$;

** на сплаві ВТ1-0.

Залежність абразивного зносу ЕІЛ-покриттів на сплавах АЛ25 (1) і ВТ-20 (2) від вмісту ZrB₂ в електродних матеріалах



($L = 200 \text{ м}$, $P = 44.1 \text{ Н}$)

До магістерської дисертації на тему: «Абразивна зносостійкість електроіскрових композиційних покриттів на основі ZrB₂»

Виконав Єрко О.О. гр ЗП-71мп,3Ф

Керівник д.т.н. проф. Копилов В.І.

Додаток Н

Параметри зношування ЕІЛ-покриттів ($t_{\text{ЕІЛ}} = 7 \text{ хв} / \text{см}^2$) на сплаві ВТ-20

Матеріал покриття	Склад ZrB ₂ (об.%)	Швидкість зношування , - 10 ⁻³ см ³ /мін			Абразивний знос I - 10 ⁻³ см ³ (L = 50 м)	
		L ≤ 100 м	100 м ≤ L ≤ 200 м	200 м ≤ L ≤ 300 м	P = 44.1 Н	P = 84.2 Н
ЦБСАН	29,96	0,198	0,1100	0,189	0,55	1,03
ЦЛАБ-3*	41,19	0,145	0,0633	0,0949	0,40	0,30
ЦЛАБ-3	41,19	0,145	0,0407	0,0361	0,40	0,14
ЦЛАБ-2	59,24	0,112	0,0477	0,0239	0,32	0,54
ЦЛАБ-3**	41,19	0,0771	0,0272	0,0227	0,22	0,023
ЦЛАБ-2***	59,24	0,0341	0,0068	0,0102	0,10	
ВКЗ	—	0,0433	0,0131	0,0197	0,13	0,12

* $t_{\text{ЕІЛ}} = 2 \text{ хв} / \text{см}^2$;

** ЕІЛ + ЛО_{імп.} (на повітрі);

*** ЕІЛ + ЛО_{непр.} (в Аг) на сплаві ВТ1-0.

До магістерської дисертації на тему: «Абразивна зносостійкість електроіскрових композиційних покриттів на основі ZrB₂»

Виконав Єрко О.О. гр ЗП-71мп,ЗФ

Керівник д.т.н. проф. Копилов В.І.