

Початкові умови: $f_{1,0} = f_{2,0} = f_{3,0} = f_{4,0} = f_{5,0} = f_{6,0} = 0$

Граничні умови: $f_{0,j} = 0,5 \quad f_{6,j} = f_{5,j}$

Параметри: $u=0,001$ м/с; $h=0,002$ м; $H=0,012$ м; $\Delta t=0,5 \quad \tau=0 \div 5$ с.

Перевірка адекватності одержаної моделі проводилась при фільтраційному сушінні хімічного волокна при температурі $t=45$ °С, висоті шару $h=80$ мм та швидкості теплоносія $w=1,62$ м/с. Графічне зображення зміни вологості в часі зображене на рис. 1.

Розбіжність між експериментальними і теоретичними даними не перевищує 5 %. Шляхом моделювання процесу на комп'ютері виявлено оптимальні райони зміни основних параметрів, в яких доцільно проводити процес висушування. Оскільки затрати на процес сушіння прямо пропорційні часу перебування матеріалу в сушарці, то його скорочення дозволяє інтенсифікувати процес висушування при збереженні потрібної якості матеріалу, що і дозволяє значно покращити техніко-економічні показники роботи промислового обладнання.

Література

1. Лыков А.В., Михайлов Ю.А. Теория тепло- и массопереноса. – М.: Теплоэнергоиздат, 1963. – 535 с.
2. Коллап Л.Н. Численные методы решения дифференциальных уравнений. – М.: Инлит, 1983. – 459 с.

3. ФІЗИКО-ХІМІЧНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ НОВИХ МАТЕРІАЛІВ

УДК 620.169:621.793

Проф. В.М. Голубець, д-р техн. наук;
доц. О.Б. Гасій канд. техн. наук – УкрДЛТУ

ДЕЯКІ ВЛАСТИВОСТІ ВАКУУМНИХ ЙОННО-ПЛАЗМОВИХ КОНДЕНСАТІВ В УМОВАХ ДІЇ АГРЕСИВНИХ СЕРЕДОВИЩ

Наведено результати досліджень стійкості проти корозійно-механічного і кавітаційно-ерозійного зношування, корозійної стійкості, корозійно-втомної міцності деяких конструкційних сталей з покриттям із нітриду титану в різних агресивних середовищах, а також зносостійкість при терті зі змазкою.

Ключові слова: зносостійкість, корозія, втомна міцність, вакуумні йонно-плазмові конденсати, робочі середовища.

Prof. V.M. Holubets, Doc. O.B. Hasiy – USUFWT

Some properties of vacuum ion-plasma condensates in corrosive fluids

The results of researches of some construction steels with TiN – coating corrosion – mechanical and cavitation – erosion wear durability, resistance to corrosion, corrosion – fatigue strength in different corrosive fluids and wear durability during oiling friction are shown

Key words: wear durability, corrosion, fatigue strength, vacuum ion-plasma condensates, working fluids.

Одним із ефективних засобів в проблемі захисту металів від корозії і корозійно-механічного руйнування є нанесення на робочу поверхню виробу захисних покриттів, в тому числі таких, що отримуються у вакуумі. Так, за кордоном широке розповсюдження отримали методи йонно-плазмового наплення під назвою "Sputtering" і реактивне іонізаційне наплення [1-3].

У нашій країні широко поширений метод нанесення вакуумних йонно-плазмових покриттів (конденсації речовини з йонним бомбардуванням – спосіб КІБ [4]). Відомо, що такі покриття знайшли широке застосування для підвищення стійкості ріжучого інструменту. Так, покриття з нітриду титану дозволяє на 20...30 % зменшити тертя при різанні конструкційних сталей, зменшити коефіцієнт усадки стружки і зусилля різання на 15...20 %, знизити температуру в зоні різання, значно підвищити стійкість інструменту і продуктивність механічної обробки [5]. Однак відомостей про вплив таких покриттів на інші властивості конструкційних матеріалів практично немає.

Для вивчення можливості розширення області використання методу йонно-плазмового наплення нами досліджено ряд експлуатаційних властивостей покриттів з позицій фізико-хімічної механіки матеріалів – наукового напрямку, що враховує при оцінці довговічності і несучій здатності матеріалів вплив зовнішнього середовища. Вивчені, зокрема, стійкість проти корозійно-механічного зношування (КМЗ) і кавітаційно-ерозійного зношування (КЕЗ), корозійна стійкість, корозійно-втомна міцність сталі 45 і 40 Х з покриттям із нітриду титану в різних агресивних середовищах, а також зносостійкість при терті зі змазкою.

Покриття з нітриду титану на робочі поверхні всіх лабораторних зразків, що досліджувалися, наносили на установці "Булат-3Т" (рис. 1) при режимі: струм дуги – 100 А, температура підкладки (зразків) – 673 К, тиск реакційного газу (азоту) в камері – $(4...5) \times 10^{-1}$ Па, відстань від катода до підкладки – 300 мм, тривалість напильня – 1 год. Матеріал катода – титан марки ВТ1-О.

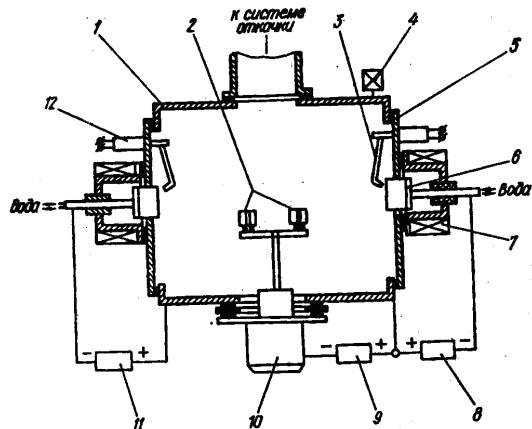


Рис. 1. Схема установки для нанесення вакуумних йонно-плазмових покриттів (типу "Булат-3Т"): 1 – корпус вакуумної камери; 2 – напильовані зразки; 3 – запальний електрод; 4 – автоматичний напісач реакційних газів; 5 – випаровувач; 6 – катод; 7 – фокусуюча система; 8, 11 – джерело живлення випаровувачів; 9 – джерело живлення підкладки; 10 – механізм обертання підкладки; 12 – соленоїд запального електрода

У металографічному аспекті покриття є світлою смужкою, що не травиться в 3 %-му розчині HNO_3 в етиловому спирті, товщиною 8-10 мкм, мікротвердість якої становить $H_{20} = 22...24$ ГПа.

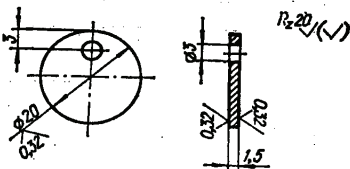


Рис. 2. Зразок для визначення корозійної стійкості

Корозійну стійкість досліджували на зразку (рис. 2) зі сталі 40 X у відпаленому стані (відпал при 1163 К протягом 1 год., охолодження з піччю). Зразки шліфували до шорсткості $R_a = 0,32$ мкм. Стійкість покриття з TiN на цих зразках вивчали ваговим способом за методикою [6] в 6 н H_2SO_4 при 303, 333, 363 К в 3 %-му розчині NaCl, а також у проточній воді при 295 К. Середовище при вільному доступі кисню термостатували при температурі дослідів з точністю $\pm 0,5$ К. Тривалість корозійних випробувань складала при 295 К – 100 год., при 303 К – 4 год., при 333 К – 1 год., при 363 К – 0,4 год. Абсолютну зміну маси зразків визначали з точністю 0,0002 г при масі кожно-

го з них біля 3,6 г. Більш детально методика корозійних випробувань описана в [7]. Результати дослідів наведені в табл. 1.

Табл. 1. Корозійна стійкість сталі 40 X в різних середовищах

Середовище	Втрати маси при температурі середовища, г/(м ² ·год)				Коефіцієнт захисту при T, К			
	295 К	303 К	333 К	363 К	295	303	333	363
6 н H_2SO_4	–	$\frac{70,40}{29,89}$	$\frac{1081,39}{368,1}$	$\frac{6988,88}{1916,11}$	–	2,3	2,9	3,6
3 %-ний NaCl	$\frac{0,08}{0,04}$	–	–	–	2,0	–	–	–
Проточна вода	$\frac{0,08}{0,05}$	–	–	–	1,6	–	–	–

Примітка: Над рискою – результати для сталі без покриття, під рискою – з покриттям із TiN.

Із порівняння швидкостей корозії шліфованих зразків і зразків з покриттям випливає, що ефективність гальмування корозії покриттям із нітриду титану зростає порівняно зі шліфованою сталлю у всіх середовищах, що досліджуються. Характерно, що із збільшенням температури середовища в 6 н H_2SO_4 захисні властивості покриття з нітриду титану реалізуються повніше.

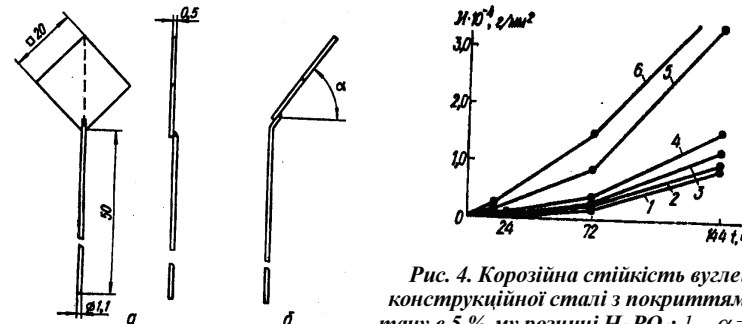


Рис. 3. Зразки для дослідження суцільності вакуумних йонно-плазмових покриттів

Рис. 4. Корозійна стійкість вуглецевої конструкційної сталі з покриттям із титану в 5 %-му розчині H_3PO_4 : 1 – $\alpha = 90^\circ$, $R_z = 10$ мкм; 2 – $\alpha = 60^\circ$, $R_z = 10$ мкм; 3 – $\alpha = 40^\circ$, $R_z = 10$ мкм; 4 – $\alpha = 30^\circ$, $R_z = 10$ мкм; 5 – $\alpha = 90^\circ$, $R_z = 40$ мкм; 6 – $\alpha = 45^\circ$, $R_z = 40$ мкм

Дослідження корозійної стійкості конструкційних сталей з покриттями показують, що інтенсивність корозії в різних точках зразка неоднакова. Тому досліджено вплив деяких технологічних параметрів процесу нанесення покриттів, зокрема кута падіння плазмового потоку і шорсткості підкладки на суцільність конденсатів. Непрямою характеристикою суцільності служить корозійна стійкість зразків зі Ст. 3 (рис. 3) з шорсткістю поверхні $R_z = 40$ мкм і $R_z = 10$ мкм з покриттям з Ti в 5 %-му водному розчині H_3PO_4 . Покриття наносили на всі зразки з однієї установки, кут напильня становив 90, 60, 45, 30°. Встановлено, що із зменшенням кута падіння потоку плазми на підкладку через наявність затінених ділянок значно знижується суцільність покриття, доказом чого є збільшення цієї залежності із зростанням шорсткості (рис. 4). Отже, покриття формується з направленою потоку плазми, і для от-

римання суцільних плівок необхідно, щоб кут падіння потоку до підкладки становив 60-90°.

На зносостійкість досліджено зразки – кільця із зовнішнім діаметром 40 мм і товщиною 10 мм зі сталі 45 у відпаленому стані з покриттям із нітриду титану. Тертя здійснювали на машині 2070 СМТ-1 при наступних режимах: $p = 5$ МПа, $v = 0,5$ м/с, $Lmp = 45$ км. Площа тертя становила 2×10^{-4} м². Для порівняння використані зразки після борювання [8], виконаного газовим контактним методом в негерметичному контейнері в суміші 84 % V_4C + 16 % $Na_2B_4O_7$ при $T = 1223$ К протягом 6 ч. Після борювання на поверхні сталі отримані дифузійні шари, що складаються з боридів заліза, під якими знаходиться зона, збагачена вуглецем за рахунок витиснення його з поверхні, а також зона α -твердого розчину. На поверхні знаходиться фаза FeB, під нею Fe₂B. Дифузійний шар має форму голок, направлених перпендикулярно до поверхні, що насичується. Товщина борованого шару становить 100 мкм, мікротвердість $H_{\mu 20} = 16$ ГПа.

Тертя кілець з покриттями здійснювали по нерухомому вкладишу зі сталі 45, термооброблених на мартенсит відпуску (температура гартування 1123 К, витримка 1 год., гартувальне середовище – вода, температура відпуску – 453 К, витримка 2 год.). Внаслідок випробувань встановлено (рис. 5), що покриття з нітриду титану більш, ніж в 10 разів підвищує зносостійкість сталі 45 порівняно зі зносостійкістю цієї ж сталі після дифузійного борювання при терті в умовах змазки (солідол жирної марки "УС") і більше, ніж в 20 разів при терті в середовищі 3 %-го водного розчину NaCl.

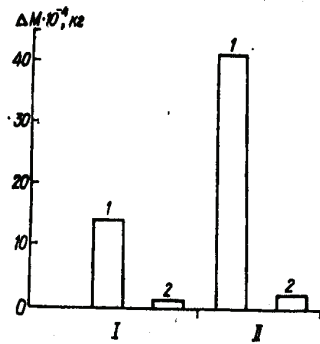


Рис. 5. Зносостійкість сталі 45 борованої (1) і з покриттям із нітриду титану (2) при терті в солідолі марки УС (I) і в 3 %-му водному розчині NaCl (II)

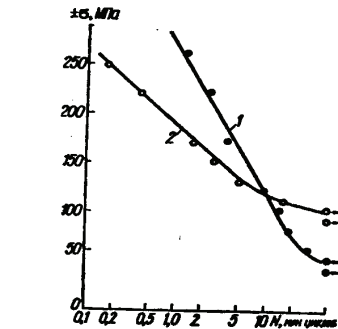


Рис. 6. Циклічна міцність сталі 45 без покриття (1) і з покриттям із нітриду титану (2) в 3 %-ому розчині NaCl

Втомні випробування зразків (діаметр робочої частини 5 мм) проводили на установці ИМА-5 [9] за схемою чистого згину при обертанні зразка з частотою 50 с⁻¹. Визначали витривалість зразків зі сталі 45 у відпаленому стані з покриттям із нітриду титану і без покриття на повітрі і в 3 %-му розчині NaCl. Прийнята база випробування на втому в корозійному середовищі – 5×10^7 циклів.

Встановлено, що умовна межа корозійної витривалості (в середовищі 3 %-ного розчину NaCl) сталі 45 з вказаним покриттям підвищився в 2 рази порівняно з цією ж сталлю без покриття (рис. 6). Витривалість зразків з покриттям із нітриду титану на повітрі змінюється незначно (в зв'язку з високою крихкістю і малою товщиною) і відповідає приблизно 220 МПа, тобто знаходиться на рівні витривалості сталі 45 у відпаленому стані.

На ультразвуковій установці УЗДН-2 Т досліджено кавітаційну стійкість покриття в середовищі 3 %-ного водного розчину NaCl (рН 6,8), дистильованої і водопровідної води. Методика випробувань наведена в [7]. Частота коливаний зразків 22 кГц, амплітуда 79 мкм, час випробувань 2 год. Величину зносу вимірювали на аналітичній вазі ВЛР-200 г з точністю до 10^{-4} г. Досліджено зразки (рис. 7) зі сталі 45 (нормалізованої) з покриттям із нітриду титану, а також із цієї ж сталі без покриття (нормалізованої і об'ємнозагартованої).

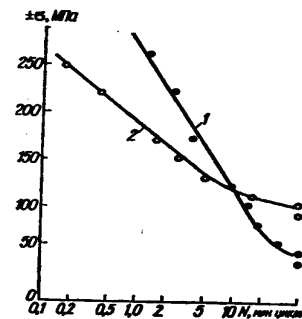


Рис. 6. Циклічна міцність сталі 45 без покриття (1) і з покриттям із нітриду титану (2) в 3 %-ому розчині NaCl

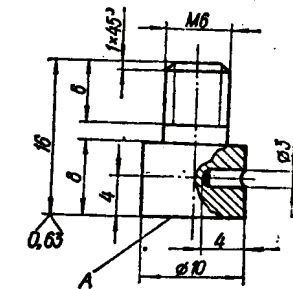


Рис. 7. Зразок для дослідження кавітаційної стійкості

Дослідження показали (рис. 8), що покриття з TiN в умовах впливу агресивних середовищ значно підвищують кавітаційно-ерозійну стійкість сталі 45. Порівняно невелике збільшення стійкості при кавітації в дистильованій воді порівняно з іншими середовищами викликане, мабуть, малою товщиною, а також руйнуванням крихкого захисного шару на м'якій основі при дії кавітаційних навантажень.

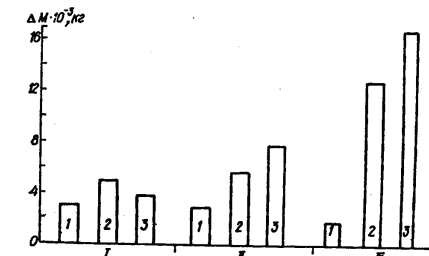


Рис. 8. Кавітаційно-ерозійна стійкість сталі 45 з покриттям із нітриду титану (1), без покриття – нормалізованої (2) і загартованої (3): I – дистильована вода; II – водопровідна вода; III – 3 %-ний водний розчин NaCl (рН 6,8)

Проведені дослідження дозволяють констатувати наступне. Є всі підстави вважати, що, крім підвищення зносостійкості ріжучого інструменту, вакуумні йонно-плазмові покриття з нітриду титану можуть служити ефективним засобом захисту сталених виробів як від корозії, так і від корозійно-механічного руйнування, зокрема для підвищення стійкості проти КМЗ і КЕЗ, зношування при граничному терті, а також для збільшення корозійно-втомної міцності. Цьому значною мірою сприяють добра адгезія покриття з металевою основою, висока суцільність і рівномірність напиленого шару по товщині, рівноважність структури.

Література

1. **Aciars** rapides: ils peuvent aussitôt revêtus// Machines production, 1978. – 8, № 193. – P. 37-38.
2. **David T.** Curry Sputtering basics for beginners// Machine Design, 1979, №1. – P. 96-97.
3. **Schulze D.** Untersuchungen zur reaktiven ionengestutzten abscheidung von TiN// Schichten Technik, 1977. – 33, № 7. – S. 399-402.
4. **Толок В.Т.** Вакуумно – плазмова технологія високих енергій// Вісн. АН УРСР. – 1980, № 11. – С. 63-66.
5. **Джеломанова Л.М.** Прогрессивные методы нанесения износостойких покрытий на режущий инструмент: Обзор. – М.: НИИИмаш, 1979. – 46 с.
6. **Миндюк А.К., Савицкая О.П., Бабей Ю.И.** Ингибирующее действие некоторых анионов на растворение стали в серной кислоте// Физико-химическая механика материалов. – 1971, № 4. – С. 108-110.
7. **Голубец В.М.** Долговечность эвтектических покрытий в коррозионных средах. – К.: Наук думка, 1990. – 120 с.
8. **Похмурский В.И., Далисов В.Б., Голубец В.М.** Повышение долговечности деталей машин с помощью диффузионных покрытий. – К.: Наук думка, 1980. – 188 с.
9. **Погорельский Р.Г., Мацейко М.М.** Машина ИМА – 5 для испытаний на усталость в жидких средах// Влияние рабочих сред на свойства материалов. – 1964, вып. 3. – С. 146-150.

УДК 539.06

Доц. О.І. Думанський, канд. техн. наук – УкрДЛТУ

ЗАГАЛЬНИЙ МЕТОД ДОСЛІДЖЕННЯ КРУЧЕННЯ СУЦІЛЬНИХ ПРИЗМАТИЧНИХ ВАЛІВ (БРУСІВ)

Пропонується загальний метод дослідження напруженого стану суцільних призматичних валів (брусів) під дією моменту кручення, якщо конформно перетворююча функція поперечного перетину вала (бруса) на круг має вигляд полінома довільного ступеня. Наведений приклад кручення вала (бруса), поперечним перетином якого є область епітрохіди.

Doc. O.I. Dumanskiy – USUFWT

General twisting research method of continuous prismatic billows (squared beams)

Offers a general research method of strained state of continuous prismatic billows (squared beams) under twisting moment action, if reflecting function of transversal billow (squared beam) crossing on circle has appearance of polynomial of arbitrary degree. Brought billow (squared beam) twisting example, by transversal crossing of which a domain of epitrochoida.

Часто різноманітні елементи конструкцій мають вигляд призматичних стрижнів або брусів із складним контуром в поперечному перерізі. Це можуть бути вали, шпинделі токарних і свердильних верстатів та інші стрижневі деталі конструкції.

Розглянемо призматичний ізотропний вал (брус), поперечний переріз якого представляє собою однозв'язну область певного профілю, що підданий дії моменту кручення. Побудуємо загальний розв'язок знаходження дотичних напружень в будь-якій точці поперечного перерізу вала та жорсткості на кручення, якщо конформно відображаюча функція побудована у вигляді полінома

$$z = \omega(\zeta) = \sum_{k=1}^m C_k \zeta^k \quad (1)$$

і здійснює перетворення круга $|\zeta| \leq 1$ з границею γ на область поперечного перерізу вала.

Функцію напружень $f(\zeta)$ задано у вигляді

$$f(\zeta) = \sum_{k=0}^{\infty} a_k \zeta^k, \quad (2)$$

вважаючи регулярною в крузі $|\zeta| \leq 1$, знаходимо з граничної умови [1]

$$f(\sigma) - \overline{f(\sigma)} = i\omega(\sigma)\overline{\omega'(\sigma)} + iC_1 \quad \sigma \in \gamma \quad (3)$$

Компоненти дотичних напружень, що діють в кожній точці поперечного перерізу вала, знаходимо згідно з формулою

$$\tau_p - i\tau_\theta = \frac{\mu\tau}{\rho|\omega'(\zeta)|} [f'(\zeta) - i\omega'(\zeta)\overline{\omega(\zeta)}], \quad (4)$$

де μ – пружна постійна Ляме; τ – кут закручування стрижня на одиницю довжини і дорівнює $\tau = M_k/D$, M_k – крутний момент; D – жорсткість вала (бруса) на кручення $D = \mu(I_0 + D_0)$,

$$I_0 = \frac{1}{4i} \int_{\gamma} [\overline{\omega(\zeta)}]^2 \omega(\zeta) d\omega(\zeta), \quad (5)$$

$$D_0 = -\frac{1}{4i} \int_{\gamma} [f(\zeta) + \overline{f(\zeta)}] d[\overline{\omega(\zeta)}\omega(\zeta)]$$

Задамо праву частину умови (3) у вигляді

$$i\omega(\sigma)\overline{\omega'(\sigma)} = i \sum_{k=-(m-1)}^{m-1} P_k \sigma^k, \quad (6)$$

де $P_k = \overline{P}_{-k}$ ($k = 0, \dots, m-1$) визначаються із рівності

$$P_k = \sum_{r=1}^{m-k} C_{k+r} \overline{C}_r \quad (k = 0, \dots, m-1) \quad (7)$$

Підставивши (2) і (6) в (3) і прирівнюючи коефіцієнти при однакових степенях $\sigma = e^{i\theta}$, отримаємо