

ОЛЕКСАНДРЕНКО Віктор

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-2404-2104>e-mail: oleksandrenkovp@gmail.com**СВІДЕРСЬКИЙ Владислав**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-4816-6977>e-mail: svidersky.vladyslav@gmail.com**КИРИЧЕНКО Людмила**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0001-6382-8911>e-mail: kirichenko47@ukr.net**ДАНІЛЕНКО Ігор**

Донецький фізико-технічний інститут НАН України

<https://orcid.org/0000-0002-0016-1045>e-mail: Danilenko.I@nas.gov.ua**СФІМЕНКО Валерій**

Національний авіаційний університет

<https://orcid.org/0000-0002-4903-6174>e-mail: e.valerij.ua@gmail.com

РОЗРОБКА І ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ НАНОМОДИФІКОВАНИХ ФТОРОПЛАСТОВИХ ПОКРИТТІВ, НАНЕСЕНИХ НА МЕТАЛЕВІ ПОВЕРХНІ

Проаналізовано шляхи підвищення фізико-механічних характеристик і зносостійкості фторопластових покриттів на металевих поверхнях. Досліджено вплив складу і температурно-часових умов формування багат шарових фторопластових покриттів на їх адгезійну міцність, еластичність, стійкість до удару та абразивостійкість. Описані режими технологічних операцій. Наведені властивості розроблених покриттів на основі фторополімеру Ф-30П. Окреслено особливості формування ґрунтувального, проміжного і зовнішнього шарів фторопластового покриття. Розроблена технологія нанесення наномодифікованого фторопластового покриття електроосадженням на металеві поверхні. Дані рекомендації з використання результатів виконаних досліджень для отримання наномодифікованих фторопластових покриттів з високою адгезією до металевих поверхонь ґрунтувального шару і зносостійкістю зовнішнього шару.

Ключові слова: покриття, зносостійкість.

OLEKSANDRENKO Victor., SVIDERSKYI Vladislav, KIRICHENKO Ludmila

Khmelnitskyi National University

DANILENKO Igor

Donetsk physic technical institute of НАН of Ukraine

YEFYMENKO Valerij

National Aviation University

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF THE NANOMODIFIED FLUOROPLASTIC COVERAGES INFLICTED ON METALLIC SURFACES

Ways of increasing of physical and mechanical characteristics and wear resistance of fluoroplastic coatings on metal surfaces are analyzed. The influence of the composition and temperature-time conditions of the formation of multilayer fluoroplastic coatings on their adhesive strength, elasticity, shock resistance and abrasion resistance was studied. Primer layer for three-layer F-30P fluoropolymer coatings contained fluoropolymer F-30P - 72 wt. %, graphite C-1 - 25 wt. %, aminoorganosilica on the basis of aerosil - 3 wt. %. The composition of the intermediate fluoropolymer layer: fluoropolymer F-30P - 79 wt. %, graphite C-1 - 20 wt. % aminoorganosilica based on aerosol - 1 wt. %. As the main task of applying the outer layer of fluoroplastic coating based on F-30P is to increase wear resistance, so its composition included 1-3 wt. % ZrO₂ + 3% Y₂O₃ (500 °C) or 1-3 wt. % ZrO₂ + 3% Y₂O₃ (700 °C) or 1-3 wt. % zirconium hydroxide doped yttrium ions (the amount of yttrium in terms of oxides is 3 mol %): Zr(Y)O(OH) 2 and 17 wt. % graphite C-1, as well as 1 wt. % aminoorganosilica on the basis of aerosil. The analysis of the obtained results showed that the introduction of nanomodifiers of zirconium oxides encourages intense matrix structuring, as nanoparticles can create cluster-type ensembles. As a result a reinforced polymer system is created, which is characterized by increased strength and tribotechnical characteristics. Thus strength to scratch damage increased for three-layer fluoroplastic coatings, the outer layer of which includes: a) 17 wt. % graphite C-1 + 1 wt. % aminoorganosilica based on aerosil + 1 wt. % ZrO₂ + 3% Y₂O₃ (500 °C) by 5.02 times, b) 17 wt. % graphite C-1 + 1 wt. % aminoorganosilica based on aerosil + 1 wt. % ZrO₂ + 3% Y₂O₃ (700 °C) by 8.98 times, c) 17 wt. % graphite C-1 + 1 wt. % aminoorganosilica based on aerosil + 2 wt. % of zirconium hydroxide doped with yttrium ions (the amount of yttrium in terms of oxides is 3 mol %): Zr(Y)O(OH) 2 by 14.35 times compared to the unmodified fluoroplastic coating F-30 P. The modes of technological operations are described in detail. The properties of the developed coatings based on F-30P fluoropolymer are given. Features of formation of priming, intermediate and outer layers of fluoroplastic coating are outlined. The technology of nano-modified application of fluoroplastic coating by electrodeposition on metal surfaces has been developed. Therecommendations for using the results of the performed research for obtaining nanomodified fluoroplastic coatings with high adhesion to metal surfaces of the primer layer and wear resistance of the outer layer are given.

Key words: adhesion, fluoroplastic coatings, strength, composition, technological factors, metal surface, elasticity, firmness to the blow, hardness, anti-abrasion.

Вступ

Надійність роботи машин і механізмів визначається в першу чергу якісним станом робочих поверхонь деталей, що цілеспрямовано формуються на фінішних операціях технологічних процесів (геометрична точність, макро- і мікрогеометрія, фізико-механічні властивості матеріалу, напружено-деформований стан поверхневого шару). Нанесення на металеві робочі поверхні фторопластових композиційних покриттів дозволяє успішно вирішити завдання створення поверхонь тертя з певним комплексом необхідних експлуатаційних параметрів за надійністю, зносостійкістю, контактною витривалістю і втомною міцністю, а застосування тонких фторопластових покриттів є дуже перспективним напрямом, що відкриває широкі можливості управління фізико-механічними властивостями спряжених поверхонь [1, 2].

Аналіз останніх досліджень

Однією із найважливіших задач при формуванні фторполімерних покриттів на металевих поверхнях є отримання металополімерних з'єднань з високою адгезійною міцністю і зносостійкістю. Низька адгезійна здатність фторполімерів, які застосовуються в якості матеріалів для антикорозійних, електроізоляційних і антифрикційних покриттів викликає необхідність здійснення процесів модифікування металів або полімерів з метою підвищення міцності і стійкості адгезійних металополімерних з'єднань за рахунок встановлення чи підсилення хімічних, фізичних або фізико-хімічних зв'язків, а також за рахунок збільшення площі адгезійного контакту [3,4].

Різні види зносостійких і антифрикційних покриттів для роботи в режимі самозмащування описані в роботах [5,6]. Проблема створення антифрикційних покриттів на основі високомолекулярних з'єднань з поліпшеними характеристиками термо- і теплостійкості присвячені праці [6,7]. В роботі [7] узагальнений досвід з дослідження, конструювання і розрахунку підшипників ковзання з полімерними покриттями, ущільнень, працюючих без мастила, а також в агресивних середовищах і за аномальних температур. Фторопластові покриття відрізняються високою хімічною і термічною стійкістю, низьким і стабільним коефіцієнтом тертя. Проте через порівняно низьку механічну міцність і холодотекучість фторопластові покриття в чистому вигляді не застосовуються в навантажених антифрикційних вузлах [7].

Найкращі результати за зносостійкістю фторопластових покриттів досягнуто при використанні комплексних наповнювачів, що складаються з синтетичних волокон та металевого порошку. В якості компонентів-наповнювачів для фторопластових покриттів, що самозмащуються, застосовуються графіт, кокс, дисульфід молібдену, нітрид бору, мілкодисперсні порошки металів (свинець, мідь, бронза), подрібнене скловолокно, вуглеграфітові або синтетичні волокна, а також інші антифрикційні добавки [5–7].

Слід зазначити, що в цілях забезпечення необхідної електричної міцності покриття містять графітові складові. Вміст наповнювачів у покриттях складає 1–20 мас. %. Більш високе наповнення призводить до погіршення міцнісних характеристик.

Перспективним методом модифікації полімерів з метою підвищення їх фізико-механічних характеристик та зносостійкості є використання нетрадиційних компонентів твердих речовин в ультрадисперсному стані [8,9]. Ультрадисперсні з'єднання (УДЗ) є перехідним станом конденсуючих речовин – макроскопічні ансамблі мікроскопічних частинок з розмірами від 1 до 100 нм. Основні фізичні властивості УДЗ істотно відрізняються від властивостей матеріалів у звичайному стані. Системам з компонентами в ультрадисперсному стані властиві унікальні поєднання електричних, магнітних, теплових, механічних, сорбційних, радіопоглинаючих та інших властивостей, що не зустрічаються в масивних кристалах. Поява подібних властивостей пов'язана з розмірними ефектами УДЗ. Ці ефекти реалізуються, коли розмір частинок стає співвимірним з характерним кореляційним масштабом того або іншого фізичного явища (наприклад, розміру домена) або характерною довжиною якого-небудь процесу перенесення (довжина вільного пробігу електронів та інших елементарних частинок).

В якості УДЗ використовують вуглеграфітові наночастинки детонаційного синтезу (УДАГ, УДАВ), фторованої сажі (ФС), фуллеренів (ФЛ), вуглецевих нанотрубок (УН), порошок металів, оксидів [8,9].

Нанокерамічні матеріали на основі ZrO_2 володіють унікальним комплексом фізико-механічних властивостей [9]: на відміну від існуючих аналогів, внаслідок особливої технології синтезу, кераміка має одночасно високі значення міцності, в'язкості руйнування і зносостійкості; – високі експлуатаційні властивості в умовах дії високих температур (понад 1600 °C) та корозійно-активних середовищ без значної деградації механічних властивостей.

Завдяки своїм таким неповторним властивостям як висока зносостійкість, неймовірно гладка поверхня і практично відсутність негативної взаємодії, наприклад з дротом та кабелем, найнижча з усіх відомих керамічних матеріалів теплопровідність, оксид цирконію знаходить застосування в багатьох галузях техніки [9].

Таким чином, для покращення фізико-механічних та антифрикційних характеристик покриттів фторполімерних матеріалів доцільно використати принцип багаторівневого модифікування полімерної матриці [10]. Реалізація даного принципу здійснюється шляхом введення у фторопласти суміші наповнювачів різного складу і дисперсності та нанодисперсних частинок, вибраних з групи оксидів цирконію.

Постановка проблеми

Фторопластові покриття знаходять широке застосування в харчовому та хімічному машинобудуванні. Нанесення фторопластових покриттів дозволяє суттєво знизити прилипання речовин, що переробляються, до робочих поверхонь деталей і вузлів тертя, резервуарів, бункерів, транспортерів, що викликає втрати сировини і готової продукції, погіршення їх якостей, а також зниження продуктивності праці через необхідність частого очищення і змащування обладнання. Фторопластові покриття ефективні для захисту хімічного обладнання, що працює в агресивних середовищах: ротори центрифуг, деталі фільтрів, змішувачі, ємнісне обладнання та ін.. Вони унікальні за своїми властивостями, особливо за хімічною стійкістю, стійкі практично до всіх хімічних речовин. Покриття з фторопластів мають низький коефіцієнт тертя, стійкі до зношування та ударів. Фторопластові плівки широко застосовуються для ізоляції нагрівостійких обмотувальних, монтажних і спеціальних дротів, в електродвигунах, генераторах, трансформаторах та ін..

Недоліком фторопластових покриттів є їх низька адгезійна міцність до металевої підложки і недостатньо висока зносостійкість. Тому дослідження спрямовані на подолання цих недоліків є досить актуальними.

Мета та завдання

Метою роботи є: створення фторопластового покриття ґрунтувальний шар якого має високу адгезію до металевої поверхні, а зовнішній – зносостійкість і відпрацювання технології нанесення електроосадженням фторопластового покриття на основі фторполімеру Ф-30П.

Для досягнення поставленої мети вирішувались наступні задачі:

- розробити склад і температурно-часовий режим формування фторполімерного покриття з високою адгезією до металевих поверхонь ґрунтувального шару і зносостійкістю зовнішнього шару;
- розробити технологію електростатичного нанесення фторполімерного покриття на металеву поверхню та дослідити його властивості.

Виклад основного матеріалу

Матеріали та методика дослідження. Для досліджень використовували фторопластові покриття на основі сополімеру трифторхлоретилену з етиленом: фторопласту-30 марки П (Formoplast, Росія) (ГОСТ 30333-2007), з наповненням промоторами адгезії і наномодифікаторами.

Як наповнювач композицій для фторопластового покриття використовували колоїдно-графітовий препарат С-1 (ТУ 113–08–48–63–90) (ТОВ Укрспецмасла) і високодисперсний аміноорганокремнезем на основі аеросилу. Як функціональна добавка використовували нанопорошки оксиду цирконію: $ZrO_2 + 3\% Y_2O_3$ (500 °С), $ZrO_2 + 3\% Y_2O_3$ (700 °С) і гідроксиду цирконію, легованого іонами ітрію (кількість ітрію в перерахунку на оксиди складає 3 моль %): $Zr(Y)O(OH)_2$. Нанопорошки аналізувались методами рентгенівської дифракції (РСА) на рентгенівському дифрактометрі Dron-3 (IC Bouvestnik, Росія) в Cu-K α випромінюванні для визначення розмірів кристалітів та кількісного фазового аналізу. Розміри частинок порошоків оцінювали за допомогою трансмісійної електронної мікроскопії (ТЕМ) (JEM 200, Jeol, Japan). За даними РСА та ТЕМ розміри частинок були 18 ± 2 нм.

Матеріал металевої поверхні – лист сталевий холоднокатаний ст. 08кп. Для приготування композиції використовували дробарку-млинок МРП-1 (Granat, Росія) з подовими ножами та частотою обертання 7000 об/хв.

Технологічний процес нанесення фторполімерного покриття на металеву поверхню складається з наступних стадій: а) підготовка поверхні: знежирення, видалення забруднень і окисів, а також перетворення (конверсія) поверхні для підвищення адгезії та захисту від корозії (фосфатування); б) нанесення шару порошкового покриття на поверхню; в) формування плівки покриття: оплавлення, затвердіння, охолодження. Для видалення окисних плівок використано абразивне очищення з допомогою піскоструменевої обробки металевої поверхні на піскоструменевій установці – 620-1109. Абразивне очищення здійснюється за допомогою часток піску, що подаються на поверхню з великою швидкістю в струмені стислого повітря. Частки абразиву, ударяючись об поверхню, відколюють від неї невеликі шматочки металу разом з окисними плівками та іншими забрудненнями. При цьому забезпечується висока якість очищення практично від усіх забруднень. Абразивне очищення забезпечує рівномірну шорсткість, що сприяє підвищенню адгезії покриття.

Після обробки поверхні частками піску її обдували очищеним повітрям. Для поліпшення захисних властивостей і подовження терміну служби, особливо при експлуатації в атмосферних умовах, для підготовки поверхні перед нанесенням фторопластового покриття застосували фосфатування. Фосфатування – отримання на металевій поверхні плівки з важко розчинних фосфорнокислих солей. Фосфатні плівки збільшують адгезію покриття і перешкоджають поширенню підплівкової корозії.

Нанесення фторопластових покриттів здійснювали шляхом електростатичного напилення. Метод нанесення тонкошарових полімерних покриттів в електростатичному полі полягає в осіданні заряджених частинок полімеру на поверхні деталі, що має протилежний заряд. Схема процесу зарядження і осаження частинок полімеру на виріб в полі коронного розряду наведена у роботі [3].

Фторопласт-30П і наповнювачі перед нанесенням покриття висушувались. Фторопласт-30П, графіт С-1, аміноорганокремнезем на основі аеросилу, нанопорошки оксиду і гідроксиду цирконію перемішували у

млинку МРП-1. Після цього виконували фракціонування порошку з метою отримання композиції з розмірами частинок 40–80 мкм і піддавали її термообробці протягом однієї години при 150 °С. Нанесення фторопластових покриттів здійснювали за допомогою установки "Optima-01С" (м. Запоріжжя, Україна, «Елем»).

Нанесення покриття на металеву поверхню здійснювали способом електростатичного напилення порошку першого шару при напруженості електричного поля 50 кВ, а для наступних шарів при напруженості 60–70 кВ. Після цього металеву пластину з нанесеним покриттям витримували при температурі 228–235 °С протягом двох годин та охолоджували до кімнатної температури зі швидкістю 30–40 °С за годину.

Методика дослідження композиційних матеріалів для покриттів містила визначення товщини покриттів, адгезії і стійкості до пошкодження шкрябанням, міцності та еластичності, стійкості до удару та інтенсивності зношування.

Товщину покриттів визначали за допомогою приладу NOVOTEST ТП-2020. Товщиномір відповідає ДСТУ ISO 2808, ДСТУ 4219, ISO 2808, ГОСТ 31993. До складу приладу входить блок обробки інформації і перетворювач Ф-0,5. Перетворювач Ф-0,5 призначений для вимірювання товщини діелектричних і електропровідних неферомагнітних, а також гальванічних покриттів на електропровідних феромагнітних основах. При використанні індукційного перетворювача типу Ф за командою від контролера формується імпульс струму у первинній обмотці вимірювального перетворювача. При цьому на вторинній обмотці наводиться електрорушійна сила (ЕРС). Наведена ЕРС, що є функцією товщини поступає на контролер і перетворюється у величину товщини. Товщина покриття відображається на дисплеї.

Дослідження адгезії і стійкості до пошкодження шкрябанням виконували за ASTM D 2197 «Метод визначення адгезії органічних покриттів з допомогою шкрябання» з застосуванням приладу NOVOTEST Ц1-М. Прилад відповідає вимогам ISO 12137-1, ASTM D 5178, ASTM D 2197. Конструктивно прилад відповідає вимогам стандартів і являє собою установку з рухомих столом, на якому зразок для дослідження протягується під дією індентора. Принцип дії приладу оснований на дії індентора на покриття з певним навантаженням.

Покриття попередньо наносили на металеву підложку. Підложку з покриттям встановлювали на рухомий столик і виконували його протягування під дією індентора. Після цього відбувалась візуальна оцінка покриття і встановлювалось його руйнування (вишкрябуванням). Ступінь проникнення індентора в покриття може бути різним – в залежності від мети дослідження і прикладеного навантаження. Це може бути або поверхневий слід виробу, або повне руйнування [3].

Дослідження стійкості фторопластових покриттів до розтягу, розтріскуванню, відшаруванню від металеві поверхні виконували з допомогою штампу Еріксена методом вдавлювання на певну глибину пуансона зі сферичним наконечником.

Метод визначення міцності покриттів за Еріксом у відповідності з ГОСТ 29309 і ISO 1520 є ефективним комплексним методом дослідження якості покриття оскільки одночасно дозволяє оцінити міцність, адгезію і еластичність покриття. Прилад дозволяє точно виміряти міцність нанесеного покриття на металеву поверхню, на яку при подальшій експлуатації діють статичні і динамічні навантаження. Прилад складається з сталевого корпусу у вигляді скріплених станин, притискного поворотного механізму для фіксування досліджуваних зразків та пристрою розрахунку глибини вдавлювання пуансона з двома видами шкал (кругової і вертикальної). Зовнішній вид приладу з позначеннями складових частин представлено на рис. 1. Робота приладу полягає у методі вимірювання глибини вдавлювання металеві пластини з покриттям в момент його руйнування при вдавлюванні сферичного пуансона. Металева пластинка з покриттям фіксується притискним пристроєм на матриці і піддається поступовій дії пуансона, який вдавлюється у поверхню пластинки зі сторони без покриття. Дослідження закінчується коли покриття починає розтріскуватись. Результатом дослідження є глибина вдавлювання, що викликає руйнування покриття. Ця глибина вказана на шкалі пристрою розрахунку глибини вдавлювання пуансона.

Дослідження міцності при ударі фторопластових покриттів виконували з допомогою приладу NOVOTEST УДАР У1-4219-0,5 м. Прилад виготовлено згідно ДСТУ 4219 і відповідає вимогам стандартів.

Конструктивно прилад – це установка, на якій зразок для дослідження зазнає удару, шляхом

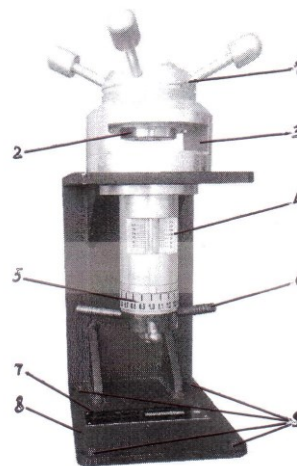


Рис. 1. Штамп Еріксена NOVOTEST SHE-1: 1 – поворотний притискний пристрій; 2 – матриця; 3 – проріз для зразків; 4 – пристрій розрахунку глибини вдавлювання пуансона (вертикальна шкала); 5 – пристрій розрахунку глибини вдавлювання пуансона (кругова шкала); 6 – кермо; 7 – маркування; 8 – станина; 9 – отвори для фіксування приладу

скидання на нього вантажу. Вантаж скидається всередині труби, на якій по всій довжині виконано розріз для переміщення вантажу. Поздовж розрізу нанесена шкала для визначення висоти скидання. Основа приладу (1) – сталевая трикутна плита товщиною 5 мм з гвинтами-ніжками (4) розміром М5×5мм з відстанню між ними 100 мм, що дозволяють встановлювати ударний пристрій на труби будь-якого діаметру. Прилад можна застосовувати і для плоских поверхонь. Направляюча (3) з шкалою від 0 до 50 см – сталевая труба, що закріплена під прямим кутом до основи, висотою 700 мм, внутрішнім діаметром 60 мм, товщиною стінки 0,5 мм з поздовжнім прорізом 600×5 мм. Вільно падаючий вантаж (7) з постійною масою, рівною $(3 \pm 0,001)$ кг, містить в собі: – сталевий стакан зовнішнім діаметром 59 мм, висотою 150 мм, товщиною стінки 1 мм; – сталевий ударник (6) сферичної форми радіусом 12,5 мм закріплений біля основи стакану. Зовнішній вид приладу з позначеними складовими частинами представлено на рис. 2.

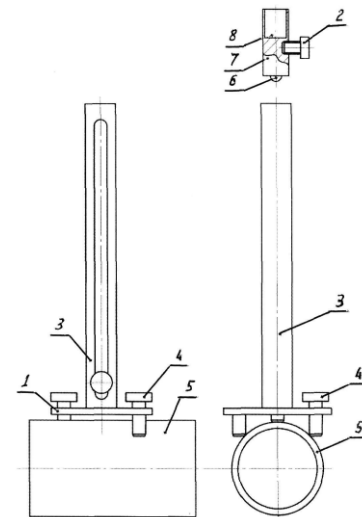


Рис. 2. Прилад ударний NOVOTEST УДАР У1-4219-0,5 м:

1 – основа; 2 – гвинт-рукоятка; 3 – направляюча; 4 – гвинти-ніжки; 5 – труба з досліджуваним покриттям; 6 – сталевий ударник; 7 – вантаж; 8 – підсилювач вантажу

Робота приладу основана на методі скидання на досліджуваній зразок вантажу масою $3 \pm 0,001$ кг з певної розрахованої висоти (висота вибирається, виходячи з ударної міцності покриття). Захисне покриття вважають задовільним, якщо після дослідження в 10 точках покриття не зруйновано, тобто при падінні вантажу з висоти в місцях удару немає пошкоджень. Пошкодження визначають візуально або більш точно іскровим дефектоскопом.

Міцність покриття при ударі визначають за формулою:

$$U = mgH, \quad (1)$$

де U – міцність покриття при ударі, Дж; m – маса вантажу, що рівна 3кг; g – прискорення вільного падіння (9.8 м/с^2); H – висота падіння вантажу, м.

Дослідження на стирання фторопластових покриттів виконували з допомогою приладу для випробування матеріалів на стійкість до стирання ДИТ-М. Методика випробування матеріалів на стійкість до стирання з допомогою приладу ДИТ-М була модернізована. Зразок закріплювався в затискному кільці на спеціально виготовленій підставці стороною з покриттям доверху. Автоматичний пристрій для зупинки приладу за умови повного зносу по товщині покриття було вимкнено оскільки щупи шкрябають покриття і були зняті. Випробування на стирання фторопластових покриттів виконували за швидкості стируючих головок 300 хв^{-1} ($5,0 \text{ с}^{-1}$). В якості абразиву використовували сіро шинельне сукно артикул 6405 (ГОСТ 6621-72). Розмір круга абразиву діаметром 25 мм. Зміну абразиву виконували після дослідження кожного зразка покриття. Якщо зразок має високу стійкість до стирання то зміну абразиву виконують після кожних 5 тисяч циклів. Установку досліджуваного зразка з покриттям у затискному кільці виконували за опущеного конусу. Після цього обережно піднімали зразок з затискним кільцем до контакту з абразивом і вмикали прилад (покази лічильника встановлювали на нульову позначку). Через кожних 1 тисячу циклів установку зупиняли і вимірювали товщину покриття. Дослідження припиняли за суттєвого зносу фторопластового покриття: товщина зношеного шару складала більше половини всієї товщини покриття.

Результатом випробування фторопластового покриття за абразивостійкістю є відношення середньої товщини зношеного шару покриття до числа циклів дослідження.

Результати вирішення основних завдань проблеми і їх обговорення

Застосовуючи прилад для визначення адгезії та стійкості покриттів до пошкодження шкрябанням NOVOTEST Ц1-М, проведені дослідження стійкості покриттів до пошкодження шкрябанням при навантаженні 7 кг (68.6 Н) для тришарових покриттів фторполімеру Ф-30П у яких ґрунтувальний шар містив фторполімер Ф-30П – 72 мас. %, графіт С-1 – 25 мас. %, аміноорганокремнезем на основі аеросилу – 3 мас. %.

Склад проміжного фторполімерного шару відрізняється від ґрунтувального дещо меншою кількістю промоторів адгезії, яких повинно бути достатньо для зчеплення з ґрунтувальним шаром. Крім того, до складу проміжного шару доцільно вводити наповнювачі з високою тепло- та електропровідністю. Це особливо важливо при електростатичному нанесенні фторполімерних покриттів. Склад проміжного фторполімерного шару: фторполімер Ф-30П – 79 мас. %, графіт С-1 – 20 мас. %, аміноорганокремнезем на основі аеросилу – 1 мас. %.

Оплавлення ґрунтувального і проміжного шарів на основі фторполімеру Ф-30П виконували за температури $245\text{--}250$ °С протягом однієї години.

Оскільки основне завдання нанесення зовнішнього шару фторопластового покриття на основі Ф-30П – підвищення зносостійкості, то до його складу було введено 1–3 мас. % $\text{ZrO}_2 + 3\% \text{ Y}_2\text{O}_3$ (500 °С) або 1–3 мас. % $\text{ZrO}_2 + 3\% \text{ Y}_2\text{O}_3$ (700 °С) або 1–3 мас. % аморфного гідроксиду цирконію, легованого іонами ітрію

(кількість ітрію в перерахунку на оксиди складає 3 моль %): $Zr(Y)O(OH)_2$ і 17 мас. % графіту С-1, а також 1 мас. % аміноорганокремнезему на основі аеросилу. Масовий вміст графіту С-1 у зовнішньому шарі в порівнянні з проміжним був зменшений від 20 % до 17 % для забезпечення достатньої адгезійної міцності, теплопровідності і електропровідності покриття.

Оплавлення зовнішнього шару тришарового покриття на основі фторполімеру Ф-30П виконували при температурі 228–235 °С протягом двох годин та охолоджували до кімнатної температури зі швидкістю 30–40 °С за годину.

Аналіз отриманих результатів показав, що введення наномодифікаторів оксидів цирконію сприяє інтенсивному структуруванню матриці, оскільки наночастинки можуть створювати ансамблі за типом кластерів. В результаті створюється армована полімерна система, що відрізняється підвищеними міцнісними і триботехнічними характеристиками. Так, стійкість до пошкодження шкрябанням збільшилась для тришарових фторопластових покриттів до складу зовнішнього шару якого входять: а) 17 мас. % графіту С-1 + 1 мас. % аміноорганокремнезему на основі аеросилу + 1 мас. % $ZrO_2 + 3\% Y_2O_3$ (500 °С) у 5,02 разів, б) 17 мас. % графіту С-1 + 1 мас. % аміноорганокремнезему на основі аеросилу + 1 мас. % $ZrO_2 + 3\% Y_2O_3$ (700 °С) у 8,98 разів, в) 17 мас. % графіту С-1 + 1 мас. % аміноорганокремнезему на основі аеросилу + 2 мас. % аморфного гідроксиду цирконію, легованого іонами ітрію (кількість ітрію в перерахунку на оксиди складає 3 моль %): $Zr(Y)O(OH)_2$ у 14,35 разів в порівнянні з немодифікованим фторопластовим покриттям Ф-30 П (рис. 3).

Ефект збільшення адгезійної взаємодії між матрицею фторполімеру та частинками наповнювача реалізується в результаті впливу наночастинок на макромолекули граничного шару і формування мілкосферолітних молекулярних утворень в об'ємі композиту. Частинки наномодифікатора збільшують адгезійну взаємодію полімеру та наповнювача і сприяють підвищенню рухомості структурних елементів фторполімеру [7]. Це полегшує протікання деформаційних процесів та приводить до підвищення міцнісних характеристик композиту. Особливо це проявляється при застосуванні аморфного гідроксиду цирконію, легованого іонами ітрію (кількість ітрію в перерахунку на оксиди складає 3 моль %): $Zr(Y)O(OH)_2$.

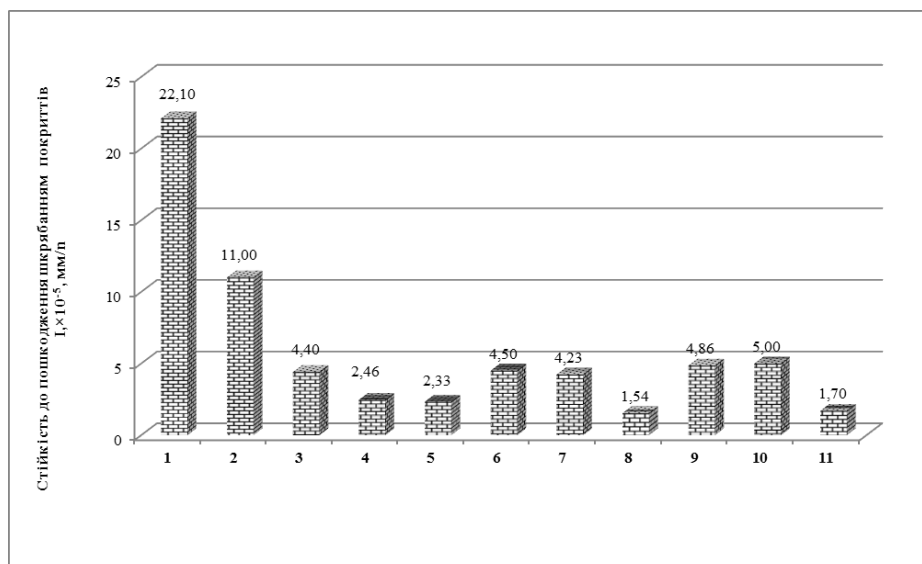


Рис. 3. Гістограма стійкості до пошкодження шкрябанням тришарових фторопластових покриттів на основі Ф-30П, за навантаження на індентор $P = 68,6$ Н, n – кількості протягувань до руйнування за таких складів зовнішнього шару: 1 – Фторполімер Ф-30П; 2 – Фторполімер Ф-30П + 17 мас. % графіту С-1; 3 – Фторполімер Ф-30П + 17 мас. % графіту С-1 + 1 мас. % аміноорганокремнезему на основі аеросилу + 1 мас. % $ZrO_2 + 3\% Y_2O_3$ (500 °С); 4 – Фторполімер Ф-30П + 17 мас. % графіту С-1 + 1 мас. % аміноорганокремнезему на основі аеросилу + 1 мас. % $ZrO_2 + 3\% Y_2O_3$ (700 °С); 5 – Фторполімер Ф-30П + 17 мас. % графіту С-1 + 1 мас. % аміноорганокремнезему на основі аеросилу + 1 мас. % аморфного гідроксиду цирконію, легованого іонами ітрію (кількість ітрію в перерахунку на оксиди складає 3 моль %): $Zr(Y)O(OH)_2$; 6 – Фторполімер Ф-30П + 17 мас. % графіту С-1 + 1 мас. % аміноорганокремнезему на основі аеросилу + 2 мас. % $ZrO_2 + 3\% Y_2O_3$ (500 °С); 7 – Фторполімер Ф-30П + 17 мас. % графіту С-1 + 1 мас. % аміноорганокремнезему на основі аеросилу + 2 мас. % $ZrO_2 + 3\% Y_2O_3$ (700 °С); 8 – Фторполімер Ф-30П + 17 мас. % графіту С-1 + 1 мас. % аміноорганокремнезему на основі аеросилу + 2 мас. % аморфного гідроксиду цирконію, легованого іонами ітрію (кількість ітрію в перерахунку на оксиди складає 3 моль %): $Zr(Y)O(OH)_2$; 9 – Фторполімер Ф-30П + 17 мас. % графіту С-1 + 1 мас. % аміноорганокремнезему на основі аеросилу + 3 мас. % $ZrO_2 + 3\% Y_2O_3$ (500 °С); 10 – Фторполімер Ф-30П + 17 мас. % графіту С-1 + 1 мас. % аміноорганокремнезему на основі аеросилу + 3 мас. % $ZrO_2 + 3\% Y_2O_3$ (700 °С); 11 – Фторполімер Ф-30П + 17 мас. % графіту С-1 + 1 мас. % аміноорганокремнезему на основі аеросилу + 3 мас. % аморфного гідроксиду цирконію, легованого іонами ітрію (кількість ітрію в перерахунку на оксиди складає 3 моль %): $Zr(Y)O(OH)_2$.

Дослідження міцності при ударі фторопластових покриттів виконували за допомогою приладу NOVOTEST УДАР У1-4219-0,5 м. Результати досліджень представлені на рис.4.

Дослідження на міцність при ударі тришарових фторопластових покриттів на основі Ф-30П модифікованих нанопорошками оксидів і гідроксиду цирконію показали досить велику ефективність при введенні їх до складу в кількості 1–3 мас. % (рис. 4). Найбільшу міцність при ударі виявили для

тришарового фторопластового покриття до складу зовнішнього шару якого входить 17 мас. % графіту С-1 + 1 мас. % аміноорганокремнезему на основі аеросилу + 2 мас. % аморфного гідроксиду цирконію, легованого іонами ітрію (кількість ітрію в перерахунку на оксиди складає 3 моль %): $Zr(Y)O(OH)_2$ – 13,82 Дж, що у 2,76 разів перевищує міцність при ударі порівнянні з немодифікованим фторопластовим покриттям Ф-30 П.

Визначена оптимальна концентрація наномодифікатора для тришарових фторопластових покриттів на основі Ф-30П – 2 мас. % нанопорошків оксидів і гідроксиду цирконію. При введенні до складу зовнішнього шару тришарового фторопластового покриття на основі Ф-30П 17 мас. % графіту С-1 + 1 мас. % аміноорганокремнезему на основі аеросилу + 2 мас. % ZrO_2 + 3 % Y_2O_3 (500 °С) міцність при ударі покриття зростає у 2 рази, а при заміні нанопорошку ZrO_2 + 3 % Y_2O_3 (500 °С) на ZrO_2 + 3 % Y_2O_3 (700 °С) міцність при ударі покриття зростає у 2,65 рази в порівнянні з немодифікованим фторопластовим покриттям Ф-30 П (рис. 4).

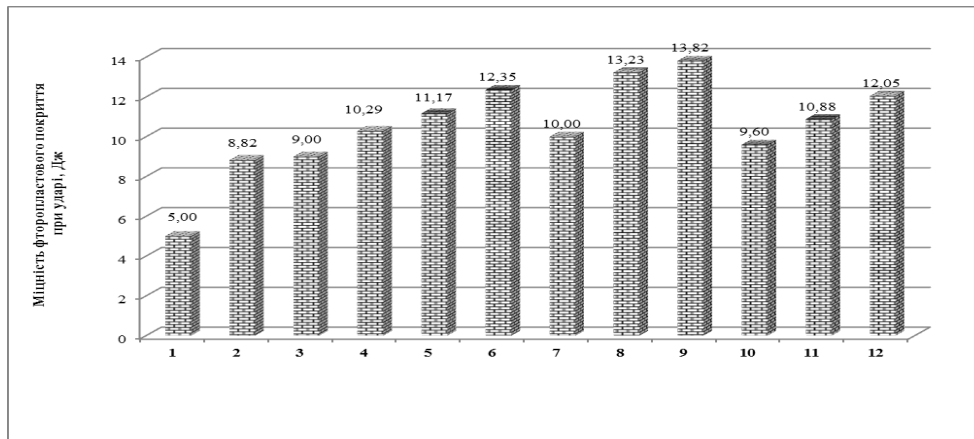


Рис. 4. Гістограма міцності при ударі тришарових фторопластових покриттів на основі Ф-30П за таких складів зовнішнього шару: 1 – Фторполімер Ф-30П; 2 – Фторполімер Ф-30П + 17 мас. % графіту С-1; 3 – Фторполімер Ф-30П + 17 мас. % графіту С-1 + 1 мас. % аміноорганокремнезему на основі аеросилу + 1 мас. % ZrO_2 + 3% Y_2O_3 (500 °С); 4 – Фторполімер Ф-30П + 8 мас. % графіту С-1 + 1 мас. % аміноорганокремнезему на основі аеросилу + 1 мас. % ZrO_2 + 3% Y_2O_3 (700 °С); 5 – Фторполімер Ф-30П + 17 мас. % графіту С-1 + 1 мас. % аміноорганокремнезему на основі аеросилу + 1 мас. % ZrO_2 + 3% Y_2O_3 (700 °С); 6 – Фторполімер Ф-30П + 17 мас. % графіту С-1 + 1 мас. % аміноорганокремнезему на основі аеросилу + 1 мас. % аморфного гідроксиду цирконію, легованого іонами ітрію (кількість ітрію в перерахунку на оксиди складає 3 моль %): $Zr(Y)O(OH)_2$; 7 – Фторполімер Ф-30П + 17 мас. % графіту С-1 + 1 мас. % аміноорганокремнезему на основі аеросилу + 2 мас. % ZrO_2 + 3% Y_2O_3 (500 °С); 8 – Фторполімер Ф-30П + 17 мас. % графіту С-1 + 1 мас. % аміноорганокремнезему на основі аеросилу + 2 мас. % ZrO_2 + 3% Y_2O_3 (700 °С); 9 – Фторполімер Ф-30П + 17 мас. % графіту С-1 + 1 мас. % аміноорганокремнезему на основі аеросилу + 2 мас. % аморфного гідроксиду цирконію, легованого іонами ітрію (кількість ітрію в перерахунку на оксиди складає 3 моль %): $Zr(Y)O(OH)_2$; 10 – Фторполімер Ф-30П + 17 мас. % графіту С-1 + 1 мас. % аміноорганокремнезему на основі аеросилу + 3 мас. % ZrO_2 + 3% Y_2O_3 (500 °С); 11 – Фторполімер Ф-30П + 17 мас. % графіту С-1 + 1 мас. % аміноорганокремнезему на основі аеросилу + 3 мас. % ZrO_2 + 3% Y_2O_3 (700 °С); 12 – Фторполімер Ф-30П + 17 мас. % графіту С-1 + 1 мас. % аміноорганокремнезему на основі аеросилу + 3 мас. % аморфного гідроксиду цирконію, легованого іонами ітрію (кількість ітрію в перерахунку на оксиди складає 3 моль %): $Zr(Y)O(OH)_2$

Дослідження на абразивостійкість фторопластових покриттів виконували з допомогою приладу для випробування матеріалів на стійкість до стирання ДИТ-М.

Результати досліджень представлені на рисунку 5.

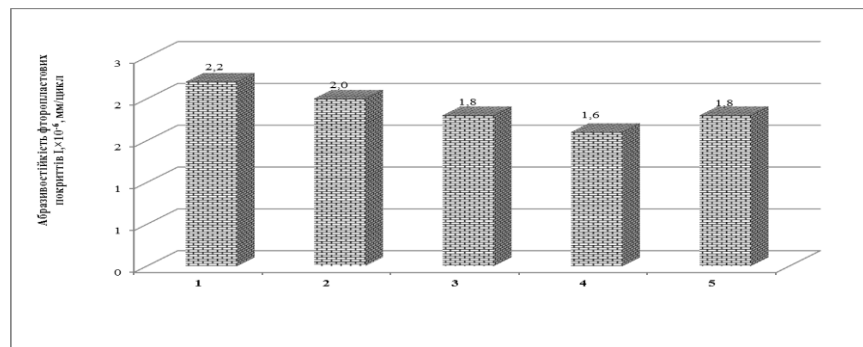


Рис. 5. Гістограма абразивостійкості тришарових фторопластових покриттів на основі Ф-30 П за таких складів зовнішнього шару: 1 – Фторполімер Ф-30П; 2 – Фторполімер Ф-30П + 17 мас. % графіту С-1; 3 – Фторполімер Ф-30П + 17 мас. % графіту С-1 + 1 мас. % аміноорганокремнезему на основі аеросилу + 1 мас. % ZrO_2 + 3% Y_2O_3 (500 °С); 4 – Фторполімер Ф-30П + 17 мас. % графіту С-1 + 1 мас. % аміноорганокремнезему на основі аеросилу + 2 мас. % ZrO_2 + 3% Y_2O_3 (500 °С); 5 – Фторполімер Ф-30П + 17 мас. % графіту С-1 + 1 мас. % аміноорганокремнезему на основі аеросилу + 3 мас. % ZrO_2 + 3% Y_2O_3 (500 °С)

Встановлено, що при введенні до складу зовнішнього шару тришарового фторопластового покриття

на основі Ф-30 П 17 мас. % графіту С-1 + 1 мас. % аміноорганокремнезему на основі аеросилу + 2 мас. % $ZrO_2 + 3\% Y_2O_3$ (500 °С) абразивостійкість покриття зростає у 1,38 разів (рис.5).

Дослідження стійкості фторопластових покриттів до розтягу, розтріскування, відшарування від металевої поверхні виконували з допомогою штампу Еріксена методом вдвлювання на певну глибину пуансона зі сферичним наконечником. Результати досліджень представлені на рис. 6

Встановлено, що еластичність збільшилась для тришарового фторопластового покриття до складу зовнішнього шару якого входять : а) 17 мас. % графіту С-1 + 1 мас. % аміноорганокремнезему на основі аеросилу + 2 мас. % $ZrO_2 + 3\% Y_2O_3$ (500 °С) у 1,64 рази, б) 17 мас. % графіту С-1 + 1 мас. % аміноорганокремнезему на основі аеросилу + 2 мас. % $ZrO_2 + 3\% Y_2O_3$ (700 °С) у 1,68 разів, в) 17 мас. % графіту С-1 + 1 мас. % аміноорганокремнезему на основі аеросилу + 2 мас. % аморфного гідроксиду цирконію, легованого іонами ітрію (кількість ітрію в перерахунку на оксиди складає 3 моль %): $Zr(Y)O(OH)_2$ у 1,84 рази в порівнянні з немодифікованим фторопластовим покриттям Ф-30 П. (рис. 6).

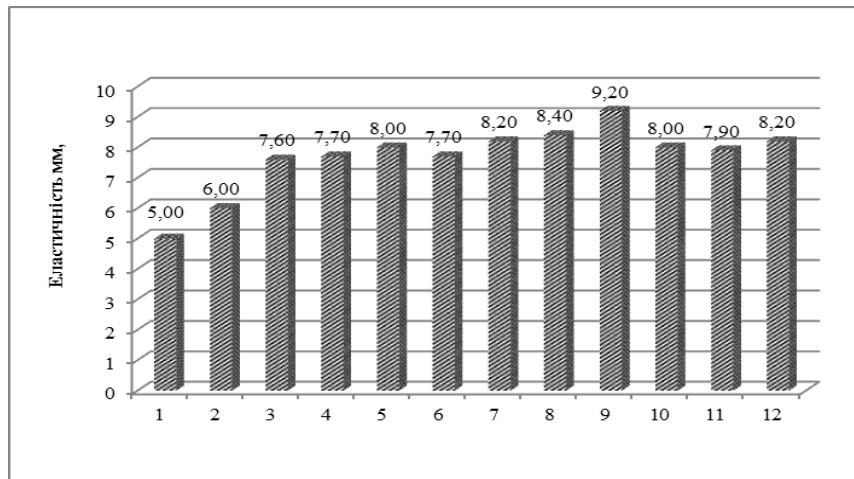


Рис. 6. Гістограма еластичності тришарових фторопластових покриттів на основі Ф-30П за таких складів зовнішнього шару: 1 – Фторполімер Ф-30П; 2 – Фторполімер Ф-30П + 17 мас. % графіту С-1; 3 – Фторполімер Ф-30П + 17 мас. % графіту С-1 + 1 мас. % аміноорганокремнезему на основі аеросилу + 1 мас. % $ZrO_2 + 3\% Y_2O_3$ (500 °С); 4 – Фторполімер Ф-30П + 8 мас. % графіту С-1 + 1 мас. % аміноорганокремнезему на основі аеросилу + 1 мас. % $ZrO_2 + 3\% Y_2O_3$ (700 °С); 5 – Фторполімер Ф-30П + 17 мас. % графіту С-1 + 1 мас. % аміноорганокремнезему на основі аеросилу + 1 мас. % $ZrO_2 + 3\% Y_2O_3$ (700 °С); 6 – Фторполімер Ф-30П + 17 мас. % графіту С-1 + 1 мас. % аміноорганокремнезему на основі аеросилу + 1 мас. % аморфного гідроксиду цирконію, легованого іонами ітрію (кількість ітрію в перерахунку на оксиди складає 3 моль %): $Zr(Y)O(OH)_2$; 7 – Фторполімер Ф-30П + 17 мас. % графіту С-1 + 1 мас. % аміноорганокремнезему на основі аеросилу + 2 мас. % $ZrO_2 + 3\% Y_2O_3$ (500 °С); 8 – Фторполімер Ф-30П + 17 мас. % графіту С-1 + 1 мас. % аміноорганокремнезему на основі аеросилу + 2 мас. % $ZrO_2 + 3\% Y_2O_3$ (700 °С); 9 – Фторполімер Ф-30П + 17 мас. % графіту С-1 + 1 мас. % аміноорганокремнезему на основі аеросилу + 2 мас. % аморфного гідроксиду цирконію, легованого іонами ітрію (кількість ітрію в перерахунку на оксиди складає 3 моль %): $Zr(Y)O(OH)_2$; 10 – Фторполімер Ф-30П + 17 мас. % графіту С-1 + 1 мас. % аміноорганокремнезему на основі аеросилу + 3 мас. % $ZrO_2 + 3\% Y_2O_3$ (500 °С); 11 – Фторполімер Ф-30П + 17 мас. % графіту С-1 + 1 мас. % аміноорганокремнезему на основі аеросилу + 3 мас. % $ZrO_2 + 3\% Y_2O_3$ (700 °С); 12 – Фторполімер Ф-30П + 17 мас. % графіту С-1 + 1 мас. % аміноорганокремнезему на основі аеросилу + 3 мас. % аморфного гідроксиду цирконію, легованого іонами ітрію (кількість ітрію в перерахунку на оксиди складає 3 моль %): $Zr(Y)O(OH)_2$

Механізмом модифікуючої дії наномодифікаторів на структуру фторполімеру Ф-30 П є збільшення густини структурних елементів в результаті формування міжфазних шарів з певним розташуванням на межі розділу полімер – наповнювач. За малих вмістів наповнювача (1–3 мас. %) швидкість кристалізації зростає, а при збільшенні концентрації наповнювача більше 3 мас. % – зменшується в результаті координації частинок одна з одною, збільшення їх розмірів і зниження структурної активності. За вмісту наповнювача від 1 до 3 мас. % відбуваються такі структурні зміни в фторопластовій композиції: утворюються сфероліти спочатку неоднорідні за своїми геометричними параметрами, далі однорідність їх зростає, спостерігається збільшення густини упакування, частинки наповнювача розташовуються в міжелементних об'ємах матриці, координаційно зв'язуються один з одним з утворенням каркасної структури. Зносостійкість матеріалу при цьому зростає, а фізико-механічні характеристики дещо підвищуються або залишаються на рівні вихідного матеріалу. Збільшення вмісту наповнювача від 1 до 3 мас. % в складі фторопластової композиції супроводжується інтенсифікацією в поверхневих шарах деструктивних і структуруючих процесів. В них наповнювач виступає агентом шивання фрагментів триборозкладу макромолекул. Це і пояснює механізм підвищення зносостійкості композиційних фторопластових матеріалів. Окрім цього, частинки наповнювача приймають участь у формуванні зносостійкого шару композиту з підвищеним опором до контактних деформацій, спостерігається підвищення адгезії плівки переносу до контртіла за рахунок координаційної активності наночастинок [7].

Товщина полімерного шару залежить від часу електроосадження, опору полімерних частинок і напруженості електростатичного поля. Для кожного матеріалу при певній напруженості електричного поля існує гранична товщина шару частинок, що осідають. Це пояснюється накопиченням полімерним шаром

заряду, що компенсує зовнішнє поле. Чим вище напруженість електростатичного поля, тим більший заряд набувають частинки і тим швидше утворюється шар, що перешкоджає подальшому осадженню. З ростом напруженості поля підвищується густина шару та адгезія. Збільшенню густини шару сприяє зниження питомого опору матеріалу і зменшення розмірів частинок полімеру.

До недоліків електростатичного нанесення фторопластових покриттів необхідно віднести те, що при значному підвищенні напруженості поля спостерігається зниження товщини полімерного шару. Це викликано виникненням явища зворотного коронування або процесами розрядки для матеріалів з високою електропровідністю. Також суттєвий вплив має вологість навколишнього повітря. Так, збільшення відносної вологості повітря на 15 % приводить до зменшення кількості матеріалу, що осідає більш ніж в 2 рази.

Тому перший ґрунтувальний шар наносили при напруженості електростатичного поля в 50 кВ, а для наступних шарів напруженість збільшували до 60–70 кВ.

Запропоновані фторполімерні покриття дають можливість продовжити термін експлуатації технологічного обладнання, замінити нержавіючу сталь і кольорові метали на вуглецеву сталь, вартість якої значно менша. При цьому підвищується якість продукції, рентабельність виробництва і збільшується термін використання технологічного інвентарю та оснащення.

Висновки

1. Встановлено, що введення наномодифікаторів оксидів цирконію сприяє інтенсивному структуруванню матриці, оскільки наночастинки можуть створювати ансамблі за типом кластерів. В результаті створюється армована полімерна система, що відрізняється підвищеними міцнісними і триботехнічними характеристиками. Так, стійкість до пошкодження шкрябанням збільшилась для тришарових фторопластових покриттів до складу зовнішнього шару якого входять: а) 17 мас. % графіту С-1 + 1 мас. % аміноорганокремнезему на основі аеросилу + 1 мас. % $ZrO_2 + 3\% Y_2O_3$ (500 °С) у 5,02 разів, б) 17 мас. % графіту С-1 + 1 мас. % аміноорганокремнезему на основі аеросилу + 1 мас. % $ZrO_2 + 3\% Y_2O_3$ (700 °С) у 8,98 разів, в) 17 мас. % графіту С-1 + 1 мас. % аміноорганокремнезему на основі аеросилу + 2 мас. % аморфного гідроксиду цирконію, легованого іонами ітрію (кількість ітрію в перерахунку на оксиди складає 3 моль %): $Zr(Y)O(OH)_2$ у 14,35 разів в порівнянні з немодифікованим фторопластовим покриттям Ф-30 П.

2. Наномодифікатори оксидів цирконію сприяють покращенню еластичності і міцності при ударі розроблених фторопластових покриттів. Так, еластичність збільшилась для тришарового фторопластового покриття до складу зовнішнього шару якого входять : а) 17 мас. % графіту С-1 + 1 мас. % аміноорганокремнезему на основі аеросилу + 2 мас. % $ZrO_2 + 3\% Y_2O_3$ (500 °С) у 1,64 рази, б) 17 мас. % графіту С-1 + 1 мас. % аміноорганокремнезему на основі аеросилу + 2 мас. % $ZrO_2 + 3\% Y_2O_3$ (700 °С) у 1,68 разів, в) 17 мас. % графіту С-1 + 1 мас. % аміноорганокремнезему на основі аеросилу + 2 мас. % аморфного гідроксиду цирконію, легованого іонами ітрію (кількість ітрію в перерахунку на оксиди складає 3 моль %): $Zr(Y)O(OH)_2$ у 1,84 рази в порівнянні з не модифікованим фторопластовим покриттям Ф-30 П. Встановлено, що найбільша міцність при ударі характерна для тришарового фторопластового покриття до складу зовнішнього шару якого входить 17 мас. % графіту С-1 + 1 мас. % аміноорганокремнезему на основі аеросилу + 2 мас. % аморфного гідроксиду цирконію, легованого іонами ітрію (кількість ітрію в перерахунку на оксиди складає 3 моль %): $Zr(Y)O(OH)_2$ – 13,82 Дж, що у 2,76 разів перевищує міцність при ударі в порівнянні з немодифікованим фторопластовим покриттям Ф-30 П.

3. Дослідження на стійкість до стирання розроблених фторопластових покриттів показали, що при введенні до складу зовнішнього шару тришарового фторопластового покриття на основі Ф-30 П 17 мас. % графіту С-1 + 1 мас. % аміноорганокремнезему на основі аеросилу + 2 мас. % $ZrO_2 + 3\% Y_2O_3$ (500) °С абразивостійкість покриття зростає у 1,38 разів.

4. Розроблена технологія електростатичного нанесення наномодифікованого фторопластового покриття на металеву поверхню: перший ґрунтувальний шар необхідно наносити при напруженості електростатичного поля в 50 кВ, а для наступних шарів напруженість збільшувати до 60–70 кВ.

5. Запропоновані фторопластові покриття дають можливість продовжити термін експлуатації технологічного обладнання, підвищити якість продукції, рентабельність виробництва і збільшити термін використання технологічного інвентарю та оснащення.

Література

1. Sina Ebnesajjad. Fluoroplastics Volume 1: Non-Melt Processible Fluoropolymers. The Definitive User's Guide and Data Book. Second Edition. 2015. 698 p.
2. Sina Ebnesajjad. Fluoroplastics Volume 2: Melt Processible Fluoropolymers. The Definitive User's Guide and Data Book. Second Edition. 2016. 745 p.
3. Олександренко В. П. Вплив складу і технологічних факторів на адгезійну міцність фторопластових покриттів до металевих поверхонь / В. П. Олександренко, В. П. Свідерський, Л. М. Кириченко, В. В. Сфіменко // Вісник Хмельницького національного університету: Технічні науки . – 2021. – № 5. – С. 45–51. – DOI 10.31891/2307-5732-2021-301-5-45-51, ISSN 2307-5732
4. Пат. № 112246 Україна, МПК С09D 127/00. Антиадгезійне, зносостійке покриття / Свідерський В. П., Кириченко Л. М., заявник і патентовласник Хмельницький національний університет, заявка у 2016 05670 від 26.05.2016, опубл. 12.12.2016, Бюл. № 23, 5 с.

5. Sina Ebnesajjad and Pradip R. Khaladkar. Fluoropolymer Applications in the Chemical Processing Industries The Definitive User's Guide and Handbook A volume in Plastics Design Library. 2017. 436 p.
6. Berladir K. V., Budnik O. A., Dyadyura K. A., Svidersky V. A., Kravchenko Ya. O. Physicochemical principles of polymer composite materials technology based on polytetrafluoroethylene. High Temperature Material Processes. 2016. № 20 (2). P. 157–184.
7. Dykha A., Svidersky V., Danilenko I., Bilichenko V., Kukurudzyak Yu., Kirichenko L. et. al. (2020). Design and study of nanomodified composite fluoropolimer materials for tribotechnical purposes. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5(12-107), pp. 38-48, doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.205779>
8. Yan Y., Jia Z., Yang Y. Preparation and mechanical properties of PTFE/nano-EG composites reinforced with nanoparticles. Procedia Environmental Sciences. 2011. V. 10. P. 929-935.
9. Пат. № 81966 Україна, МПК (2006) : C01G 25/00, C04B 35/48, F26B 3/32, F26B 5/04. Процес одержання порошків оксидів / Т. Є. Константінова, М. П. Пилипенко, В. І. Алексєєнко, І. А. Даніленко ; заявник і патентовласник Донецький фізико-технічний інститут ім. О.О. Галкіна НАН України. – № 200601880 ; заявл. 21.02.2006, опубл. 25.02.2008, Бюл. № 10. – 24 с.
10. Наукові основи розробки полімерних композиційних матеріалів триботехнічного призначення на основі політетрафторетилену : монографія / Х. В. Берладір, О. А. Будник, К. О. Дядюра та ін. ; за заг. ред. К. О. Дядюри. – Суми : Сумський державний університет, 2017. – 176 с.

References

1. Sina Ebnesajjad. Fluoroplastics Volume 1: Non-Melt Processible Fluoropolymers. The Definitive Users Guide and Data Book. Second Edition. 2015. 698 p.
2. Sina Ebnesajjad. Fluoroplastics Volume 2: Melt Processible Fluoropolymers. The Definitive Users Guide and Data Book. Second Edition. 2016. 745 p.
3. Oleksandrenko V. P. Vplyv skladu i tekhnolohichnykh faktoriv na adheziinu mitsnist ftoroplastovykh pokryttiv do metalevykh poverkhon / V. P. Oleksandrenko, V. P. Sviderskyi, L. M. Kyrychenko, V. V. Yefimenko // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu: Tekhnichni nauky . – 2021. – № 5. – S. 45–51. – DOI 10.31891/2307-5732-2021-301-5-45-51, ISSN 2307-5732
4. Пат. № 112246 Україна, МПК S09D 127/00. Antyadheziine, znosostiike pokryttia / Sviderskyi V. P., Kyrychenko L. M., zaiavnyk i patentovlasnyk Khmelnytskyi natsionalnyi universytet, zaiavka u 2016 05670 vid 26.05.2016, opubl. 12.12.2016, Biul. № 23, 5 s.
5. Sina Ebnesajjad and Pradip R. Khaladkar. Fluoropolymer Applications in the Chemical Processing Industries The Definitive Users Guide and Handbook A volume in Plastics Design Library. 2017. 436 p.
6. Berladir K. V., Budnik O. A., Dyadyura K. A., Svidersky V. A., Kravchenko Ya. O. Physicochemical principles of polymer composite materials technology based on polytetrafluoroethylene. High Temperature Material Processes. 2016. № 20 (2). P. 157–184.
7. Dykha A., Svidersky V., Danilenko I., Bilichenko V., Kukurudzyak Yu., Kirichenko L. et. al. (2020). Design and study of nanomodified composite fluoropolimer materials for tribotechnical purposes. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5(12-107), pp. 38-48, doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.205779>
8. Yan Y., Jia Z., Yang Y. Preparation and mechanical properties of PTFE/nano-EG composites reinforced with nanoparticles. Procedia Environmental Sciences. 2011. V. 10. P. 929-935.
9. Пат. № 81966 Україна, МПК (2006) : S01G 25/00, C04B 35/48, F26B 3/32, F26B 5/04. Protses oderzhannia poroshkiv oksydiv / T. Ye. Konstantinova, M. P. Pylypenko, V. I. Aliexsieienko, I. A. Danilenko ; zaiavnyk i patentovlasnyk Donetskyi fizyko-tekhnichniy instytut im. O.O. Halkina NAN Ukrainy. – № 200601880 ; zaiavl. 21.02.2006, opubl. 25.02.2008, Biul. № 10. – 24 s.
10. Naukovi osnovy rozrobky polimernykh kompozytsiynykh materialiv trybotekhnichnoho pryznachennia na osnovi politetraforetylenu : monohrafiia / Kh. V. Berladir, O. A. Budnyk, K. O. Diadiura ta in. ; za zah. red. K. O. Diadiury. – Sumy : Sumskyi derzhavnyi universytet, 2017. – 176 s.