

УДК 621.793: 620.198: 620.178.

О.Б.Гасій, В.М.Голубець

Національний лісотехнічний університет України

ТЕХНОЛОГІЧНІ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ ВАКУУМНИХ ЙОННО-ПЛАЗМОВИХ КОНДЕНСАТІВ

В статті розглядається роль технологічних факторів у формуванні йонно-плазмових покриттів, одержаних осадженням конденсатів у вакуумі в умовах йонного бомбардування (метод КІБ). Наведено основні закономірності впливу цих факторів на геометричні характеристики, суцільність, корозійну стійкість, корозійно-втомну міцність, стійкість до кавітаційно-ерозійного і корозійно-механічного зношування досліджуваних покриттів, а також їх зносостійкість в умовах сухого і граничного тертя ковзання та моделювання процесу різання.

Ключові слова: вакуумне йонно-плазмове напилення, товщина, шорсткість, суцільність, корозійна стійкість, корозійно-втомна міцність, кавітаційно-ерозійне зношування, корозійно-механічне зношування, зносостійкість.

1. Постановка проблеми. Подальше підвищення питомої потужності, надійності і довговічності сучасних машин і апаратів ставить нові, більш жорсткі вимоги до конструкційних матеріалів. В світовій практиці отримала достатньо широке розповсюдження прогресивна тенденція підвищення якості матеріалів нанесенням різного роду захисних покриттів. Створення захисних покриттів – кардинальне і економічно виправдане вирішення проблеми досягнення високої конструктивної міцності матеріалів та їх сумісності з робочим середовищем. Визначились основні області застосування більшості розроблених покриттів, зокрема:

- за місцем застосування: спряжені контактні поверхні деталей та вузлів машин і механізмів, пари тертя, які працюють при високих питомих навантаженнях, робочі контактні поверхні деталей, метало- і дереворізального, мірильного та штампового інструменту і т.д.;

- за призначенням: зносостійкі, фрикційні і антифрикційні, корозійностійкі та інші.

Прогнозні оцінки показують, що при цілеспрямованому використанні таких покриттів річний національний металофонд може бути знижено на 20...25 %.

В порівнянні з іншими способами поверхневого зміцнення електрофізичні методи є одними з найбільш високотехнологічних та екологічно чистих засобів нанесення покриттів. З-поміж них за останні десятиріччя широко використовуються методи нанесення захисних покриттів у вакуумі. Із групи вакуумних технологій в основному на практиці використовуються технології осадження покриттів із парів та плазми металів, отриманих шляхом термічного розпилення, катодного розпилення, реактивного електронно-променевого плазмового напилення (РЕП), активованого реактивного напилення (ARE), магнетронного напилення, реактивного іонізаційного напилення (Sputtering), йонно-плазмового напилення в умовах йонного бомбардування (КІБ) [1].

2. Аналіз останніх досліджень. Аналіз існуючих методів нанесення вакуумних йонно-плазмових покриттів, етапів їх створення, дослідження будови і властивостей дозволяє зробити деякі наступні висновки і окреслити шляхи подальших досліджень в цій галузі. Відзначаючи суттєві переваги методу КІБ поряд з існуючими, враховуючи також наявність вітчизняного технологічного обладнання, а саме установок типу „Булат”, основну увагу при розробці вакуумних йонно-плазмових конденсатів і дослідженні їх властивостей слід сконцентрувати в подальшому на методі конденсації речовини з плазмової фази в умовах йонного бомбардування.

Загальновідомим є той факт, що йонно-плазмові покриття, що наносяться методом КІБ, знайшли широке застосування для підвищення стійкості металорізального інструменту. Так, покриття з нітриду титану дозволяє зменшити на 20...30 % силу тертя при різанні конструкційних сталей, на 15...20 % - коефіцієнт усадки стружки і зусилля різання, понизити температуру в зоні різання, значно підвищити стійкість інструмента і продуктивність механічної обробки. На сьогоднішній день детально вивчено вплив параметрів процесу КІБ на властивості покриттів і основи, а також працездатність інструментів з покриттями на основі хімічних сполук TiN, ZrN, Mo₂N, TiC та іншими. Дослідженням фізики процесу йонно-плазмового напилення та впливу покриттів на експлуатаційні характеристики матеріалів присвячені роботи В.Г.Падалки, А.А.Еттінганга, А.І.Анікеева, В.П.Табакова, В.А.Синопальникова, І.І.Аксьонова, А.А.Андрєєва, В.М.Мацевитого, О.В.Соболя, С.В.Малихіна, В.М.Шулаєва та інших. Розроблений арсенал покриттів, що одержуються мето-

дом КІБ, застосовано в основному для інструментальних сталей і твердих сплавів. Більшість досліджень спрямовано на оптимізацію електрофізичних характеристик процесу та вдосконалення конструкції установок.

Актуальним залишається проведення досліджень впливу технологічних параметрів процесу КІБ і конструктивних особливостей нанесення покриттів на такі характеристики як товщина, шорсткість, суцільність. Важливим чинником перед початком технологічного процесу нанесення покриттів є розроблення технології попереднього очищення і знежирення виробу. Майже зовсім відсутні дослідження ряду властивостей йонно-плазмових покриттів з позиції фізико-хімічної механіки матеріалів – наукового напрямку, що враховує при оцінюванні довговічності і несучої здатності матеріалів вплив зовнішнього середовища, або одночасної дії механічних навантажень і робочих середовищ.

3. Постановка завдання. Оскільки вакуумні йонно-плазмові покриття широко використовуються для зміцнення різального інструменту та у парах тертя, то основним об'єктом дослідження є їх зносостійкість. В той же час специфіка умов експлуатації інструменту, деталей машин та технологічного оснащення характеризується тим, що під час роботи вони зазнають сукупного впливу механічних навантажень, робочих середовищ та високих температур. В зв'язку з тим, що такі покриття володіють високими фізико-механічними та експлуатаційними властивостями при малій товщині, точно відтворюють геометричні особливості поверхні основи, їх часто наносять на інструменти та деталі малих розмірів і складної конфігурації, які використовуються у технологічних процесах різноманітних виробництв, в тому числі хімічного, харчового, целюлозно-паперового та інших, де вплив робочого середовища має велику питому вагу серед інших факторів, що спричиняють руйнування поверхні. Тому в статті наведено також і результати досліджень їх корозійної стійкості, стійкості проти корозійно-механічного, кавітаційно-ерозійного зношування та корозійно-втомної міцності.

4. Основні результати досліджень.

4.1. Товщина і шорсткість покриттів. Дослідження впливу сили струму дуги, відстані між катодом і підкладкою та тиску реакційного газу на товщину і шорсткість покриттів проводили з використанням катодів із Ni, TiN, Ti (без газу та в середовищі Ar). Встановлено, що із зростанням сили струму майже пропорційно зростає товщина покриттів як з чистих металів, так і з нітридів (рис. 1).

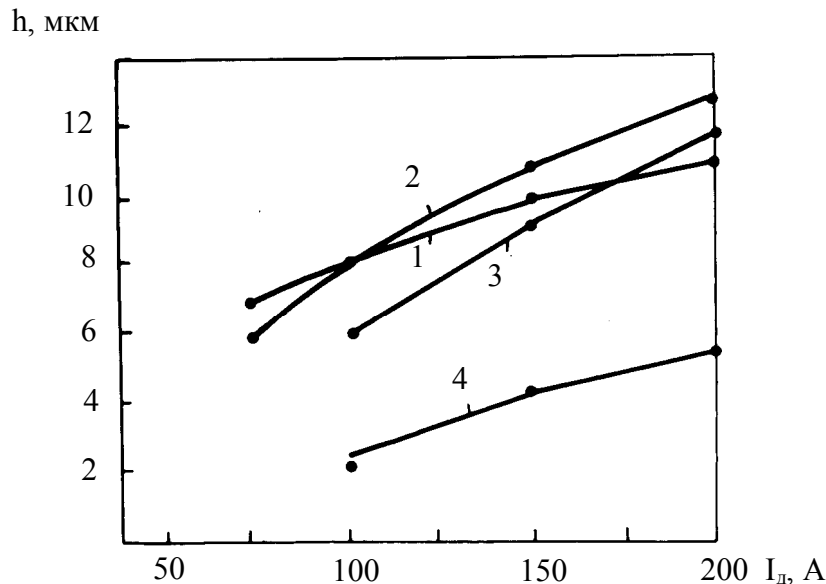


Рис. 1. Залежність товщини покриттів h від сили струму дуги I_d випаровувача ($U_n=150$ В, відстань між випаровувачем і підкладкою 250 мм, тиск газів $P_{N_2}=0,4$ Па; $P_{Ar}=0,06$ Па; $\tau=1$ год): 1 – покриття з Ti; 2 – покриття з TiN; 3 – покриття з Ni (в середовищі Ar); 4 – покриття з Ni на зразку, що обертається

Зі збільшенням сили струму дуги зростає густина потоку плазми [2]. Однак з відносним зменшенням вмісту йонної складової в потоці уповільнюється швидкість осадження конденсатів. Особливо це помітно для покриття на основі TiN, де через наявність в камері великої кількості легуючого газу зменшується ймовірність осадження покриттів з газової фази. Швидкість їх осадження на поверхню, що обертається, в 2,5...3 рази менша, ніж на нерухомі зразки, встановлені під кутом 90° відносно напрямку плазмового потоку.

Особливістю технології йонно-плазмового напилення є те, що відносно суцільні покриття утворюються не тільки на лицьовій поверхні деталі, а і на затінених ділянках. В зв'язку з цим було досліджено залежність товщини покриттів з Ti та Ni від кута падіння плазмового потоку. Встановлено, що швидкість осадження конденсатів на зворотню поверхню зразків (при куті 270°) в 4...5 разів нижча, ніж при 90° . Причому відносна швидкість осадження покриттів з Ni на зворотню поверхню вища, ніж у Ti, що пов'язано з більшим вмістом парової фази в плазмовому потоці при випаровуванні Ni.

Зі збільшенням сили струму дуги різко зростає вміст крапельної фази, потрапляння якої на підкладку збільшує шорсткість поверхні за рахунок утворення на ній великої кількості мікрівключень у вигляді крапель розмірами від десятих долей до 10...20 мкм (рис. 2). Наявність таких включень особливо небажана при одержанні зносостійких покриттів. Застосування способу сепарації дозволяє майже повністю виключити можливість потрапляння мікрокрапель на поверхню, в результаті чого шорсткість зразка з покриттям дорівнює шорсткості зразка без покриття і в три рази менша, ніж при напиленні зразка без застосування сепарації плазмового потоку.

В залежності від характеру горіння вакуумної дуги для кожного матеріалу катода внаслідок сукупного впливу теплових, електричних і механічних факторів навіть при найбільш стабільних режимах без застосування сепарації шорсткість поверхні покриттів буде різною (рис. 3.). При жорстких вимогах до якості поверхні необхідно наносити покриття з використанням захисних екранів або інших методів сепарації. Висока шорсткість покриттів Ni і Nb викликана нестабільним горінням вакуумної дуги. Підвищений вміст крапельної фази в плазмі зі сталі 12X18H10T обумовлений нерівномірним випаровуванням різних фаз багатокомпонентного матеріалу катода.

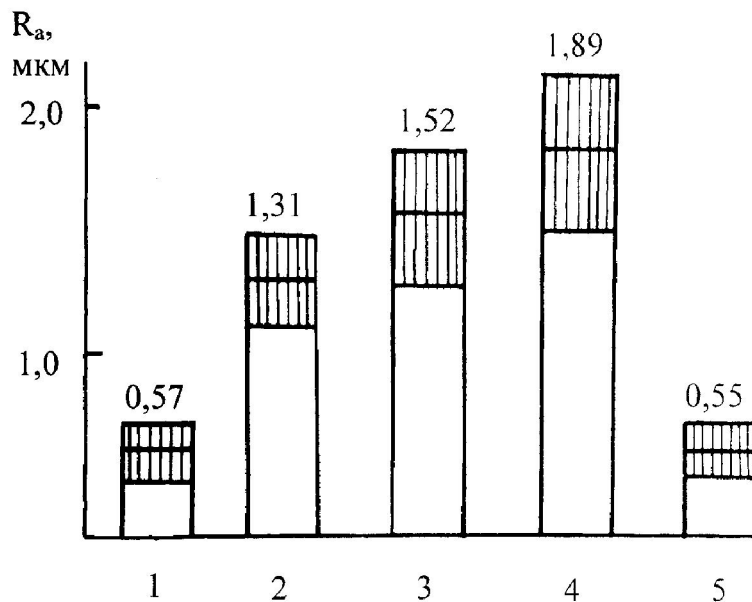


Рис. 2. Шорсткість поверхні R_a вихідного зразка та зразків з покриттям з Ni ($U_p=150$ В, $L = 250$ мм, $\tau = 1$ год, $P_{Ar} = 0,06$ Па): 1 – вихідний зразок; 2 - $I_d = 100$ А; 3 - $I_d = 150$ А; 4 - $I_d = 200$ А; 5 - $I_d = 150$ А (з сепарацією)

4.2. Суцільність покриттів. У зв'язку з малими товщинами досліджуваних покриттів визначення їх пористості класичними об'ємними методами (як відношення об'єму пор до загального об'єму конденсатів) є неможливим. Тому відносно суцільність вакуумних йонно-плазмових покриттів оцінювали шляхом порівняння корозійної стійкості зразків з покриттями, що були осаджені за різними режимами, зі зразками без покриття. Корозійну стійкість досліджували в 5%-му розчині

фосфорної кислоти. Таке середовище обране, виходячи із необхідності забезпечення рівномірного протікання корозійних процесів через пори в покритті при умові відсутності яскраво вираженого гальванічного ефекту в системі „метал – покриття”, що підтверджується електрохімічними дослідженнями властивостей захисних покриттів в різних середовищах. Для даного середовища покриття не було катодним, тобто швидкість корозії для нього з часом зростала з відшаруванням захисної плівки, але не перевищувала швидкості розчинення зразка без покриття. Втрату маси зразків визначали через 1, 3 і 6 діб. Результати досліджень залежності суцільності покриття від кута падіння плазмового потоку показують, що зі зменшенням кута напilenня суцільність суттєво змінюється (рис. 4). Властивості покриттів при куті напilenня $\alpha = 90^\circ$ і $\alpha = 60^\circ$ практично однакові, а зі зменшенням кута до 45° і нижче суцільність покриття значно погіршується. Це пояснюється появою затемнених зон як від мікронерівностей поверхні, так і від осадження та розтікання мікрокрапель, що переносяться плазмовим потоком і також створюють затемнювальний ефект.

Шорсткість поверхні підкладки суттєво впливає на суцільність покриттів. Причому основну роль в утворенні пор в підкладці відіграють не так самі мікронерівності, як мікрокраплі, що потрапляють на нерівні ділянки поверхні. При цьому утворюються особливо сприятливі умови для затінення поверхні. Доказом ролі мікрокрапель є підвищення корозійної стійкості титанового покриття, що осаджене в середовищі аргону, в порівнянні з таким, що отримане у вакуумі без напуску робочих газів (рис. 5). Стабільність горіння дуги при наявності аргону є вищою, і на поверхню підкладки потрапляє значно менша кількість краплин, ніж при випаровуванні титану у вакуумі, коли часте підпалювання дуги супроводжується викиданням значної кількості мікрокрапель. Зі збільшенням струму дуги зростає швидкість напilenня. Вплив температури підкладки при напilenні фактично може обмежуватись її впливом на напружений стан конденсатів. Значення температури повинно бути таким, щоб не викликати великих залишкових напружень, що може призвести до виникнення внутрішніх надривів з утворенням мікротріщин.

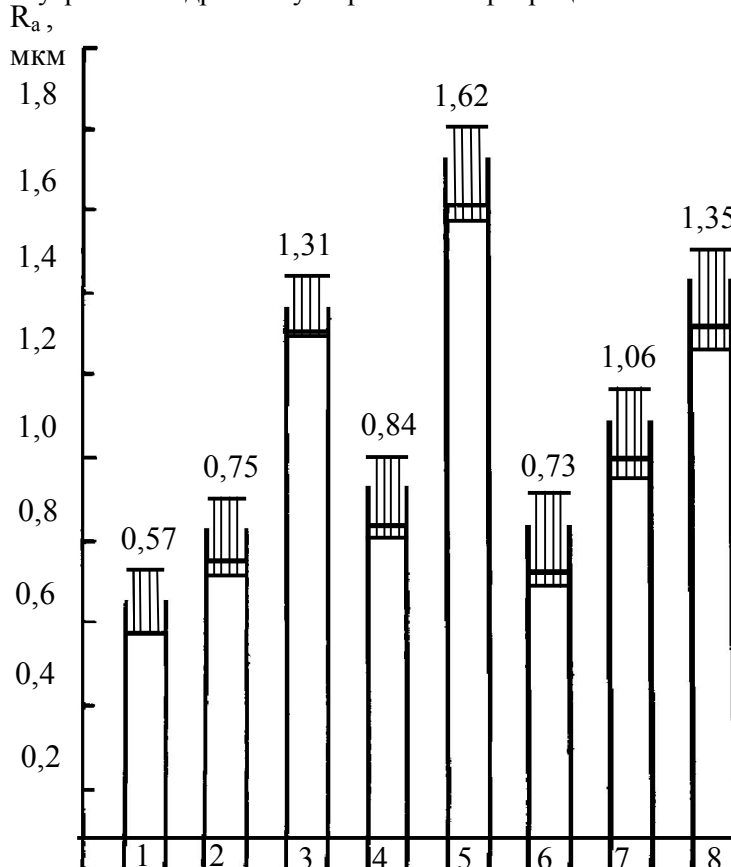


Рис. 3. Шорсткість поверхонь з покриттями: 1 – сталь Ст.3 без покриття; 2 – покриття TiN; 3 – покриття з Ni; 4 – покриття з Ti; 5 – покриття зі сталі 12X18H10T; 6 – покриття з Mo; 7 – покриття з Nb; 8 – покриття з ФХ 00 ($U_p = 150$ В; $I_d = 100$ А; відстань між випаровувачем і підкладкою 250 мм; $P_{Ar} = 0,06$ Па; $\tau = 1$ год)

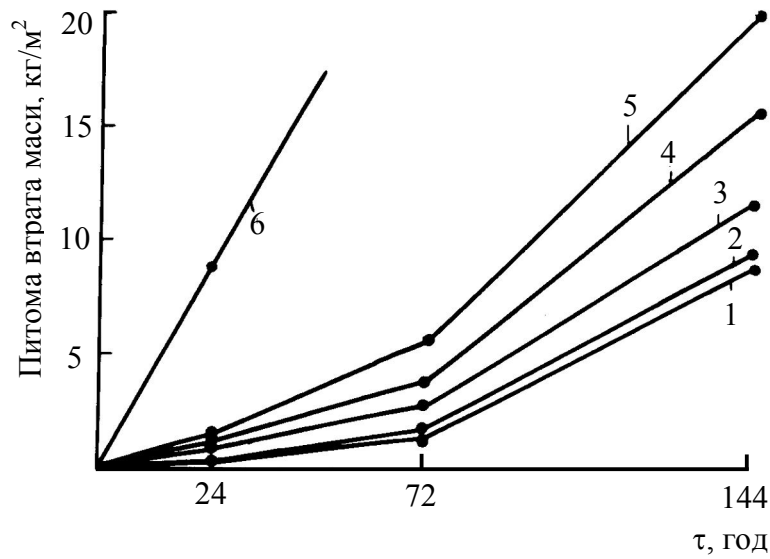


Рис. 4. Корозійна стійкість сталі Ст.3 з покриттям з титану в 5%-му розчині H_3PO_4 ($R_z = 10$ мкм): 1 - кут падіння плазмового потоку $\alpha = 90^\circ$; 2 - $\alpha = 60^\circ$; 3 - $\alpha = 45^\circ$; 4 - $\alpha = 30^\circ$; 5 - $\alpha = 0^\circ$; 6 - сталь без покриття

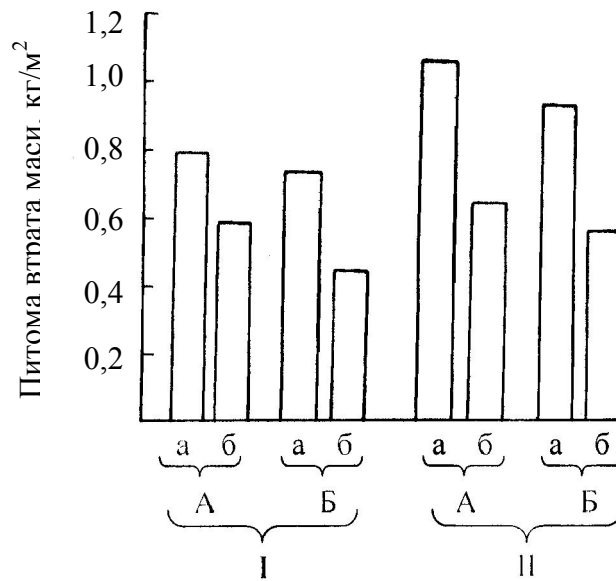


Рис. 5. Корозійна стійкість сталі Ст.3 з покриттями з титану в 5%-му розчині H_3PO_4 ($\tau = 24$ год): I - $I_d = 100$ А, $\tau_{нап} = 1$ год, $R_z = 10$ мкм; II - $I_d = 150$ А, $\tau_{нап} = 45$ хв, $R_z = 10$ мкм; А - наплення без легуючого газу; Б - наплення в середовищі аргону при $P_{Ar} = 0,07 \dots 0,08$ Па; а - кут наплення $\alpha = 45^\circ$; б - $\alpha = 90^\circ$

4.3. Корозійна стійкість. Дослідження корозійної стійкості та інших властивостей проводили на зразках з покриттями, хімічний склад яких та умови осадження наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Режими осадження вакуумних конденсатів

№	Компоненти покриття	Матеріал випаровувача і струм дуги, А		Робочий газ	Тиск газу, Па	Опорна напруга, В	Температура підкладки, °С	Товщина покриття, мкм
		I випаровувач	II випаровувач					
1	Ti	Ti/100	-	-	-	150	350	5...6
2	Ti-N	Ti/100	-	N ₂	0,4...0,5	150	350	5...6
3	Ti-N	Ti/100	-	N ₂	0,4...0,5	150	450	4
6	Ti-Ni-N	Ti/100	Ni/100	N ₂	0,4...0,5	150	400	5...6
7	Ti-Ni-N	Ti/100	Ni/170	N ₂	0,4...0,5	150	400	5...6
8	Ti-Ni-N	Ti/100	Ni/150	N ₂	0,4...0,5	150	400	5...6
10	Ti-Ni-N	Ti/100	Ni/70 ^{*)}	-	-	200	400	4
12	Ti-Ni-N	Ti/100	Ni/100 ^{*)}	-	-	200	400	4...5
13	Ti-Ni-N	Ti/100	Ni/70	-	-	160	400	4...5
14	Ti-Ni-N	Ti/100	Ni/100 ^{**)}	-	-	200	400	4...5
15	Ti-Ni-N	Ti/100	Ni/150 ^{**)}	-	-	200	400	4...5
16	Ni	Ni/100	-	Ar	0,3...0,4	150	300	5...6
21	Mo-N	Mo/180	-	N ₂	0,4...0,5	150	450	6...7
22	Mo-N	Mo/180	-	N ₂	0,4...0,5	170	450	4...5
23	Mo-Ni-N	Mo/200	Ni/100	N ₂	0,07...0,08	170	450	6...7
24	Mo-Ni-N	Mo/200	Ni/100	N ₂	0,3...0,4	170	450	6...7
25	Mo-Ni-N	Mo/200	Ni/150 ^{*)}	N ₂	0,07...0,08	170	450	6...7
26	Mo-Ni-N	Mo/180	Ni/150 ^{*)}	N ₂	0,07...0,08	170	450	4...5
30	ФХ00	ФХ00/100	-	-	-	150	300	6...7

^{*)} - наплення з нікелевого катода з суцільним сепаратором;

^{**)} - наплення з нікелевого катода зі щільним сепаратором

Корозійну стійкість покриттів досліджували в різних розчинах кислот ваговим методом за методикою [4]. Її оцінювали за питомою швидкістю корозії (г/мм²·год) і коефіцієнтом захисту

$$\eta = \frac{K_{б.п.}}{K_n},$$

де $K_{б.п.}$ і K_n – відповідно швидкості корозії непокритого і покритого зразків.

З порівняння швидкостей корозії шліфованих зразків і зразків з покриттям з TiN (№ 2) випливає (табл. 2), що ефективність гальмування корозії покриття з нітриду титану зростає в порівнянні зі шліфованою сталлю у всіх досліджуваних середовищах [5]. Характерно, що із збільшенням температури середовища в бн H₂SO₄ захисні властивості покриття з TiN реалізуються повніше. Тривалість корозійних випробувань становила: при 22⁰С – 100 год, при 30⁰С – 4 год, при 60⁰С – 1 год, при 90⁰С – 0,4 год.

Результати досліджень швидкості корозії зразків зі сталі Ст. 3 з композиційними та двошаровими покриттями в різних кислотних середовищах наведено на рис. 6,7,8 [6].

Таблиця 2

Середовище	Корозійна стійкість сталі 40Х				Коефіцієнт захисту при Т, °С			
	Втрата маси при температурі середовища, г/м ² ·год							
	22 ⁰ С	30 ⁰ С	60 ⁰ С	90 ⁰ С	22 ⁰ С	30 ⁰ С	60 ⁰ С	90 ⁰ С
6н Н ₂ SO ₄	-	70,40	1081,39	6988,88	-	2,3	2,9	3,6
3% - NaCl	0,08	29,89	368,1	1916,11	2,0	-	-	-
Протічна вода	0,04	-	-	-	1,6	-	-	-
	0,08	-	-	-				
	0,05							

Примітка: Над рискою – дані для сталі без покриття, під рискою – з покриттям із TiN (№ 2)

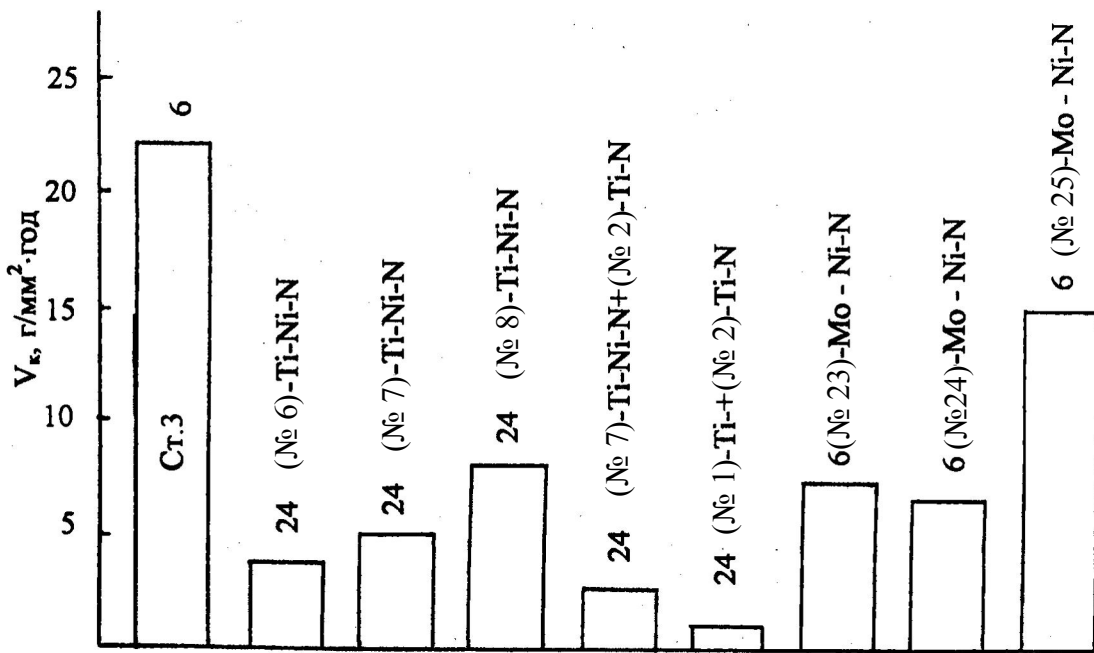


Рис. 6. Швидкість корозії зразків зі сталі Ст. 3 з композиційними і двошаровими покриттями в 5%-му розчині H₂SO₄. Тут і далі цифрами над гістограмами вказана кількість годин випробувань

Найбільшою стійкістю до корозії в середовищах 5%-их розчинів H₂SO₄ і HCl володіють двошарові покриття з робочим шаром з TiN і підшарами з Ti і з Ti-Ni-N, а в середовищі 5%-го розчину H₃PO₄ – ще і з підшаром з Ti-C. Це можна пояснити більш низькою пористістю за рахунок осадження „м'яких” підшарів і менш інтенсивним розростанням суцільних мікропор під дією середовища при менших залишкових напруженнях. Низька корозійна стійкість покриттів Ti-Ni-N (№ 8), Mo-Ni-N (№ 23), Mo-Ni-N (№ 24) в розчині H₂SO₄, а особливо в розчинах H₃PO₄ і HCl пояснюється в першу чергу їх підвищеною пористістю за рахунок крапельної фази в продуктах ерозії. Двошарові покриття Ti+(Ti-N) (№1+№2) та (Ti-Ni-N) + (Ti-N) (№7+№2) є достатньо еластичними, тому збільшення товщини шару не призводить до суттєвого збільшення напруженого стану в покритті, а внаслідок збільшення товщини покриття закономірно зростає корозійна стійкість за рахунок зменшення пористості.

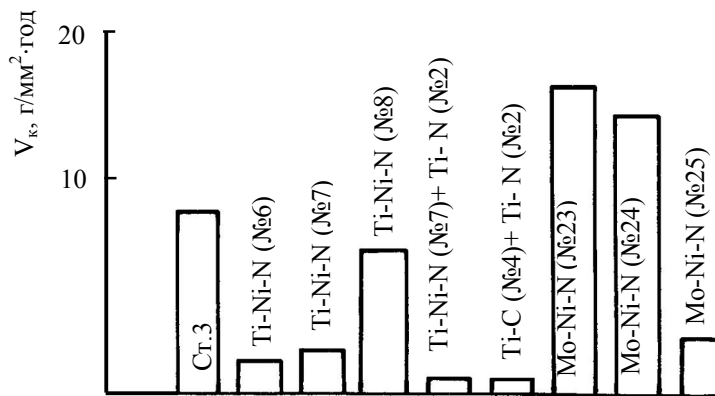


Рис. 7. Швидкість корозії зразків зі сталі Ст. 3 з композиційними і двошаровими покриттями в 5%-му розчині H₃PO₄ (24 години випробувань)

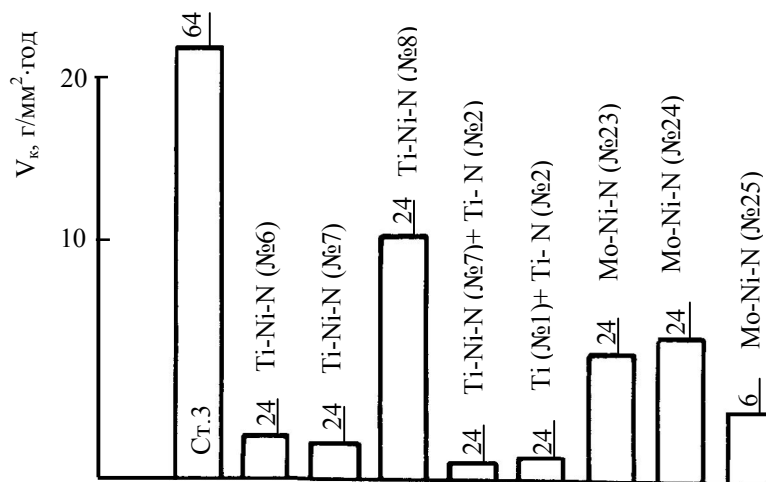


Рис. 8. Швидкість корозії зразків зі сталі Ст. 3 з композиційними і двошаровими покриттями в 5%-му розчині HCl

4.4. Стійкість покриттів в умовах корозійно-механічного зношування. Експерименти проводили на установці торцевого тертя за методикою [7]. В якості робочих середовищ використовували „жорстку” воду з постійною жорсткістю 3 мг екв (0,123 г MgSO₄·7H₂O + 0,147 г CaCl₂·2H₂O на 1 л дистильованої води) і приготовлений на цій воді 3%-ий розчин змашувально-охолоджувальну рідину (ЗОР) „Укринол - 1”, який являє собою емульсол на основі мінеральної олії, емульгаторів та інгібіторів корозії.

В таблиці 3 наведено електрохімічні характеристики досліджуваних покриттів. Значення струмів саморозчинення при терті в умовах „жорсткої” води ($i_{тр}$) і в 3%-му розчині „Укринол - 1” ($i'_{тр}$) отримані шляхом екстраполяції потенціодинамічних поляризаційних кривих. Кількісно характеристика дії ЗОР як інгібітора, що сповільнює швидкість корозії, виражається ступенем захисту

$$Z = \frac{i - i'}{i} \cdot 100\%,$$

де i, i' – швидкість корозії без інгібітора і за наявності інгібітора відповідно [8].

Розглянемо вплив тертя на протікання електрохімічних процесів при випробуванні покриттів в „жорсткій” воді. Як видно із таблиці 3, електродні потенціали всіх покриттів при терті по фторопласту $\varphi_{тр}$ змістились в порівнянні з $\varphi_{ст}$ в додатню область на 30...100 мВ, що можна пояснити облегшенням катодного процесу завдяки більшому надходженню кисню при інтенсивному

перемішуванні середовища, а також зниженням ролі анодного процесу внаслідок утворення пасивних захисних плівок.

Таблиця 3

Електрохімічні характеристики йонно-плазмових покриттів в досліджуваних середовищах

Покриття	Вода „жорстка”			3%-ний „Укринол - 1”		Ступінь захисту Z, %
	фст, мВ	фтр, мВ	i _{тр} , А/м ²	фтр, мВ	i _{тр} , А/м ²	
TiN (№ 3)	- 525	- 425	0,129	- 300	0,015	88
Ni (№ 16)	- 420	- 390	0,074	- 245	0,037	50
Ti (№ 1)	- 465	- 420	0,026	- 340	0,011	58
FeCr (№ 30)	- 490	- 440	0,107	- 340	0,012	89

Додавання до „жорсткої” води „Укринол - 1” викликає гальмування катодних, а ще в більшій мірі - анодних процесів, що призводить до значного зсуву електродних потенціалів $\phi_{тр}$ в анодну область (на 80...145 мВ). Інгібуюча дія ЗОР проявляється в тому, що швидкість корозійних процесів, які оцінюються за струмами саморозчинення, різко зменшується. Найбільший ефект гальмування корозійних процесів (до 90 %) має місце на покриттях з TiN (№ 3) і FeCr (№ 30) і значно менший (до 60 %) - на покриттях з Ni (№ 16) і Ti (№ 1).

4.5. Стійкість покриттів в процесі кавітаційно-ерозійного зношування. Випробування на зношування в умовах кавітації і ерозії в корозійному середовищі проводили за допомогою установки УЗДН-2Т з використанням ультразвука згідно методики [9]. Досліджено кавітаційно-ерозійну стійкість зразків із сталі 45 нормалізованої з покриттям із нітриду титану (№ 2), а також тієї ж сталі без покриття (нормалізованої і об'ємно-загартованої) в середовищі 3%-ного водного розчину NaCl (рН 6,8), дистильованої і водопровідної води. Порівняльні дослідження показали (рис. 9), що в умовах дії агресивних середовищ покриття із TiN значно підвищують кавітаційно-ерозійну стійкість сталі 45 [5]. Порівняно менше підвищення стійкості проти кавітаційно-ерозійного зношування в дистильованій воді поряд з іншими середовищами викликано малою товщиною (6 мкм) і великою крихкістю конденсата, що призводить до його проламування під дією циклічних локальних навантажень.

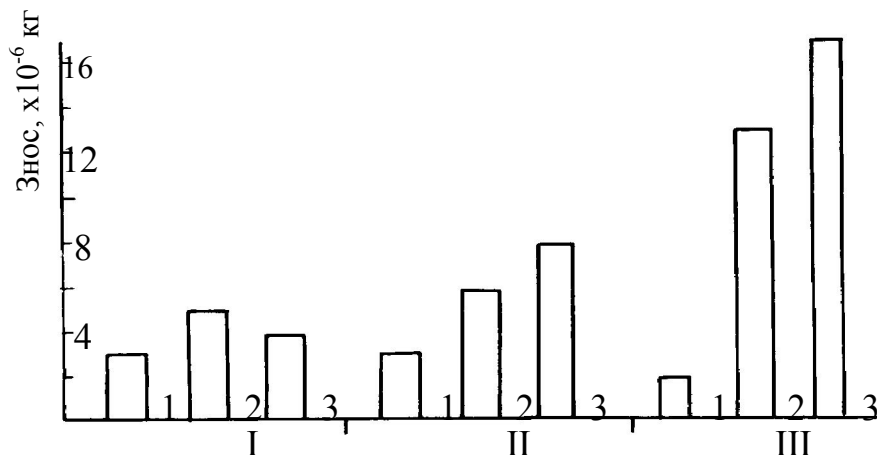


Рис. 9. Кавітаційно-ерозійна стійкість сталі 45 з покриттям № 2 із TiN (1), без покриття – нормалізованої (2) і загартованої (3): I – дистильована вода; II – водопровідна вода; III – 3 % - ний розчин NaCl

Стійкість більш пластичних покриттів Ti-Ni-N (№ 15, № 13) і Mo-Ni-N (№ 23, № 24) недостатня, що, очевидно, викликано низькою корозійною стійкістю таких покриттів (рис. 10).

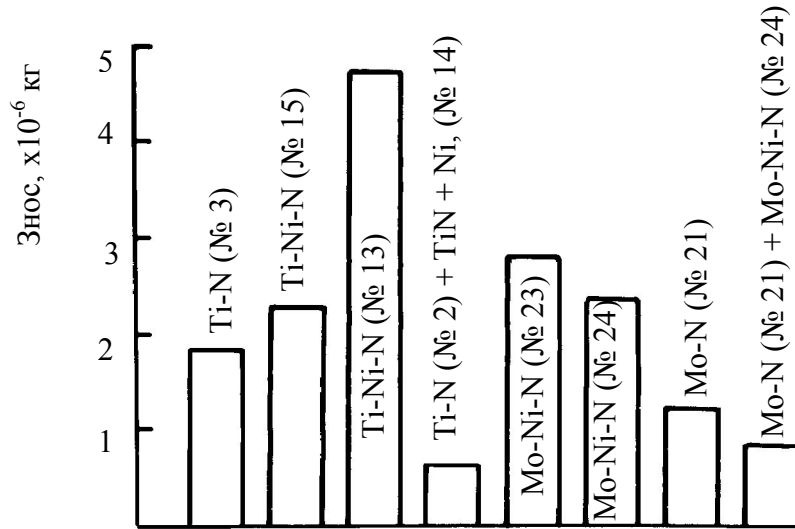


Рис. 10. Стійкість проти кавітаційно-ерозійного зношування сталі 45 нормалізованої з покриттями в 3 % - му розчині NaCl (час випробувань 2 год)

Найбільший захисний ефект досягається при застосуванні двошарових покриттів, зокрема, Ti-N (№ 2) + (TiN+ Ni, № 14), а також покриття Mo-N (№ 21) з підшаром Mo-Ni-N (№ 24). Верхній шар таких конденсатів має високі міцнісні властивості і високу корозійну стійкість, нижній шар є демпферним і запобігає прогину верхнього шару.

4.6. Корозійно-втомна міцність. Дослідження проводили на установці ИМА - 5 [10] за схемою чистого згину при обертанні зразка з частотою 50 с^{-1} . Визначали втому зразків зі сталі 45 відпаленої з покриттям із TiN і без покриття на повітрі і в 3 % - му розчині NaCl. База випробування складала $5 \cdot 10^7$ циклів. Встановлено [5], що умовна границя корозійної втоми сталі 45 з покриттям з TiN (№ 2) в середовищі 3 % - го розчину NaCl в 2 рази вища, ніж без покриття (рис. 11). Втомна міцність зразків з покриттям з TiN на повітрі змінюється порівняно мало (завдяки високій крихкості і незначній товщині покриття) і складає приблизно 220 МПа, тобто знаходиться на рівні втомної міцності сталі 45 у відпаленому стані.

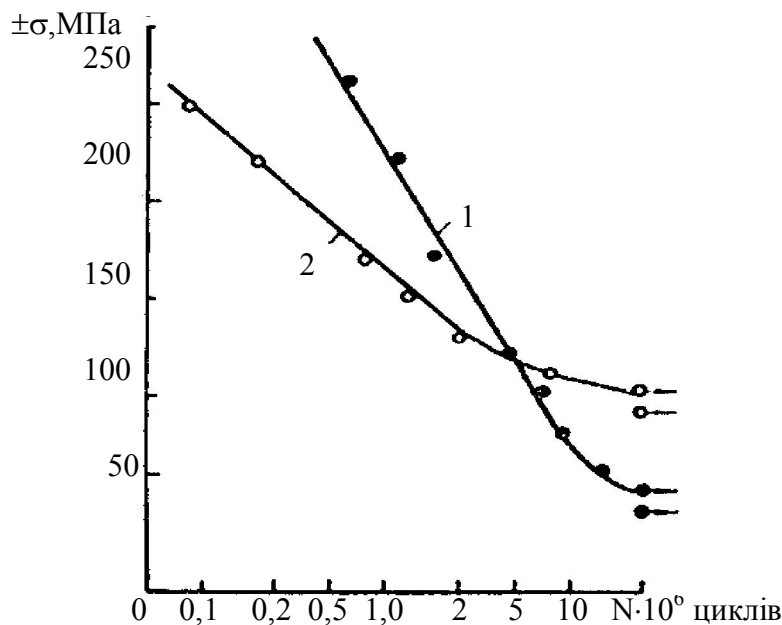


Рис. 11. Циклічна міцність сталі 45 без покриття (1) і з покриттям TiN (№2) в 3%-му розчині NaCl (2)

4.7. Зносостійкість покриттів в умовах граничного тертя. Дослідження проводили на машині тертя 2070 СМТ-1 за схемою кільце-вкладка в середовищі масла „Індустріальне І-20”. З метою виключення можливості виникнення високих локальних навантажень на початковій стадії процесу тертя напilenня з нікелевого катода проводили з суцільним і щільним сепараторами з метою відокремлення мікрокрапельних фаз, а також перед дослідженнями проводили додаткове зачищення поверхонь до повного зникнення мікронерівностей. Така обробка дозволила повністю виключити процес схоплювання для більшості покриттів. Результати досліджень триботехнічної „поведінки” зачищених покриттів в умовах граничного тертя наведено на рис. 12, 13, 14.

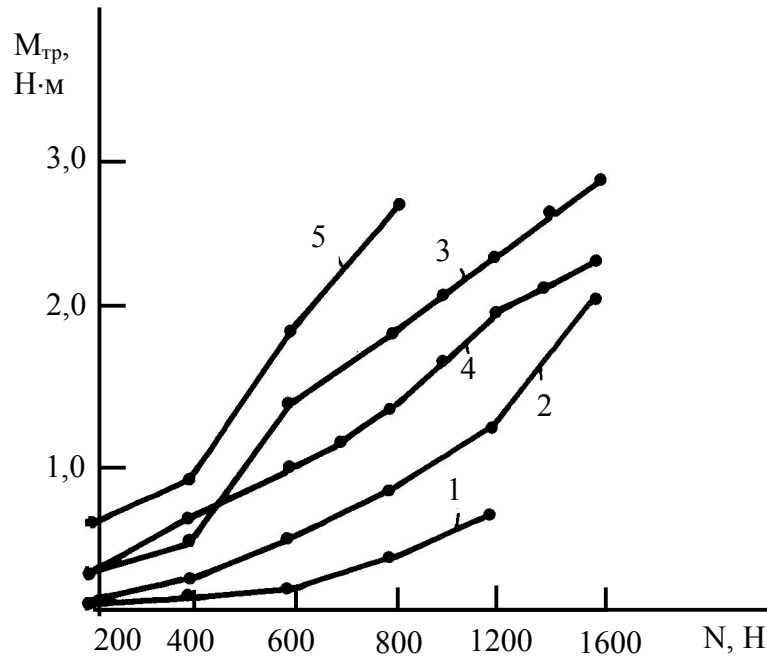


Рис. 12. Залежність моментів тертя пари „сталь 45 загартована – сталь 45 з покриттями” від навантажень: 1 – Ti-N (№3); 2 – Ti-Ni-N (№15, 7% Ni); 3 – Ti-Ni-N (№12, 1,9% Ni); 4 – Ti-Ni-N (№13, 45% Ni); 5 – Mo-Ni-N (№26, 5...7% Ni)

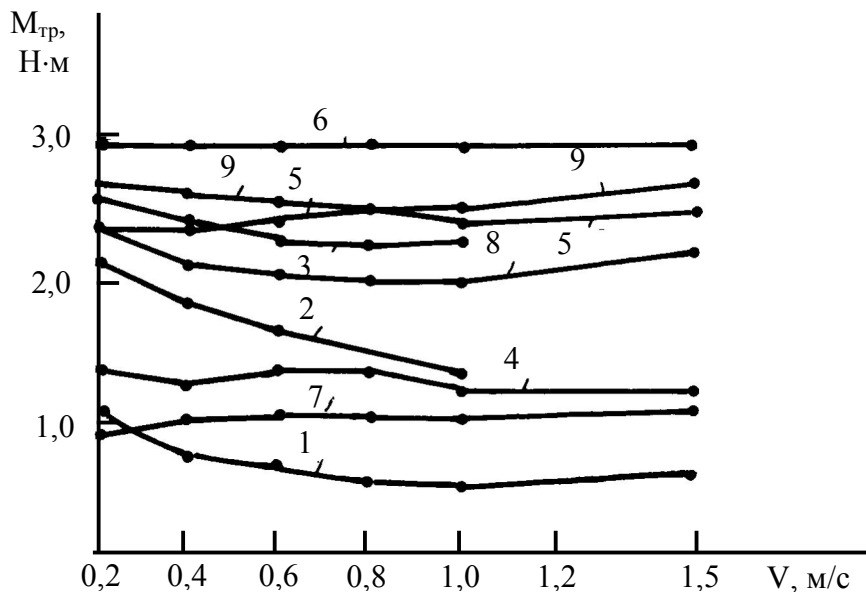


Рис. 13. Залежність моменту тертя від швидкості ковзання: 1,2,3 – покриття Ti-N (№3); 4,5,6 – Ti-Ni-N (№12); 7,8,9 – Ti-Ni-N (№15); 1,4,7 – навантаження 600 Н; 2,5,8 – 1000 Н; 3,6,9 – 1200 Н

Для всіх досліджуваних покриттів характерними є збільшення моменту тертя при підвищенні навантаження. Значення моментів тертя для покриттів Ti-Ni-N (№12, №13, №15) суттєво не відрізняються, не дивлячись на зміну складу конденсатів. Покриття з чистого TiN (№3) мають найнижчий коефіцієнт тертя при різних навантаженнях і швидкостях ковзання. Як видно, для більшості режимів випробування покриттів швидкість тертя 1,0 м/с є найбільш оптимальною.

Дослідження величини зносу гравіметричним методом показало, що найкращою стійкістю володіє покриття Ti-N (№3), а також Ti-Ni-N (№12) (рис. 14). Покриття №12 зношується дещо більше, однак інтенсивність величини зносу у нього значно нижча, ніж у покриття №3. Слід зауважити, що підвищення вмісту нікелю до 7 % (покриття Ti-Ni-N (№15)) і 45% (покриття Ti-Ni-N (№13)) призводить до суттєвого підвищення стійкості покриттів, при цьому значно менше зношується і контртіло.

Таким чином, застосування вакуумних йонно-плазмових покриттів може суттєво підвищити зносостійкість деталей машин з вуглецевих нетермооброблених сталей. В залежності від режимів роботи вузлів тертя можна застосувати покриття Ti-N (№3) і Ti-Ni-N (№12) при умові необхідності забезпечення високої стійкості тільки однієї деталі спряження або покриття Ti-Ni-N (№15, №13) для забезпечення необхідної стійкості всієї пари тертя. Застосування цих покриттів є незамінним для деталей машин, зміцнення термічною обробкою яких з тих чи інших причин неможливе.

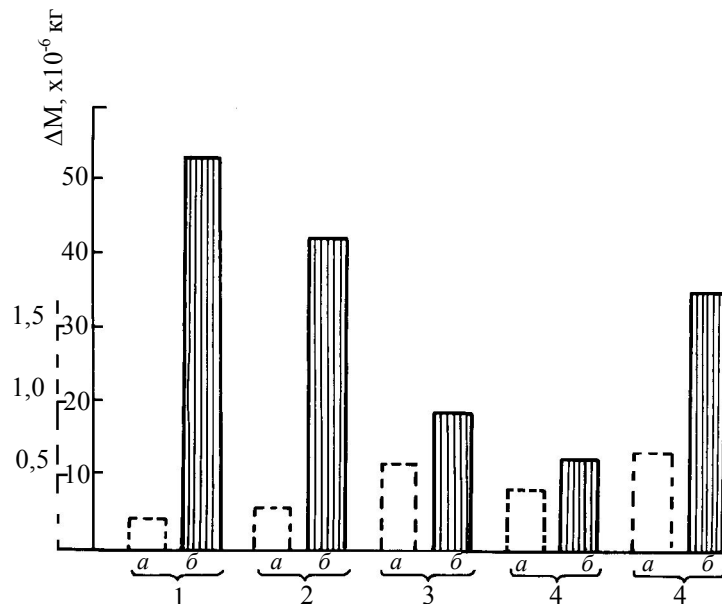


Рис.14. Зношування кільця (а) і вкладки (б-заштриховані стовпчики) при терті з покриттями: 1 – Ti-N (№3); 2 – Ti-Ni-N (№12); 3 – Ti-Ni-N (№15); 4 – Ti-Ni-N (№13); 5 – Mo-N (№22)

4.8. Зносостійкість інструментальної сталі з покриттями в умовах моделювання процесу різання. З метою виявлення можливості застосування розроблених йонно-плазмових покриттів для зміцнення інструменту проведено дослідження зносостійкості зразків з покриттями при тестуванні в лабораторних умовах за схемою „клин-диск”. За таких умов забезпечувались порівняно високі локальні тиски в контакті, наближені до умов тертя при роботі металорізального інструменту. В таблиці 4 наведено найбільш характерні результати досліджень.

Аналізуючи наведені результати, можна зробити висновок про те, що найбільшою зносостійкістю на більшості досліджуваних режимах тертя володіють покриття №14 + №2 ((TiN+Ni) + TiN). Причому, чим важчими є умови роботи, тим вищою є ефективність застосування цього покриття. Покриття №10 (TiN+Ni) при даних режимах тертя має невисоку стійкість, що, очевидно, пояснюється його нижчою твердістю. Таким чином, для зміцнення металорізального інструменту, що працює в умовах безперервного різання і зазнає адгезійно-втомного зношування, найбільш ефективним є двошарове покриття (TiN+Ni)+TiN (№14 + №2).

Зносостійкість інструментальних сталей в умовах різання визначаються фізичними явищами в зоні тертя. Зі зміною фізичних властивостей контактних поверхонь змінюються і умови тертя, а отже і характер зношування. Покриття суттєво змінює характер взаємодії контактуючих матеріалів. ©О.Б.Гасій, В.М.Голубець

лів, зменшує коефіцієнт тертя, схильність до адгезії зі стружкою. В результаті цього змінюються температурні поля в зоні різання, зменшуються ділянки пластичного контакту і зовнішнього тертя, що в свою чергу знижує загальну потужність джерела тепла. Аналіз температурних діаграм ріжучого клина із швидкоріжучої сталі показує, що напilenня покриттів приводить до незначного ($\approx 20-25^{\circ}\text{C}$) зниження температури в зоні контакту [11]. Такого незначного зниження температури достатньо, щоб під дією процесів динамічної рекристалізації загальмувати незворотне розміщення сталі біля задньої поверхні інструменту і підвищити його стійкість.

В покритті (TiN+Ni)+TiN (№14 + №2), що продемонструвало найвищу зносостійкість в умовах моделювання процесу різання, основним матеріалом робочого шару є TiN, який має задовільні фізико-механічні (високу твердість та великий модуль пружності) і зносотривкі властивості при високих температурах, є хімічно інертним (зменшує коефіцієнт тертя і температуру в зоні різання), добре наноситься плазмовим напilenням. Підшар TiN+Ni служить для міцного зчеплення покриття з основою, забезпечує еластичність і узгоджує теплофізичні характеристики з робочим шаром. Схему будови цього покриття наведено на рис. 15.

Таблиця 4

Характеристики тертя і зношування зразків в різних серіях дослідів

Наявність покриття на поверхні		Швидкість ковзання, V, м/с	Навантаження на зразок, кН	Середня інтенсивність зношування на шляху 5 км, j, мм/км	Шлях тертя для досягнення фаски зносу 0,5 мм, км	Інтервал зміни сили тертя, Н	Наявність різких скачків сили тертя
передній	задній						
–	–	1,2	0,43	0,65	0,1	35...120	+
(Ti-N), №2	(Ti-N), №2	1,2	0,43	0,26	0,2	50...60	+
(Ti-N)+Ti, (№2+№1)	–	1,2	0,33	0,28	0,3	15...30	+
– " –	(Ti-N)+Ti, (№2+№1)	1,2	0,33	0,24	0,45	18...20	–
– " –	– " –	1,2	0,53	0,11	3,6	25...67	+
– " –	– " –	1,2	0,63	0,13	0,7	27...53	–
– " –	– " –	2,0	0,33	0,14	4,2	27...35	+
(Ti-N)+ (Ti-Ni-N), (№2+№14)	(Ti-N)+ (Ti-Ni-N), (№2+№14)	1,2	0,33	0,08	10,0	33...38	–
– " –	– " –	1,2	0,43	0,13	1,3	33...38	–
– " –	–	1,2	0,53	0,27	0,2	42...82	+
– " –	(Ti-N)+ (Ti-Ni-N), (№2+№14)	1,2	0,53	0,25	0,8	42...50	–
– " –	– " –	1,2	0,63	0,11	2,2	28...65	+
– " –	– " –	2,0	0,33	0,08	10,8	27...40	–
– " –	– " –	3,0	0,33	0,12	2,0	40...44	–
Ti-Ni-N, (№10)	Ti-Ni-N, (№10)	1,2	0,33	0,10	2,5	20...44	–
– " –	– " –	1,2	0,53	0,38	0,2	31...62	+
– " –	– " –	2,0	0,33	0,186	3,0	35...47	–

5. Висновки.

1). На досліджувані властивості йонно-плазмових покриттів значною мірою впливають такі технологічні параметри їх нанесення як сила струму дуги, кут падіння плазмового потоку, вміст крапельної фази, віддаль між випаровувачем і підкладкою, застосування сепарації плазмового потоку. Змінюючи ці параметри, можна в широких межах регулювати товщину і шорсткість вакуумних йонно-плазмових покриттів.

2). Виходячи із результатів досліджень суцільності можна зробити висновок, що для отримання суцільних покриттів необхідно виконання наступних умов:

- підвищувати кут падіння плазмового потоку до $60^{\circ} \dots 90^{\circ}$;

- максимально зменшувати шорсткість поверхні підкладки до величини, співрозмірної з товщиною покриття;
- проводити напilenня покриттів на якомога нижчих струмових режимах, що забезпечують стабільне горіння дуги;
- осаджувати покриття на вироби, що обертаються, бажано із сепарованого потоку [3];
- температурні режими осадження конденсатів слід підбирати, виходячи із умов отримання покриттів з мінімальними залишковими напруженнями, що виключало б появу тріщин в захисній плівці.

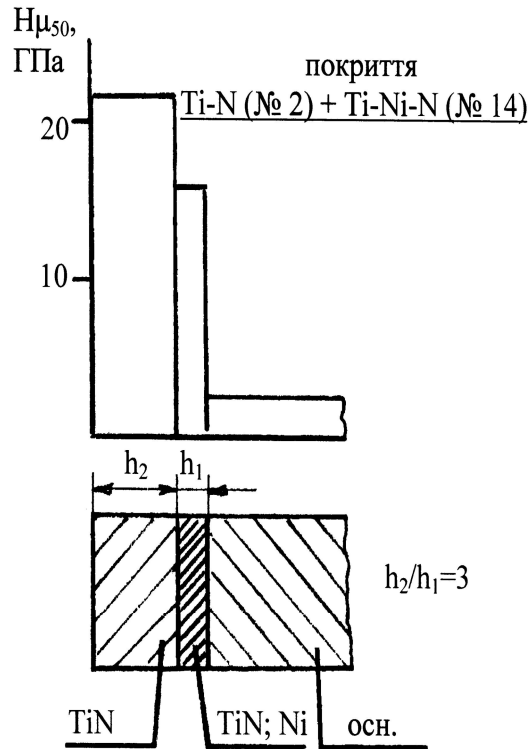


Рис. 15. Будова, мікротвердість і фазовий склад покриття Ti-N + Ti-Ni-N

3). Найкращими захисними властивостями в агресивних середовищах володіють двошарові покриття Ti+Ti-N і Ti-Ni-N + Ti-N, що забезпечують високий захисний ефект практично у всіх досліджених середовищах. Ці покриття мають широку область пасивності, високу механічну міцність і поряд з цим не обмежуються товщиною, оскільки мають значно менші залишкові напруження на границі розділу покриття–основа.

4). Перспективним для оцінки характеру взаємодії захисного покриття, оброблюваного матеріалу і ЗОР на водній основі є використання потенціостатичного методу досліджень процесів тертя.

5). Найвищою кавітаційно-ерозійною стійкістю володіють двошарові покриття, верхній шар в яких виконує захисні функції, а нижній є демпферним.

6). Нанесення йонно-плазмового покриття з TiN дозволяє в два рази підвищити границю корозійної втоми.

7). Застосування досліджуваних покриттів суттєво підвищує зносостійкість деталей машин з вуглецевих нетермооброблених сталей в умовах граничного тертя для забезпечення високої стійкості як тільки однієї деталі спряження, так і всієї пари тертя.

8). В умовах моделювання процесу різання найвищою зносостійкістю володіють двошарові покриття, в першу чергу композиція (TiN+Ni)+TiN, яка має оптимальне співвідношення фізико-механічних властивостей робочого шару та підшару.

1. Голубець В.М. Захисні властивості і зносостійкість вакуумних йонно-плазмових покриттів / В.М.Голубець, О.Б.Гасій, Я.В.Щуйко. – Львів: ВТФ „Друксервіс”, 2007. – 104 с.
2. Лунев В.М. Исследование некоторых характеристик плазмы вакуумной металлической дуги / В.М.Лунев, В.Д.Овчаренко, В.М.Хороших // ЖТФ. - 1977. – Т. 47, № 7. – С. 1486-1490.
3. Голубець В.М. Вплив технологічних параметрів на деякі характеристики йонно-плазмових покриттів / В.М.Голубець, О.Б.Гасій // Проблеми трибології. – 2004. - № 1. – С.67-71.
4. Миндюк А.К. Ингибирующее действие некоторых анионов на растворение стали в серной кислоте / А.К.Миндюк, О.П.Савицкая, Ю.И.Бабей // Физико-химическая механика материалов. – 1971. - № 4. – С. 108-110.
5. Голубець В.М. Технологічні методи поверхневого зміцнення металічних конструкційних матеріалів / В.М.Голубець – Львів: ВТФ „Друксервіс”, 2000. – 178 с.
6. Голубець В.М. Стійкість до корозії йонно-плазмових вакуумних покриттів в умовах дії кислих і нейтрального середовищ / В.М.Голубець, О.Б.Гасій // Науковий вісник УкрДЛТУ. – 2005. - Вип. 15.3. – С. 85-92.
7. Прейс Г.А. Электрохимические явления при трении металлов / Г.А.Прейс, А.Г.Дзюб // Трение и износ. – 1980. – Т1, № 2. – С. 217-235.
8. Антропов Л.И. Ингибиторы коррозии металлов / Л.И.Антропов, Е.М.Макушин, В.Ф.Панасенко. – К.: Техніка, 1981. – 183 с.
9. Некоз А.И. Кавитационно-эрозионное изнашивание материалов в коррозионно-активных средах / А.И.Некоз, Г.А.Прейс, И.А.Сологуб // Трение и износ. – 1981. - № 4. – С. 595-605.
10. Похмурский В.И. Коррозионно-усталостная прочность сталей и методы ее повышения / В.И.Похмурский. - К.: Наукова думка, 1974. – 186 с.
11. Табаков В.П. Исследование влияния твердого покрытия на качественные характеристики инструментального материала: дис. ... канд. техн. наук / В.П.Табаков. – М., 1975. – 239 с.