

УДК 620.193:620.197:621.78

О.Калахан<sup>1</sup>, докт.техн.наук; В.Мацевітий<sup>2</sup>, докт.тех.наук;  
С.Ковалишин<sup>1</sup>, канд.техн.наук; І.Казак<sup>2</sup>, канд.техн.наук;  
К.Вакуленко<sup>2</sup>, канд.техн.наук

<sup>1</sup>Львівський національний аграрний університет

<sup>2</sup>Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України

## ЗАХИСТ СТАЛІ ТА СПЛАВІВ ВІД ФРЕТИНГ-ВТОМИ БАГАТОШАРОВИМИ ВАКУУМНО-ПЛАЗМОВИМИ ПОКРИТТЯМИ НА ОСНОВІ ХРОМУ ТА (TiCr)N

Світлій пам'яті д.т.н., професора  
Володимира Михайловича Мацевітого,  
розробника цього та інших покриттів, присвячується

**Резюме.** Розроблено вакуумно-плазмові багат шарові покриття, що складаються з почергових тонких шарів Cr малої товщини (~ 0,1 мкм) та шарів (TiCr)N завтовшки ~ 1 мкм на взірцях зі сталі 20X13 та титанового сплаву ПТ-3В. Загальна кількість шарів у покритті 20, товщина покриття 10...12 мкм, символічний запис «конструкції» – {Cr + (TiCr)N} × 10. Досліджено структуру покриття, його адгезію та когезію до сплаву й сталі, оцінено вплив багат шарового покриття на фретинг-втому металів, з'ясовано особливості фретинг-втомного руйнування сталі та сплаву з покриттями.

**Ключові слова:** конденсація з іонним бомбардуванням (КІБ), багат шарові покриття, структура, титановий сплав, сталь, фретинг-втома, корозійна тривкість.

**O.Kalakhan, V.Matsevityi, S.Kovalyshyn, I.Kazak, K.Vakulenko**

## STEEL AND ALLOYS PROTECTION AGAINST FRETTING FATIGUE BY MULTI-LAYER VACUUM PLASMA COATINGS BASED ON CHROMIUM AND (TiCr)N

**The summary.** Vacuum-plasma multi-layer coatings that consist of thin Cr layers of small thickness (~ 0.1 μm) and (TiCr)N layers of thickness ~ 1 μm on 20X13 steel and ПТ-3В titanium alloy specimens are developed. A total number of layers in a coating is 20, coating thickness – from 10...12 μm, symbolic representation of “structure” - {Cr + (TiCr)N} × 10. Coating structure, its adhesion and cohesion to steel and alloy were investigated, the influence of multi-layered coating on metal fretting-fatigue was evaluated, the peculiarities of fretting-fatigue failure of the steel and alloys with coatings were established.

**Key words:** ion bombarding condensation (IBC), multi-layer coatings, structure, titanium alloy, steel, fretting-fatigue, corrosion resistance.

**Вступ.** Вакуумно-плазмові карбідні, нітридні й оксидні покриття *d*-перехідних металів і *sp*-елементів мають високу зносостійкість, низьку адгезійну активність, а деякі з них і низьку хімічну активність [1–2]. Такі властивості покриттів здатні знизити інтенсивність захоплення, зменшити швидкість нагромадження втомних ушкоджень у приповерхневих об'ємах і зумовлюють перспективу для використання вакуумно-плазмових покриттів у вузлах елементів конструкцій з фретинг-корозією за умови покращення їх характеристик задиростійкості, стабільності коефіцієнта тертя в процесі експлуатації, зносостійкості [1–2]. Це можливо реалізувати створенням багат шарових покриттів [3–5].

**Мета роботи** – розроблення багат шарових (TiCr)N покриттів із використанням методу конденсації з іонним бомбардуванням (КІБ) на титановому сплаві ПТ-3В і сталі 20X13 та вивчення їх впливу на фретинг-втому виробів.

**Матеріали та методики досліджень.** Модифікування поверхні титанового псевдо- $\alpha$  сплаву ПТ-3В та сталі 20Х13 багат шаровим покриттям методом КІБ [3] здійснено на модернізованій установці „Булат-6”, укомплектованій оптичним пірометром „Гефест” для вимірювання температури основи (100...600 °С). Покриття наносили постадійно за допомогою планетарного механізму обертання взірців. На I стадії поверхню взірців очищували у тліючому розряді, на II-й – продовжували очищення поверхні бомбардуванням її металевими іонами. На III-й стадії здійснювали власне нанесення покриття. Остання стадія складалася з кількох етапів, у межах яких наносили окремий шар покриття.

Покриття отримували розпиленням катодів із титану марки ВТ1-0 і хрому в середовищі азоту високої чистоти з умістом кисню < 0,02 %. Для реалізації тліючого розряду використано аргон високої чистоти. Відстань між катодами, що розпилюються, та поверхнею осадження покриття становила 350 мм. Очищення поверхні у тліючому розряді здійснювали за напруги 600...1600 В упродовж 15...40 хв і тиску аргону  $5,3 \cdot 10^{-1}$  Па. Очищення іонами титану (з верхнього катода) здійснювали за напруги 1200...1600 В у вакуумі  $\sim 1 \cdot 10^{-4}$  Па протягом 3...5 хв (струм дуги  $I_d = 100$  А). Товщину шарів задавали часом конденсації.

Структуру та хімічний склад покриттів досліджено на скануючому електронному мікроскопі „JSM-840” із рентгеноспектральним мікроаналізатором. Довговічність сплаву за умов фретинг-втоми оцінювали за часом до повного руйнування призматичних взірців розмірами  $110 \times 11 \times 5$  мм консольним згиним. База випробувань  $1 \cdot 10^7$  циклів, амплітуда напружень  $\sigma_a = 100 \dots 200$  МПа, частота навантаження  $f = 10$  Гц. Відтворення фретингу при втомних випробуваннях здійснювали на взірцях, які утворювали пару фретингу при контакті двох плоских поверхонь протягом усього часу випробування. Для створення однакової лінії фретинг-контакту досліджуваної пари взірців торці «зразок-накладка» шліфували одним пакетом.

### Результати експериментів і обговорення

Експериментально встановлено, що характерною особливістю покриття є наявність на поверхні (рис. 1а) значної кількості краплинної фази титану, який не прореагував при напиленні з азотом, а також окремих пор, сфероподібних ямок.

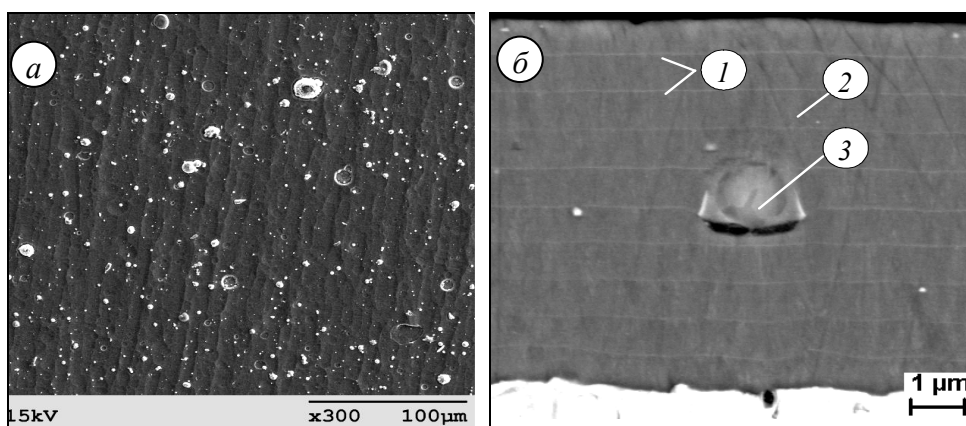


Рисунок 1. Поверхня (а) та мікроструктура поперечного шліфа (б) багат шарового  $\{Cr + (TiCr)N\} \times 10$  покриття: 1 – шар хрому; 2 – шар (TiCr)N; 3 – краплинна фаза  $\alpha$ -Ti

Останні ідентифіковано як сліди, що залишилися на поверхні через відокремлення окремих елементів краплинної фази. Встановлено, що розмір краплинної фази (рис. 1б) лежить у межах від 1 до 14 мкм, а відносна площа поверхні

покриття, зайнятої нею, сягає 10 %. На покритті виявлено сліди після шліфування взірців, котрі впливають на формування покриття, утворюючи уздовж слідів прямолінійні області, що можуть бути западинами або виступами стосовно основної поверхні покриття. Багат шарове покриття (рис. 1б) складається з почергових тонких шарів Cr малої товщини (~ 0,1 мкм) та шарів (TiCr)N завтовшки ~ 1 мкм. Загальна кількість шарів у покритті 20, товщина покриття 10...12 мкм, символічний запис «конструкції» – {Cr + (TiCr)N} × 10.

Адгезію та когезію покриття до сплаву та сталі оцінено [6] за характером його сколу за сумісної локальної пластичної деформації основи та покриття шляхом глибокого проникнення індентора твердоміра Роквелла при навантаженні 1470 Н (рис. 2).

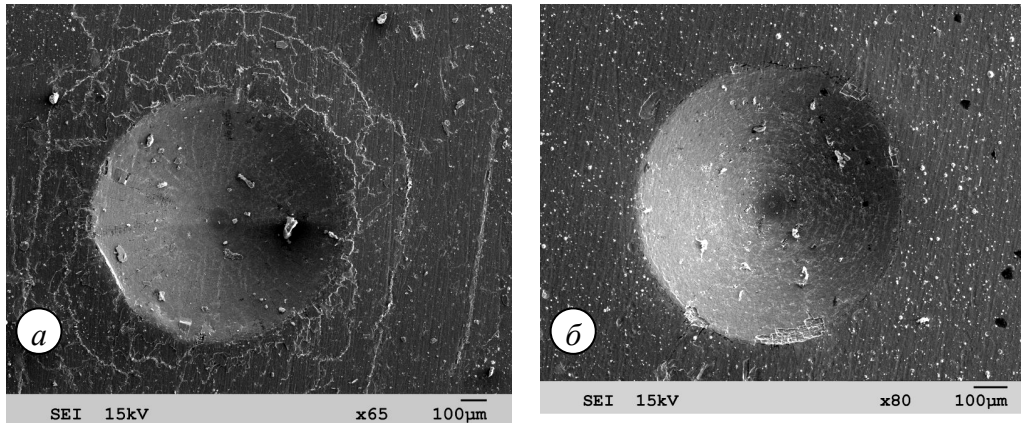


Рисунок 2. Відбитки та їх околиці на зразках зі сталі 20X13 (а) та титанового сплаву ПТ-3В (б) з покриттям {Cr + (TiCr)N} × 10

Про якість адгезії та когезії покриття за цим методом свідчать сколи, відшарування шарів, розтріскування біля відбитка та на його поверхні. Покриття, яке ми розробили, сколів не має і за цим оцінюванням є задовільним, однак на сталевій основі (рис. 2а) воно дещо крихкіше, оскільки на відбитку після проникнення індентора виявлено мікророзтріскування покриття без відшарування. Мікротвердість взірців із титанового сплаву становить 2960 МПа при навантаженні 200 г, а мікротвердість взірців із багат шаровим покриттям на сплаві при тому ж навантаженні 8650 МПа.

Оцінювання впливу багат шарового покриття на фретинг-втомну довговічність (рис. 3) сплаву ПТ-3В (рис. 3а) та сталі 20X13 (рис. 3б) здійснено при навантаженнях 100, 150 та 200 МПа, котрі відповідали низько- та високоамплітудній ділянкам лівої вітки кривої втоми, за часом до повного руйнування плоских взірців.

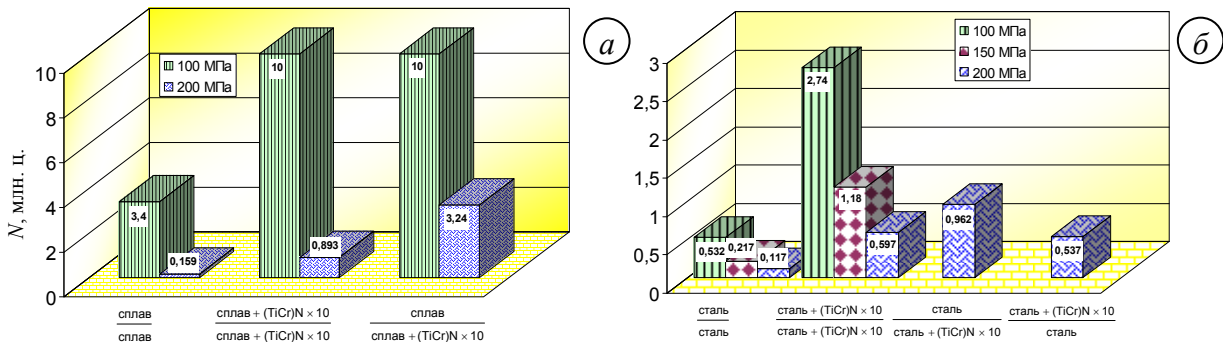


Рисунок 3. Гістограма впливу багат шарових {Cr + (TiCr)N} × 10 покриттів на довговічність сплаву ПТ-3В (а) та сталі 20X13 (б) за умов фретинг-втоми (чисельник – основний взірець, знаменник – накладка)

Багатошарові  $\{Cr + (TiCr)N\} \times 10$  покриття суттєво підвищують довговічність титанового сплаву та сталі за умов фретинг-втоми. Довговічність сплаву з покриттям при навантаженні 200 МПа збільшується, залежно від матеріалу взірця-накладки, в 6...20 разів в умовах фретинг-контакту з матричним сплавом та виходить на базову ( $1 \cdot 10^7$ ) кількість циклів при навантаженні  $\pm\sigma = 100$  МПа для досліджених контактних пар «взірець–накладка». Для титанового сплаву багатошарові покриття ефективні як за низьких (базова кількість циклів), так особливо за високих значень прикладеного навантаження, насамперед, для контактної пари взірець із покриттям – накладка без покриття.

Руйнування взірців відбувалося в зоні фретинг-контакту пари «взірець–накладка» завширшки 0,5...2 мм, проковзування 5...11 мкм (рис. 4).

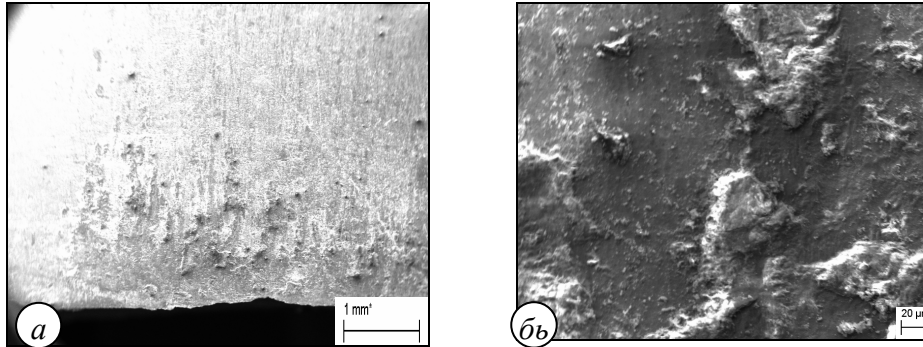


Рисунок 4. Топографія поверхні основного взірця з багатошаровим  $\{Cr + (TiCr)N\} \times 10$  покриттям на сплаві ПТ-3В після фретинг-втомних випробувань

Дослідженнями зразків зі сплаву ПТ-3В після фретинг-втоми виявляли на поверхні пітинги, вільні порошкоподібні продукти зношування, сліди абразивної дії на поверхнях тертя. Але часто зустрічали й втомні тріщини, котрі проходили через пошкоджену поверхню. Напрямок тріщини на поверхні незмінно перпендикулярний напрямкові руху, який зазвичай проходить у напрямку змінної напруги. Тріщини локалізуються переважно обабіч межі ділянки контакту взірця з накладкою. Втомні тріщини поширюються похило до поверхні в районі збурення, але в області поза зоною впливу фретингу вони поширюються поперек перерізу під прямим кутом до напрямку напружень.

Аналіз результатів досліджень багатошарових  $\{Cr + (TiCr)N\} \times 10$  покриттів виявив відмінності їх фретинг-втомного руйнування від матричного сплаву ПТ-3В. За умов фретингу початкове руйнування покриття проходить шляхом сколювання верхнього шару покриття (рис. 5) після його розтріскування під знакозмінними навантаженнями та внаслідок переміщення взірця у парі з накладками.

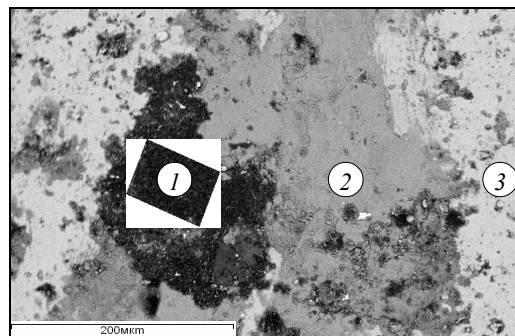


Рисунок 5. Характерні зони пошкодженого фретингом багатошарового  $\{Cr + (TiCr)N\} \times 10$  покриття на сплаві ПТ-3В

Дослідженнями поверхонь багат шарових  $\{Cr + (TiCr)N\} \times 10$  покриттів після фретинг-втоми виявлено такі ж локальні «виразки», що й на матричному сплаві ПТ-3В: глибокі, діаметром 100-150 мкм отвори 1 (30 мас.% Ti, 70 мас.% O) та сегментні заглиблення 2, які заповнені продуктами окиснення покриття при фретингу (31 мас.% Ti, 29 мас.% Cr, 40 мас.% O) відшарованого в цьому місці верхнього шару початкового покриття 3 (48 мас.% Ti, 31 мас.% Cr, 21 мас.% N). Виявлено також відсутність суцільних відшарувань покриття від матричного сплаву при фретингу, що свідчить про його добру адгезію до поверхні.

На основі проведених фретинг-втомних випробувань вакуумно-плазмових багат шарових  $\{Cr + (TiCr)N\} \times 10$  покриттів на титановому сплаві ПТ-3В і сталі 20X13, а також корозійно-електрохімічних досліджень [7] можливо стверджувати, що вони перспективні для підвищення експлуатаційної надійності (фретинг-втоми) деталей, виготовлених із цих матеріалів.

**Висновки.** Розроблено багат шарове вакуумно-плазмове покриття на сплаві ПТ-3В та сталі 20X13, що містить складний нітрид  $(TiCr)N$  і тонкі шари Cr. Основна фаза покриття –  $(TiCr)N$  – твердий розчин Cr у нітриді титану. Показано можливість збільшення фретинг-втомної довговічності у 6...20 разів взірців із титанового сплаву ПТ-3В та у 4,5...8 разів взірців зі сталі 20X13 нанесенням багат шарових  $\{Cr + (TiCr)N\} \times 10$  покриттів. Покриття перспективні для усунення корозійних фретинг-втомних ушкоджень болтових з'єднань деталей авіаційної техніки.

### **Література**

1. Костюк Г. И. Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий. Книга 1. / Г. И. Костюк. – Харьков : Изд-во АИНУ, 2002. – 587 с.
2. Мацевитый В. М. Покрытия для режущих инструментов / В. М. Мацевитый. – Харьков: Выща школа, 1987. – 128 с.
3. Розробка та дослідження вакуумно-плазмових багат шарових покриттів на основі хрому та  $(TiCr)N$  для захисту титанових сплавів і сталі від фретинг-корозії: збірник праць / В. М. Мацевитый, О. С. Калахан, І. Б. Казак [та ін.] // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин / наук. кер. Б. Є. Патон. – К.: ІЕЗ ім. Патона НАН України, 2009. – С. 155–158.
4. Триботехнические свойства вакуумно-плазменных покрытий на основе нитрида титана в топливе / Б. А. Полянин, В. М. Мацевитый, В. Н. Шубин: тезисы докладов Всесоюзной н-т конференции "Повышение ресурса узлов трения, работающих в экстремальных условиях". – Пермь, 1986. – С. 149–150.
5. О повышении износостойкости изделий из стали с низкой температурой отпуска / А. А. Андреев, В. В. Кунченко, В. М. Шулаев [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Серия : Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники. – 2003. – №13. – С. 136–138.
6. Мацевитый В. М. Способ контроля качества адгезии износостойких покрытий / В. М. Мацевитый, Л. М. Романова, В. М. Береснев // Применение прогрессивных инструментальных материалов и методов повышения стойкости режущих инструментов: тез. докл. I научно-технической конференции. – Краснодар : НТО Машпром, 1983. – С. 93–95.
7. Корозійна тривкість іонно-плазмового багат шарового нітридтитанового покриття у середовищах різної агресивності / В. Мацевитый В., О. Калахан, І. Казак [та ін.] // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2008. – Спец. випуск № 7. С. – 263–267.

*Отримано 09.12.2010*