

**Ю.О. Похил**, **В.В. Абраїмов**, **В.О. Лотоцька**

Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б.І. Веркіна НАН України, Харків

## **ІНФОРМАЦІЯ ПРО ВИКОНАННЯ ІННОВАЦІЙНОГО ПРОЕКТУ «РОЗРОБЛЕННЯ І ВПРОВАДЖЕННЯ КРІОГЕННО-ВАКУУМНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ОБРОБКИ НЕМЕТАЛЕВИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЇХ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ»**



*Описані технології кріогенно-вакуумного термоцикування та радіаційного зміцнення полімерних композиційних і плівкових матеріалів для підвищення їхніх електрорезистивних і механічних характеристик.*

*Ключові слова: кріогенно-вакуумні технології, композиційні полімерні матеріали, термоциклічна обробка, радіаційне зміцнення, питомий електроопір.*

Сучасне космічне апарато- та приладобудування вимагає збільшення терміну активного існування космічних апаратів (КА) негерметичної конструкції, тривалої експлуатації наукової апаратури в умовах прямого діяння факторів космічного простору, а також оптимізації масо-габаритних параметрів КА шляхом широкого застосування полімерних композиційних і плівкових матеріалів.

Космічне середовище негативно впливає на службові характеристики конструкційних і функціональних матеріалів КА, спричиняючи їхню деградацію і втрату службових характеристик. На апарат діють потоки електронів і протонів радіаційних поясів Землі, електронно-іонні компоненти магнітосферної та іоносферної плазми з енергією часток 0,1–100 МеВ, електромагнітне випромінювання Сонця. В конструкціях зовнішніх поверхонь і внутрішніх відсіків КА застосовуються різноманітні діе-

лектричні матеріали. Через різні умови опромінення і відмінності вторинно-емісійних характеристик діелектричних матеріалів відбувається радіаційна електризація і виникнення значної різниці потенціалів між окремими елементами КА та між КА і оточуючою плазмою. Внаслідок цього виникають поверхневі і об'ємні електричні пробиття, які виводять з ладу життєво важливі системи КА. Для запобігання таким радіаційно-стимульованим пробиттям необхідні матеріали з високими електрорезистивними і діелектричними характеристиками та електричною міцністю. Вирішення цієї проблеми потребує розроблення засобів підвищення питомих об'ємного і поверхневого опорів і електричної міцності полімерних композиційних матеріалів.

Необхідність у підвищенні механічних властивостей полімерних матеріалів обумовлена їхнім широким застосуванням в елементах конструкції космічних апаратів. Ці матеріали в умовах експлуатації перебувають у напруже-

ному стані, що наближається до межі їх пластичності. Загальним недоліком полімерних матеріалів є висока чутливість до іонізуючих випромінювань. Структурні зміни під впливом опромінювання викликають зміни всього комплексу властивостей полімерів, особливо механічних характеристик. Результати попередніх досліджень впливу різних типів та доз іонізуючого опромінювання на механічні властивості полімерів вказують на можливість його використання для зміцнення матеріалу.

З огляду на актуальність обох проблем в нашому проекті вирішувались такі задачі на основі результатів попередніх досліджень:

- ✦ розроблення і впровадження криогенно-вакуумної термоциклічної обробки неметалевих композиційних матеріалів космічного призначення для підвищення їх електрорезистивних властивостей;
- ✦ розроблення і впровадження технології криогенно-вакуумного радіаційного зміцнення полімерних матеріалів космічного призначення для підвищення їх механічних властивостей.

У звіті про виконання проекту наведено методики криогенно-вакуумних технологій термоциклічної обробки і радіаційного зміцнення неметалевих матеріалів, методики вимірювання електрорезистивних і механічних характеристик, оптимізовані технологічні режими, результати випробувань властивостей матеріалів після дії на них розроблених технологій, описи типових технологічних процесів.

Проект виконувався спільно з організацією-партнером ДП «КБ «Південне»». Були впроваджені розроблені технології, які використовуються при розробці елементів електрорадіовиробів, систем терморегулювання та енергозабезпечення нових космічних апаратів. В Україні подано заявки на винахід «Спосіб поліпшення електрофізичних властивостей полімерних неметалевих композиційних матеріалів» та на корисну модель «Спосіб підвищення механічних властивостей плівкових полімерних матеріалів».

Нижче наведено короткий опис результатів дії розроблених технологій на електрорезистивні і механічні властивості полімерних композиційних і плівкових матеріалів.

#### **КРИОГЕННО-ВАКУУМНА ТЕРМОЦИКЛІЧНА ОБРОБКА НЕМЕТАЛЕВИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ**

Для неметалевих полімерних композиційних матеріалів визначальними електрорезистивними характеристиками є питомий об'ємний  $\rho_v$  і поверхневий  $\rho_s$  опори, діелектрична проникність  $\xi$  та тангенс кута діелектричних втрат  $\text{tg}\delta$ .

Технологічний режим обробки матеріалів у камері стенда термовакуумного циклування визначається параметрами: вакуум, амплітуди температури в термоциклі, тривалість циклу, кількість циклів. За результатами проведених досліджень визначена область оптимальних параметрів технологічного режиму, за яких досягається максимальне зростання електричного опору матеріалів типу гетинаксу і текстоліт.

В результаті термоциклічної обробки матеріалів за оптимальними режимами питомий об'ємний опір  $\rho_v$  гетинаксу збільшився на 3 порядки величини (від початкового  $1,5 \cdot 10^9$  до  $2,9 \cdot 10^{12}$  Ом·м), а текстоліту — на 6 порядків (від  $1 \cdot 10^7$  до  $2 \cdot 10^{13}$  Ом·м). Питомий поверхневий опір  $\rho_s$  збільшився від  $1,1 \cdot 10^{12}$  до  $1,0 \cdot 10^{15}$  Ом для гетинаксу і з  $3,0 \cdot 10^{10}$  до  $8,5 \cdot 10^{15}$  Ом для текстоліту. Встановлено, що для обох матеріалів величина зростання питомих електроопорів істотно залежить від амплітуди термоциклування.

Значення діелектричної проникності  $\xi$  гетинаксу майже не чутливе до вакуумного термоциклування, а для текстоліту спостерігається зменшення  $\xi$  майже на 30 %; таким же чином поводить себе тангенс кута діелектричних втрат  $\text{tg}\delta$  матеріалів.

Виявлено, що незалежно від типу матеріалу і амплітуди термоциклування кінетичні криві залежності  $\rho_v(N)$  від номера  $N$  термоциклу характеризуються двома стадіями — «швидкого» зростання  $\rho_v$  на початкових циклах і «повільного» підвищення  $\rho_v$  з тенденцією насичення на подальших термоциклах. Такий двохстадій-

ний характер кінетичних кривих якісно спадає з кінетикою процесів газовиділень і втрати маси матеріалами, що знаходяться у вакуумному середовищі. Ці залежності описуються двома експонентами, що відповідають «швидкому» газовиділенню слабко зв'язаних летких компонентів композиту на початковій стадії процесу і «повільному» газовиділенню сильно зв'язаних летких складових на подальшій стадії витримки матеріалів у вакуумі.

Проведено дослідження стійкості в часі досягнутих значень питомого об'ємного опору після термоциклічної обробки. Виявлено, що під час витримки композитів у нормальних лабораторних умовах впродовж 10–20 діб відбувається релаксація опору до значень, які перевищують початкові лише в десятки разів. Процес релаксації  $\rho_v(t)$  також має дві стадії – швидке на початку і повільне при подальшому зменшенні  $\rho_v$ . Запобігти зменшенню  $\rho_v$  з часом після термоциклування можна шляхом захисту поверхні матеріалу лаковим покриттям. Застосування одного з варіантів захисного покриття для гетинаксу забезпечило незначне зменшення  $\rho_v$  впродовж 20 діб.

Технологія термоциклічної обробки базується на спільній дії двох фізичних чинників – криогенного вакууму і циклічної зміни температури в інтервалі  $-t_1^{\circ}\text{C} \div +t_2^{\circ}\text{C}$ . Кожен з цих факторів спричиняє термостимульовані зміни структурного стану полімерного композиційного матеріалу, що викликає відповідні зміни електрофізичних характеристик. Цей ефект спільної дії двох факторів не є адитивним порівняно з ефектом дії окремих факторів поодиноці, а значно підвищує його. Таким чином, розроблена технологія використовує синергетичний ефект для значного поліпшення службових характеристик діелектричних матеріалів, і це є оригінальною відмінною особливістю цієї технології.

#### КРИОГЕННО-ВАКУУМНЕ РАДІАЦІЙНЕ ЗМІЦНЕННЯ ПЛІВКОВИХ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ

Для полімерних плівкових матеріалів визначальними механічними характеристиками

є: модуль пружності  $E$ , умовна межа плинності  $\sigma_n$ , напруга руйнування  $\sigma_p$ , максимальне відносне видовження  $\delta$ . Для розрахунку цих характеристик зразок матеріалу на деформаційній машині МРК-1 зазнає одноосьового розтягування з постійною швидкістю деформування до моменту розриву з одночасним записом кривої деформації в координатах *навантаження—час*. Отриманий графік перебудовується в деформаційну криву *механічна напруга—відносне видовження*, яка використовується для обчислення механічних характеристик.

Радіаційне зміцнення здійснювали в криогенно-вакуумній камері комплексного імітатора факторів космосу одночасною дією на полімерну плівку суміщених потоків протонів і електронів. Параметри технологічного режиму такі: вакуум, енергії протонів і електронів, щільність потоків частинок, флюенси частинок. Визначено область оптимальних параметрів технологічного режиму, за яких досягається максимальне поліпшення механічних характеристик плівок полііміду ПМ-А (товщина 40 мкм). В результаті радіаційного зміцнення плівок полііміду за оптимальним режимом умовна межа плинності підвищились на 55 %, модуль пружності – на 110 %, руйнівна напруга зменшилась приблизно на 10 %, максимальне відносне видовження (еластичність) плівки залишилась на достатньому рівні без ознак окрихчування.

У технології радіаційного зміцнення використовується ефект неадитивності сумарного впливу одночасно діючих «м'яких» комбінованих радіаційних навантажень – опромінювання суміщеними потоками протонів і електронів з відносно невеликими енергіями (до 200 кеВ) і флюенсами до  $10^{16}$  см<sup>-2</sup>, що приводить до підсилення процесів закріплення молекулярної структури плівкових полімерних матеріалів і зменшення деструктивної ролі радіації завдяки оптимальному розподілу кристалічної фази за об'ємом і орієнтацією. Внаслідок цього зростають міцнісні властивості матеріалу з одночасним збереженням достатнього рівня його еластичності.

Ю.А. Похил, В.В. Абраимов, В.А. Лотоцкая

ИНФОРМАЦИЯ О ВЫПОЛНЕНИИ  
ИННОВАЦИОННОГО ПРОЕКТА «РАЗРАБОТКА  
И ВНЕДРЕНИЕ КРИОГЕННО-ВАКУУМНЫХ  
ТЕХНОЛОГИЙ ОБРАБОТКИ  
НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ  
МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ  
ИХ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ»

Описаны технологии криогенно-вакуумного термоциклирования и радиационного упрочнения полимерных композиционных и пленочных материалов для повышения их электрорезистивных и механических характеристик.

*Ключевые слова:* криогенно-вакуумные технологии, композиционные полимерные материалы, термоциклическая обработка, радиационное упрочнение, удельное электросопротивление.

Yu.O. Pokhyl, V.V. Abraimov, V.A. Lototskaya

THE INFORMATION ON PERFORMANCE  
OF THE INNOVATIVE PROJECT  
«THE DEVELOPMENT AND INTRODUCTION  
OF CRYOGENIC-VACUUM TECHNOLOGIES  
OF NONMETAL COMPOSITE MATERIALS  
PROCESSING FOR THEIR  
PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES  
INCREASING»

Technologies of cryogenic-vacuum thermal cycling and radiation hardening of polymeric composite and film materials for increasing of their electrical resistive and mechanical characteristics are described.

*Key words:* cryogenic-vacuum technologies, composite polymer materials, thermal cyclic treatment, radiation hardening, specific resistance.

Надійшла до редакції 31.03.10