

УДК 620.193:621.793.1

В. І. Похмурський*, член-кор. НАН України**В. М. Мацевітій****, д-р техн. наук**О. С. Калахан***, д-р техн. наук**І. Б. Казак****, канд. техн. наук**К. В. Вакуленко****, канд. техн. наук**С. В. Ляшок***** Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України
(м. Львів, E-mail: pokhmurs@ipm.lviv.ua)** Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України
(м. Харків, E-mail: matsevlad@ipmach.kharkov.ua)

РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКРИТТІВ ДЛЯ ЗАХИСТУ ВІД ФРЕТИНГ-КОРОЗІЇ

Розроблені покриття з низькою адгезійною активністю для захисту сталевих та титанових деталей від фретинг-корозії. Встановлено, що найбільш ефективним є багатопшарове вакуумно-плазмове покриття $\{Cr+(TiCr)N\} \times 10$, використання якого забезпечує підвищення довговічності втомного зразка у 20,3 рази при амплітуді напруження 200 МПа для випадку взаємодії титанових контртіл, коли покриття нанесено лише на втомний зразок, а також підвищення довговічності втомного зразка у 5,43 рази при амплітуді напруження 150 МПа у випадку взаємодії сталевих деталей при нанесенні покриття на обидва зразки – втомний та притискний.

Разработаны покрытия с низкой адгезионной активностью для защиты стальных и титановых деталей от фреттинг-коррозии. Установлено, что наиболее эффективным является многослойное вакуумно-плазменное покрытие $\{Cr+(TiCr)N\} \times 10$, использование которого обеспечивает повышение долговечности усталостного образца в 20,3 раза при амплитуде напряжения 200 МПа для случая взаимодействия титановых контртел, когда покрытие нанесено только на усталостный образец, а также повышение долговечности усталостного образца в 5,43 раза при амплитуде напряжения 150 МПа в случае взаимодействия стальных деталей при нанесении покрытия на два образца – усталостный и прижимающий.

Вступ

Як відомо, фретинг-корозія суттєво обмежує ресурс відповідальних вузлів машин та механізмів. Незважаючи на значні зусилля дослідників, повного розуміння причин та механізмів фретинг-корозії немає дотепер, через що боротьба з нею ведеться недостатньо ефективно.

Найбільший інтерес викликає вплив кисню на фретинг-корозію. Він негативний на відміну від його позитивної ролі при звичайному терті, що, на наш погляд, визначається малою амплітудою взаємних переміщень контртіл. Як відомо, при звичайному терті кисень бере участь в утворенні на поверхні вторинних структур, зосереджених у малих за товщиною поверхневих об'ємах, які захищають основу від зношування і є безупинно оновлюваною субстанцією. Однак при звичайному терті конкретна нерівність поверхні після одиначної взаємодії з контртілом за час до наступного контакту встигає релаксувати за рахунок усунення дефектів й утворення ефективного шару вторинної структури. При фретингу цієї релаксації не відбувається, і вторинна структура утворитися не встигає, тому що за малих амплітуд велика ймовірність взаємодії одних і тих же нерівностей у кожному циклі. Цей процес триває доти, поки ці нерівності не зносяться. Після цього вступають у контакт інші нерівності

й т.д. Таким чином, йде процес послідовного зношування окремих мікроділянок. Чим менше амплітуда коливань, тим імовірніше точна «зустріч» тих самих нерівностей у межах часу їхнього існування, і ці нерівності виявляються практично незахищеними вторинними структурами. Через це схоплювання відбувається увесь час та є головною причиною руйнування.

У роботі [1] відзначається, що для зменшення фретинг-втомних ушкоджень потрібне зменшення адгезії, для чого можна використати мастила, тверді плівки мастильних речовин, неметалічні покриття й неметалічні прокладки.

Про необхідність зниження адгезії йде мова й у роботі [2], де описані технологічні способи підвищення фретинг-втомної міцності: різні види хіміко-термічної обробки, методи хімічної й електрохімічної обробки, поверхнева пластична деформація.

Все більше використання в техніці знаходять захисні вакуумно-плазмові покриття, що складаються з карбідів, нітридів й оксидів *d*-перехідних металів та *sp*-елементів. Такі покриття мають винятково високу зносостійкість в умовах адгезійно-втомного зношування, а також низьку адгезійну активність [3]. За таких властивостей захисне покриття зможе знизити інтенсивність схоплювання, зменшити швидкість нагромадження втомних ушкоджень у приповерхневих об'ємах, а також запобігти руйнуванню або зменшити інтенсивність корозійної пошкоджуваності. Тому є доцільним дослідити вплив на фретинг-корозію захисних покриттів на основі речовин з низькою адгезійною активністю.

Ці міркування стали основою формулювання мети даної роботи: розробити покриття з великим опором фретинг-корозії та дослідити їх ефективність для захисту сталевих та титанових деталей.

Методика досліджень

У роботі використано один з найбільш відомих і технологічно відпрацьованих вакуумно-плазмових методів – конденсацію з іонним бомбардуванням (метод КІБ) [4]. Можливість одержання надійної адгезії в цьому методі визначається ефективністю бомбардування підкладки металевими або газовими іонами, що мають енергію ~ 1 кеВ.

Висока когезійна міцність може бути забезпечена безперервністю процесу осадження покриття, достатньою енергією частинок, що надходять до підкладки, низькою мікрокрихістю основної фази покриття, а також багатошаровою конструкцією покриття. Ефективність багатошарових конструкцій вакуумно-плазмових покриттів доведена в багатьох роботах (див., наприклад [3-6]).

Низька хімічна й адгезійна активність зовнішньої сторони покриття забезпечується формуванням поверхневих шарів відповідного хімічного й фазового складу. За нашими даними покриття на основі TiN та складного нітриду (TiCr)N адгезійно пасивні.

У роботі було поставлене завдання відпрацьовування методики одержання багатошарового покриття, яке складається з тонких шарів Cr і нітриду (TiCr)N, що чергуються. При цьому товщина шарів Cr становить 0,1 мкм, а товщина шарів (TiCr)N ~ 1 мкм. Загальна кількість шарів у покритті 20. Символічний запис „конструкції”: $\{Cr+(TiCr)N\} \times 10$. Крім того, була поставлена задача одержання багатошарового покриття (α -Ti+TiN) $\times 5$, в якому тонкі шари α -Ti (0,1 мкм) чергуються з шарами TiN товщиною ~ 1 мкм. Загальна кількість шарів у покритті 10.

Оскільки покриття, отримане за методом КІБ, характеризується присутністю краплинної фази, яка може негативно впливати на його захисні можливості, була також поставлена задача отримання безкраплинного одношарового покриття TiN за магнетронним методом.

Через те, що в літературі є інформація про ефективність твердомастильних покриттів, в роботі була також вирішена задача нанесення на зразки з титанового сплаву та сталі покриттів, до яких входить дисульфід молібдену.

Зразки зі сталі 20X13 виготовлялися з листового прокату в нормалізованому стані (HB 175). Вони були виготовлені у вигляді пластин різних розмірів із припуском на шліфування після термічної обробки. Термообробка здійснювалася за режимом: нагрівання до

1050 °С, витримка 40 хвилин, загартування в олії, відпуск протягом двох годин при 700 °С із наступним охолодженням у воді. Після термічної обробки зразки з боку великих граней зшліфовували на глибину ~0,5 мм. Твердість зразків становила *HRC* 18-20.

Зразки з титанового сплаву ПТ-3В у вигляді пластин мали твердість *HRC* 23. З них були виготовлені такі ж зразки, як зі сталі 20Х13.

Поверхня зразків під покриття готувалася на дрібній наждаковій шкурці.

Покриття на зразки за методом КІВ наносили на модернізованій установці «Булат-6» (рис. 1).

Для нанесення магнетронного покриття в роботі було використано інверсійний магнетрон – лабораторне устаткування «Вихрь» Національного аерокосмічного університету ім. М. С. Жуковського «ХАІ».

Для нанесення покриттів з дисульфідом молібдену поверхня зразків після підготовки на наждаковій шкурці була піддана вологій піскоструминній обробці, в результаті якої вона стала досить шорсткою з великою кількістю поглиблень та підвищень. Після цієї обробки зразки ретельно промивали водою і витримували в повітрі. Далі здійснювали обезжирювання зразків шляхом промивки (занурювання) в бензині Б70, потім підсушували їх в повітрі протягом 15 хвилин. Для нанесення покриттів використовували суспензію ВНИИПП-212, яка містить дисульфід молібдену, розчинник та сечевино-формальдегідну смолу. Консистенція суспензії відповідає ТУ 38-101594-75. Покриття наносили шляхом занурювання підігрітих до 100 °С зразків в ретельно перемішану суспензію. Після занурювання зразки висували в повітрі до сухого стану (~10–15 хв) і далі переносили їх до термостату, нагрітого до 100 °С. Потім підвищували температуру в термостаті до 150 °С і витримували зразки при цій температурі протягом двох годин. Після охолодження в повітрі зразки були готові до використання.

В роботі використані також рентгеноструктурний аналіз, оптична й електронна растрова мікроскопія, вимірювання мікротвердості.

Випробування зразків на фретинг-втому проводили на спеціальному стенді за схемою (див. рис. 2), при навантаженні, яке забезпечувало постійне стискуєче напруження $\sigma = 100$ МПа.

Дослідження були проведені при різних комбінаціях контактуючих поверхонь і різних рівнях амплітуди циклічного навантаження.

Результати роботи

Покриття $\{Cr+(TiCr)N\}_x10$ (як на сталевих зразках, так і на зразках з титанового сплаву) були досліджені з метою визначення їхньої товщини, фазового складу, періоду ґратки основної фази, рівня макронапружень, мікротвердості, а також розміру й кількості краплинної фази на поверхні покриття. Відповідні результати наведені в табл. 1.

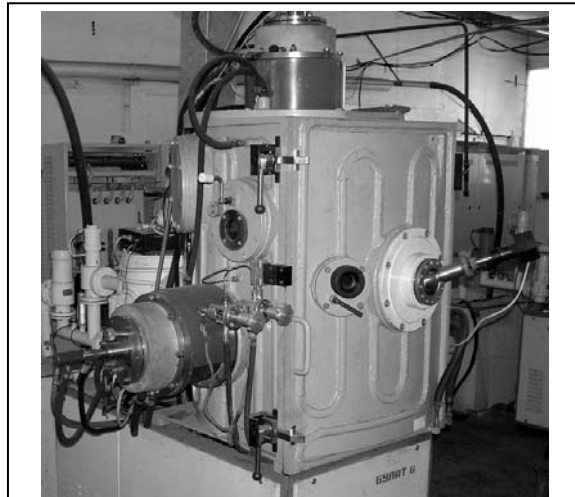


Рис.1. Зовнішній вигляд установки «Булат-6»

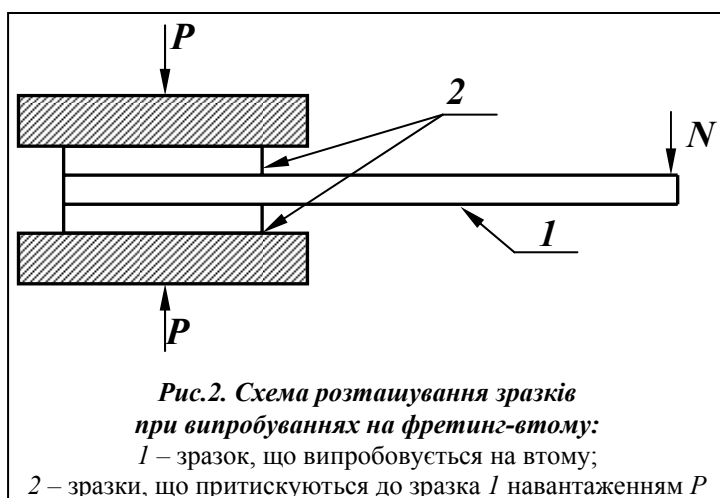


Рис.2. Схема розташування зразків при випробуваннях на фретинг-втому:

1 – зразок, що випробовується на втому;

2 – зразки, що притискуються до зразка 1 навантаженням P

Таблиця 1. Деякі характеристики розробленого покриття $\{Cr+(TiCr)N\}_x10$

Характеристика	Значення або характеристика параметра	Метод дослідження, апаратура
Загальна товщина покриття	10–12 мкм	Метод «косого» шліфа
Текстура	Сильна текстура типу $\langle 110 \rangle$ – площини (220), орієнтовані переважно паралельно поверхні покриття	Рентгеноструктурний аналіз (ДРОН-3) у монохроматизованому випромінюванні мідного анода
Фазовий склад покриття	$(TiCr)N + \alpha-Ti + Cr$	Рентгеноструктурний аналіз сукупно з металографією
Період ґратки $(TiCr)N$ на зразку з титанового сплаву (з урахуванням залишкових напружень)	Оцінка: $a = 4,2385 \text{ \AA}$ $\sigma = -190 \text{ МПа}$ (прийнято) $\mu = 0,3$ й $E = 2,56 \times 10^5 \text{ МПа}$. За таблицями: $a_{TiN} = 4,24 \text{ \AA}$	Рентгеноструктурний аналіз лінії (333) ($2\theta = 140^\circ$) $\psi = 0^\circ$; $\psi = 30^\circ$;
Мікротвердість зразків з титанового сплаву	2960 МПа	Мікротвердомір ПМТ-3; навантаження 200 г
Мікротвердість зразків з титанового сплаву з покриттям	8650 МПа	Мікротвердомір ПМТ-3; навантаження 200 г
Розмір краплинної фази	від 1 до 14 мкм	Оцінка за даними сканувальної електронної мікроскопії
Відносна площа поверхні покриття, зайнята краплинною фазою	до 10%	Оцінка за даними сканувальної електронної мікроскопії

Структура поверхні покриття наведена на рис. 3.

Видно, що поверхня покриття містить значну кількість краплинної фази. На окремих ділянках спостерігаються пори, виявлені також круглі ямки, які, на наш погляд, можна ідентифікувати як сліди, що залишилися на поверхні в результаті відділення елементів краплинної фази. На покритті проглядаються сліди шліфування, при цьому видно, що вони впливають на процес формування покриття: уздовж слідів шліфування утворюються прямолінійні області, які можуть бути западинами стосовно основної поверхні покриття або, навпаки, виступами.

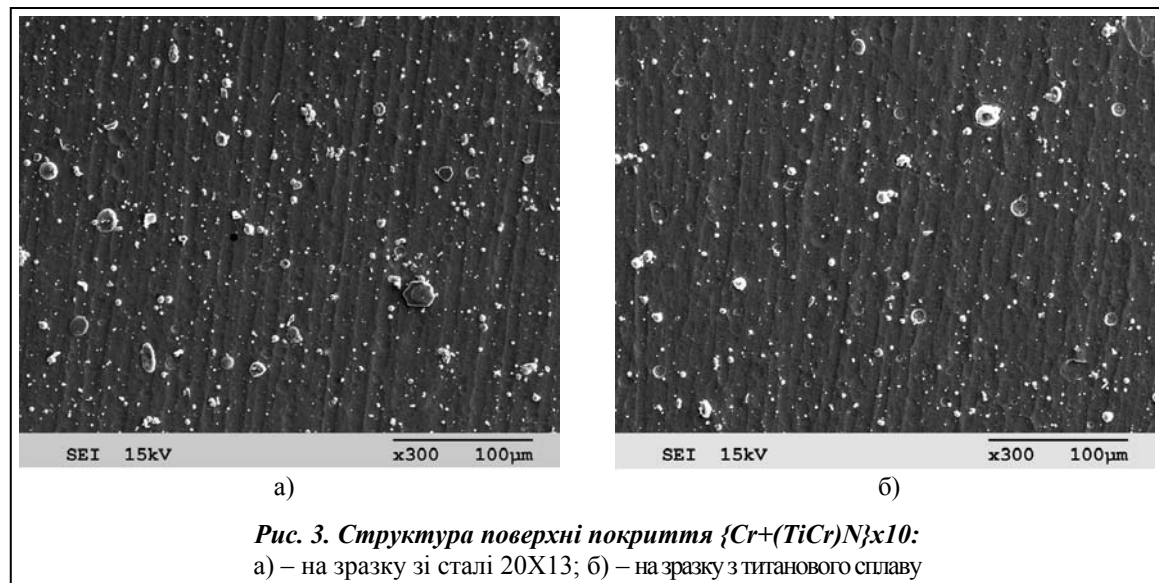
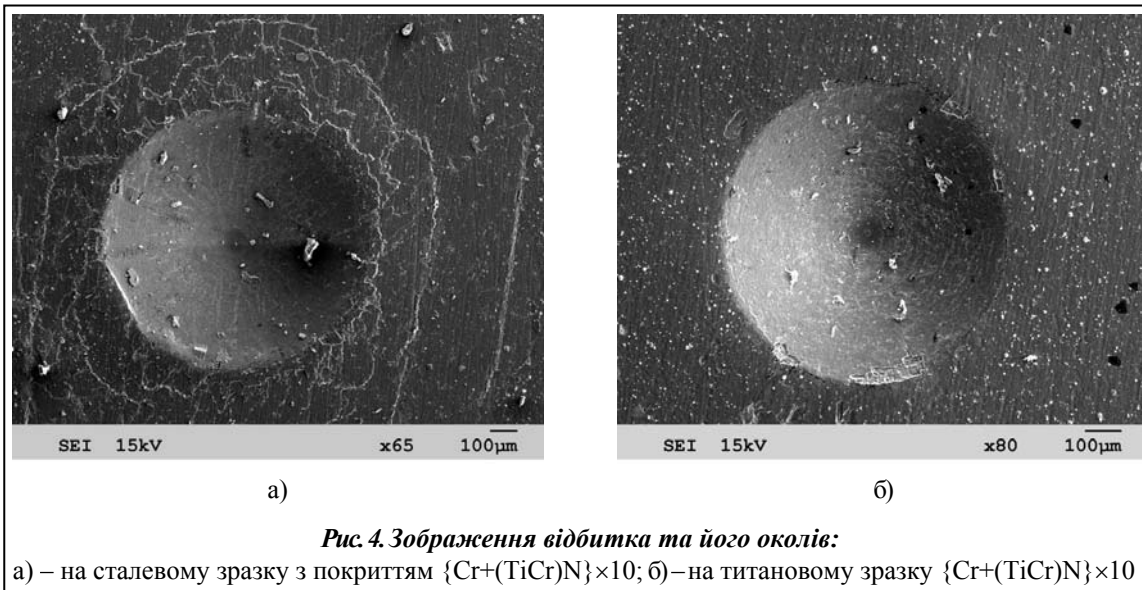


Рис. 3. Структура поверхні покриття $\{Cr+(TiCr)N\}_x10$: а) – на зразку зі сталі 20X13; б) – на зразку з титанового сплаву



а)

б)

Рис. 4. Зображення відбитка та його околів:

а) – на сталевому зразку з покриттям $\{Cr+(TiCr)N\} \times 10$; б) – на титановому зразку $\{Cr+(TiCr)N\} \times 10$

У даній роботі для оцінки якості адгезії і когезії покриття було використано раніше розроблений метод глибокого проникнення у поверхню зразка з покриттям алмазного конуса з використанням системи навантаження твердоміра Роквелла [7]. Про якість адгезії та когезії покриття у цьому методі свідчать сколи, відслоювання шарів покриття, а також його розтріскування біля відбитку на його поверхні. Дослідження за цим методом дозволяють зробити висновок, що покриття має задовільну адгезію до сталевих та титанових зразків, але на сталевій підкладці покриття виявляється дещо більш крихким (рис. 4).

На рис. 5 наведена структура покриттів $(\alpha-Ti+TiN) \times 5$. Спостерігається велика кількість краплинної фази, краплі від дуже дрібних з характерним габаритним розміром $\sim 0,1$ мкм у площині покриття до великих ~ 15 мкм. Видні також пори чи, можливо, поглиблення, що залишилися на поверхні в результаті зриву окремих крапель. На покритті помітні сліди шліфування зразків.

Загальна товщина отриманого покриття становить 4–5 мкм, а мікротвердість 8000 МПа. За даними фазового рентгенівського аналізу основною фазою покриття є TiN. Крім цієї фази, у покритті є певна кількість $\alpha-Ti$, який зосереджується головним чином у тонких титанових шарах покриття та у краплинній фазі. Аналіз показав, що це покриття також має задовільну адгезійну та когезійну міцність, при цьому немає відшарування окремих шарів від покриття та сколу окремих ділянок усього покриття від підкладки.

На рис. 6 зображено вигляд поверхні покриття з дисульфідом молібдену, який нагадує шар дрібної щєбінки, якою засипані нерівності поверхні зразків, що утворилися в результаті вологій піскоструминної обробки. За оцінкою товщина цього покриття ~ 10 мкм.

Результати випробувань зразків на фретинг-втому подано у табл. 2 і 3.

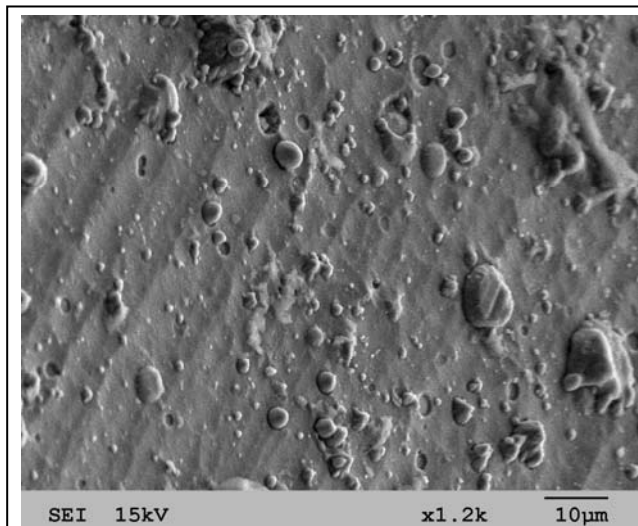
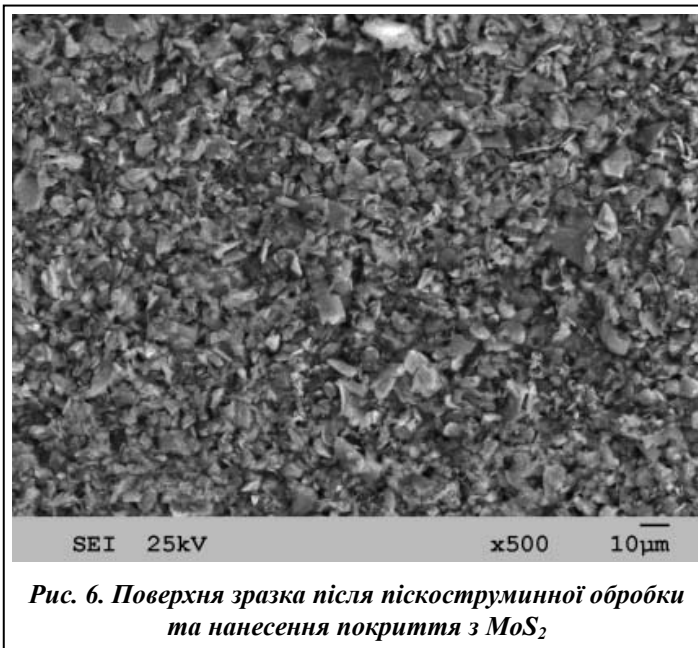


Рис. 5. Структура поверхні покриття $(\alpha-Ti+TiN) \times 5$ (похила зйомка)



З табл. 2 видно, що ефективність варіантів зменшується у послідовності: 1, 2, 4, 3, 5. Варіанти 6 і 7 неефективні. Видно також, що варіант 1 є дуже ефективним за усіх амплітуд напруження.

Само по собі покриття MoS_2 також забезпечує підвищення довговічності (на 60% при $\sigma = 100$ МПа і на 30% – при $\sigma = 150$ МПа). Але це підвищення незначне у порівнянні з ефективністю покриття $\{\text{Cr}+(\text{TiCr})\text{N}\} \times 10$. Слід визнати дещо меншу ефективність покриття $(\alpha\text{-Ti}+\text{TiN}) \times 5$, що може бути пов'язано як з меншою когезійною його міцністю, так і з меншою адгезійною пасивністю.

Неефективність магнетронного покриття очевидна. Це, ма-

буть, пов'язано з дуже малою товщиною покриття. Що стосується зниження втомної міцності внаслідок піскоструминної обробки сталевих пластин, які притискуються до втомного зразка, то це не викликає подиву, оскільки після цієї обробки поверхня пластин дуже дефектна, що не може позитивно впливати на втому основного зразка, де можливо виникнення подряпин та інших дефектів.

Ефективність покриття $\{\text{Cr}+(\text{TiCr})\text{N}\} \times 10$ як захисного проти фретинг-корозії переконливо проявляється також на зразках з титанового сплаву ПТ-3В (табл. 3).

Особливо звертає на себе увагу ефективність цього покриття у варіанті 2 (тобто в контакті зі зразком без покриття при великій амплітуді 200 МПа). Отримані результати підтверджують вірність припущення про необхідність зниження адгезії матеріалів в контакті і дозволяють виділити адгезійний фактор як один з найважливіших механізмів фретинг-корозії. Висока ефективність розробленого покриття дозволяє рекомендувати його для впровадження.

Таблиця 2. Вплив покриттів на фретинг-втому (зразки зі сталі 20Х13)

Варіант	Характеристика варіантів		Кількість циклів до руйнування (млн.) при амплітуді згинного напруження		
			Коефіцієнт підвищення довговічності сталі у порівнянні з варіантом «0»		
	Втомний зразок	Притискний зразок	100 МПа	150 МПа	200 МПа
0	Сталь	Сталь	0,532/1	0,217/1	0,117/1
1	Сталь+ $\{\text{Cr}+(\text{TiCr})\text{N}\} \times 10$	Сталь+ $\{\text{Cr}+(\text{TiCr})\text{N}\} \times 10$	2,74/5,15	1,18/5,43	0,408/3,49
2	Сталь+ $(\alpha\text{-Ti}+\text{TiN}) \times 5$	Сталь+ $(\alpha\text{-Ti}+\text{TiN}) \times 5$	1,81/3,40	0,794/3,66	–
3	Сталь+ $(\alpha\text{-Ti}+\text{TiN}) \times 5$	Сталь+TiN(магнетрон.)	0,887/1,66	0,375/1,73	–
4	Сталь+ $(\alpha\text{-Ti}+\text{TiN}) \times 5$	Сталь+ MoS_2	1,45/2,73	0,548/2,5	–
5	Сталь	Сталь+ MoS_2	0,854/1,6	0,282/1,3	–
6	Сталь	Сталь+TiN (магнетрон.)	0,275/0,52	0,195/0,9	–
7	Сталь	Сталь+піскостр. обр.	0,29/0,55	–	–

Таблиця 3. Вплив покриттів на фретинг-втому (зразки зі сплаву ПТ-3В)

Характеристика варіантів		Кількість циклів до руйнування (млн.) при амплітуді згинного напруження	
		Коефіцієнт підвищення довговічності титанових зразків у порівнянні з варіантом «0»	
Втомний зразок	Притискний зразок	100 МПа	200 МПа
ПТ-3В	ПТ-3В	3,4/1	0,159/1
ПТ-3В+{Cr+(TiCr)N}×10	ПТ-3В+{Cr+(TiCr)N}×10	10,0/2,94	0,893/5,6
ПТ-3В+{Cr+(TiCr)N}×10	ПТ-3В	10,0/2,94	3,24/20,3
ПТ-3В+{Cr+(TiCr)N}×10	ПТ-3В+TiN (магнетрон.)	10,0/2,94	–

Одним з можливих варіантів застосування покриття можуть бути болтові з'єднання деталей авіаційної техніки.

Висновки

Таким чином, на основі дослідження ефективності захисних покриттів встановлено, що найкращий результат щодо підвищення втомної довговічності сталевих та титанових зразків в умовах фретинг-корозії забезпечує багат шарове вакуумно-плазмове покриття {Cr+(TiCr)N}×10. Найбільші коефіцієнти підвищення довговічності: 20,3 для титанових зразків та 5,43 – для сталевих, спостерігаються відповідно при амплітудах напруження 200 та 150 МПа. Ці дані отримані для взаємодії контртіл зі сплаву ПТ-3В, коли покриття було нанесено лише на втомний зразок, а для випадку взаємодії сталевих деталей – при нанесенні розробленого покриття на обидва зразки (втомний та притискний). Отримані результати дозволяють рекомендувати покриття {Cr+(TiCr)N}×10 з низькою адгезійною активністю для застосування в техніці для захисту титанових та сталевих деталей від фретинг-корозії.

Література

1. Уотерхауз Р. Б. Фретинг-коррозия. – Л.: Машиностроение, 1976. – 272 с.
2. Шевеля В. В. Фретинг-усталость металлов / В. В. Шевеля, Г. С. Калда. – Хмельницький: Поділля, 1998. – 299 с.
3. Мацевитый В. М. Покрyтия для режyщих инструментов. – Харьков: Вища шк., 1987. – 128 с.
4. Коровкин А. В. Прогрессивная технология нанесения износостойких покрытий на инструмент и его эксплуатация (обзорная информация) / А. В. Коровкин, Г. А. Усачев, С. С. Кравченко. – Тольятти: Филиал НИИНавтопрома, 1985. – 77 с.
5. Мацевитый В. М. Об эффективности вакуумно-плазменных покрытий триботехнического назначения / В. М. Мацевитый, А. П. Любченко, И. Б. Казак // Трение и износ. – 1996. – 17, № 4. – С. 527–530.
6. Костюк Г. И. Физико-технические основы напыления покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий: В 2-х кн. – Киев: Антиква, 2002. – Кн. 1. – 588 с.; Кн. 2. – 442 с.
7. 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 науч.-техн. конф. – Краснодар: НТО Машпром, 1983. – С. 93–94.

Надійшла до редакції
12.11.09