

Ю.І. Коваленко¹,
В.С. Антоноук, д.т.н., проф.²,
Черкаський державний технологічний університет¹,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»²

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ АДГЕЗІЙНОЇ МІЦНОСТІ ЗНОСОСТІЙКИХ ПОКРИТТІВ НА ОПТИЧНИХ ВИРОБАХ ПІСЛЯ ЇХ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОГО МОДИФІКУВАННЯ

Сучасний рівень розвитку науки та техніки ставить низку вимог до елементів виробів наукомісткого обладнання, серед яких: висока надійність, мініатюрність, прецизійність та точність їхнього виконання. Особлива увага при цьому приділяється виробам із сучасних діелектричних матеріалів (оптичного скла, кераміки, композиційних метаматеріалів тощо), як надійних, а іноді і безальтернативних заміників традиційних конструкційних матеріалів. В той же час застосування таких діелектриків вимагає високоякісної підготовки їх поверхонь, одним з перспективних методів такої поверхневої обробки цих матеріалів є метод низькоенергетичної електронно-променевої мікрообробки.

Після електронно-променевого модифікування зносостійких покриттів, осаджених термовакуумним методом на поверхнях оптичних виробів, обов'язковою контрольною процедурою є дослідження їх адгезійної міцності.

В залежності від характеру навантаження виробів, адгезійну міцність доцільно визначати за допомогою методів, в яких силу відриву викликають внутрішні напруження в покритті та на підкладинці. Самий простий метод отримання такого напруженого стану це – деформування підкладинки з покриттям. Підкладинку з покриттям піддають вигину, скручуванню, повздовжньому розтягу, ударним деформаціям тощо. Також внутрішні напруження можна викликати за рахунок терморозширення.

Відривні напруження визначаються за формулою:

$$\sigma_{\text{вд}} = E(\Delta T(\alpha_1 - \alpha_0) - \varepsilon)(1 - \mu),$$

де E – модуль пружності, α_1 , α_0 – коефіцієнти терморозширення покриття та підкладинки, ΔT – градієнт температури, μ – коефіцієнт Пуасона, ε – деформація, пов'язана з релаксацією напружень.

Для дослідження адгезійної міцності зносостійких покриттів використовували метод здуття. Перевага цього методу в тім, що він дає змогу визначати величину рівноважної адгезії покриття, коли інші методи дають змогу визначати тільки адгезійну міцність.

Здуття покриття здійснюється подачею газу до границі між покриттям та підкладинкою, в результаті чого покриття відшаровується, утворюючи порожнину (пухир), геометричні розміри якої вимірюються.

На основі цих вимірювань одержують значення адгезійної міцності. Газ може подаватися за допомогою трубки, а потім через цю ж трубку може подаватися ртуть для фіксування розмірів порожнини. Порожнина також може бути утворена завдяки адсорбованому газу у підкладинці, який піднімається до поверхні внаслідок нагріву.

При використанні цього методу адгезійна міцність обчислюється за формулами:

$$W = \varepsilon d(\sigma_0 + E\varepsilon^2/(6 - 6\mu));$$
$$f_{\text{вд}} = \sqrt[3]{\frac{1}{2}\varepsilon^2 d(\sigma_0 + E\varepsilon^2/(6 - 6\mu))};$$
$$\varepsilon = r/R,$$

де W – енергія адгезії, d – товщина покриття, r – радіус пухиря, R – радіус кривизни пухиря, σ_0 – внутрішні напруження в покритті, E – модуль пружності, μ – коефіцієнт Пуасона.

Окрему групу складають методи оцінки адгезійної міцності, які ґрунтуються на дослідженні твердості покриттів [3]. Ці методи використовують для оцінки адгезійної міцності тонких покриттів з матеріалів, які мають достатню твердість. При цьому, при вивченні поверхні покриття оцінюються площа відколення та тріщини по відношенню до площі подряпини або відбитку. Для методу дряпання, де різець робить подряпину шириною 0,2 мм з силою притиску P після визначення адгезійної міцності методом відриву був виявлений зв'язок, який має вигляд:

$$F_{\text{від}} = k_1 + k_2 P,$$

де k_1 та k_2 – коефіцієнти лінійної апроксимації, для покриттів на склі з титановим підшаром $k_1 = 14 \cdot 10^5$ Па, $k_2 = 7,6 \cdot 10^{-4}$ Па.

Результати досліджень зносостійких вуглецевих покриттів, які проводилися за вищевказаними методами зазначили високу збіжність результатів (коефіцієнт кореляції $k > 0,89$) і в залежності від товщини покриттів показали такі значення адгезійної міцності:

$$f_{\text{вд}}|_{h=2,5-3,5 \text{ мкм}} = 0,8 \text{ МПа}; f_{\text{вд}}|_{h=5-8 \text{ мкм}} = 3,0 \text{ МПа}; f_{\text{вд}}|_{h=8-12 \text{ мкм}} = 3,2 \text{ МПа}.$$

В той же час, встановлено, що внаслідок електронно-променевого модифікування цих покриттів їх адгезійна міцність збільшилася у 1,8...3,2 рази, а гнучке керування режимами електронно-променевого впливу дозволяє отримувати зносостійкі покриття на прямокутних пластинах з оптичного скла з високою адгезійною міцністю $\approx 8,3$ МПа.

Висновок. Таким чином, результати експериментального дослідження адгезійної міцності зносостійких покриттів з вуглецевого покриття на оптичних виробках з оптичного скла сорту «крони» після їх електронно-променевого модифікування підтвердили високу якість поверхні і повторюваність результатів модифікування таких покриттів, а також значне (у 1,8–3,2 рази) збільшення їх адгезійної міцності.

В той же час показано зростання адгезійної міцності таких покриттів зі збільшенням їх товщини, що пов'язано з більш упорядкованим формуванням кристалічної (квазіалмазоподібної) структури вуглецевого покриття внаслідок термічного впливу стрічкового електронного потоку низької енергії (до 6 кеВ).