

УДК 535.34:629.7

PACS number(s): 42.25, 42.68, 07.87

ДОСЛІДЖЕННЯ ОПТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АНТИЕРОЗІЙНОГО ПОКРИТТЯ ТЕПЛОЗАХИСНИХ ПЛИТОК ОБОЛОНКИ КОСМІЧНОГО КОРАБЛЯ „БУРАН”

Д. Бородай

*Хмельницький національний університет
Кафедра фізики*

*вул. Інститутська, 11, 29016 Хмельницький, Україна
e-mail: centr@mailhub.tup.km.ua*

Досліджено температурну залежність оптичних властивостей теплозахисних плівок типу ЕВС-6 орбітального корабля „Буран”. На зовнішню поверхню цих плиток нанесено лакове ерозійно стійке покриття ТПФ і ФП-5182. Оптичні характеристики плиток визначені в діапазоні хвиль $\lambda = 0,3-1,1$ мкм за температури $20^{\circ}-1\ 000^{\circ}$ С. Визначено, що на оптичні характеристики плиток теплозахисної ізоляції впливає антиерозійне лакове покриття в інтервалі температур до $400^{\circ}-450^{\circ}$ С. У разі високих температур нагріву $600^{\circ}-1\ 000^{\circ}$ С значення оптичних коефіцієнтів плиток залежить від лакового покриття і метеорологічних чинників.

Ключові слова: теплозахисна ізоляція „Бурана”, орбітальний корабель, оптичні характеристики, антиерозійне покриття, ступінь чорноти.

Оскільки теплоізоляція орбітального корабля працює в зоні дії високотемпературного повітряного потоку, під час його запуску в космос і спуску з орбіти, то вона повинна бути ерозійно стійка проти вітру, дощу, граду, піску, вологи. Тому теплозахисну плитку зовні покривають ерозійно стійким покриттям. З метою забезпечення вологоізоляції поверхня плитки теплозахисного матеріалу покривається лаковою плівкою [1]. Усе це змінює оптичні властивості теплозахисних покриттів. Однак матеріали, з яких виготовлена теплозахисна плитка, повинні мати відповідні оптичні характеристики для ефективного перевипромінювання тепла, отриманого його покриттям [2].

У праці [3] досліджено температурну залежність оптичних характеристик теплозахисних плиток типу ЕВЧ-4М1У-3 і ЕВС-6, на зовнішню поверхню яких не була нанесена вологоізоляція. У цій статті досліджено температурну залежність оптичних і терморадіаційних властивостей теплозахисних плиток типу ЕВС-6, на зовнішню поверхню яких нанесено лакове антиерозійне покриття. Ці плитки

перешкоджають перегріву через сонячне випромінювання верхньої частини орбітального корабля [2].

За методикою, описаною в [3], виміряно спектральні коефіцієнти відбивання за направленою опромінення зразків при різних кутах падіння пучка, в області довжин хвиль $\lambda = 0,3 - 1,1$ мкм і діапазоні температур $T = 20^\circ - 1000^\circ$ С. Спектральний напівсферичний ступінь чорноти ϵ_λ визначали через спектральні коефіцієнти зразків під час їх дифузного опромінення, які обчислювали методом кутових коефіцієнтів [4] за коефіцієнтами відбивання за спрямованого опромінення.

Зразок № 1 є теплозахисною конструкцією (плиткою) з білим покриттям типу ЕВС-6 і серцевиною з матеріалу ТЗМК-10 на основі супертонкого, чистого кварцового волокна. На зовнішню поверхню теплозахисної плитки нанесено по три шари лакового покриття ТФП і ФП-5182. Крім цього, цей зразок піддавався дії метеорологічних чинників (сонячне опромінення, волога (дощ), вітер, пилю) протягом місяця, а після відпалювання за температури 200° С протягом восьми годин.

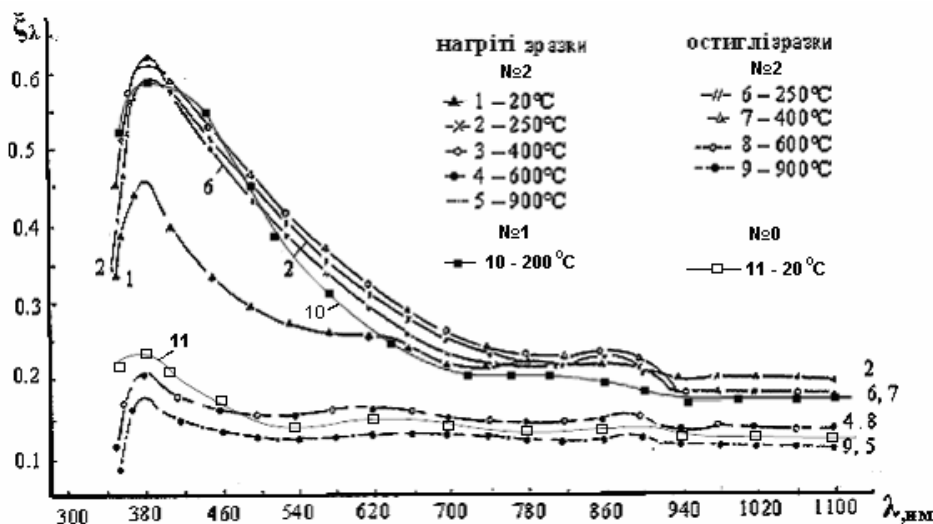


Рис. 1. Залежність ϵ_λ від температури нагріву

Спектральну залежність ϵ_λ для цього зразка показано на рис. 1, крива 10. Як свідчать експерименти, значення ϵ_λ для зразка № 1 значно перевищують ϵ_λ при $T = 200^\circ$ С порівняно зі зразком № 0 (плиток ЕВС-6), на поверхню якого не було нанесено лакового покриття і він не підпадав під дію метеорологічних чинників [3]. Особливо це виявляється в області довжин хвиль $\lambda = 340 - 600$ нм. Наприклад, для зразка № 1 при $\lambda = 380$ нм ϵ_λ більше у 2,3 раза, при $\lambda = 500$ нм – у 2 рази, при $\lambda = 600$ нм – у 1,5 раза, при $\lambda = 840$ нм – у 1,3 раза, ніж для зразка № 0.

Зразок № 2, який має таке ж покриття, як і зразок 1, зазнав такі ж метеорологічні випробування, але не відпалювався. Залежність спектрального ступеня чорноти від довжини хвилі для зразка № 2 показано на рис. 1, криві 1, 2, 3, 4, 5 відповідають температурам нагріву $20^\circ, 250^\circ, 400^\circ, 600^\circ, 900^\circ$ С. Криві 6, 7, 8,

9 побудовані відповідно для зразків, нагрітих до температур 250°, 400°, 600°, 900° С, а потім витриманих не менше 12 годин при 20° С (остиглих зразків). На рис. 1 крива *II* відтворює спектральну залежність ε_λ зразка № 0 за температури 20° С. Порівняння кривих *I* і *II* дає підстави оцінити вплив лакового покриття на оптичні властивості теплозахисної плитки. Максимум кривих *I*, *II* відповідають $\lambda = 380$ нм при $T = 20^\circ$ С. При цьому числові значення $\varepsilon_{\lambda, \max}$ значно відрізняються між собою. Зокрема для кривої *I* $\varepsilon_{\lambda, \max} = 0,46$, а для кривої *II* – $\varepsilon_{\lambda, \max} = 0,24$. Зі збільшенням довжини хвилі значення спектрального ступеня чорноти монотонно зменшується до $\varepsilon_\lambda \approx 0,20$ (крива *I*), $\varepsilon_\lambda \approx 0,15$ (крива *II*). Значення ε_λ отримані з вимірювань спектральних оптичних характеристик зразків. Це свідчить про те, що лакове покриття при $T = 20^\circ$ С впливає на оптичні й терморадіаційні характеристики теплозахисних плиток, а саме, збільшується величина спектрального коефіцієнта поглинання α_λ і ступеня чорноти ε_λ . Порівняння результатів досліджень цієї роботи і [3] свідчать, що зазначена закономірність ε_λ і α_λ зберігається до температури 200° С. Для зразка № 2 за температури $T = 250^\circ$ С простежують зміну кольору поверхні, вона із білої стає світло-коричневою. Лак на поверхні плавиться, перетворюючись у клейку масу.

Наведені на рис. 1 криві *I*, *2*, *3*, *10* свідчать, що з підвищенням температури нагріву від 20° до 400° С значення ε_λ збільшуються в області довжин хвиль $\lambda = 340 - 660$ нм, а при $\lambda = 700 - 1100$ нм – збігаються із точністю до похибки вимірювань. Однак, за температури нагріву 250° С значення ε_λ зразка № 2 відрізняються незначно від ε_λ , при $T = 400^\circ$ у всьому дослідженому інтервалі довжин хвиль (рис. 1, криві *2* і *3*).

За 400° С лак на поверхні зразка стає менш в'язким і розтікається по його поверхні. Починається вигорання і утворення на поверхні зразка коричневих плям. Порівняння числових значень ε_λ кривих *I* та *II*, рис. 1 та таблиці зразків № 2 і № 0 свідчать, що їх величини суттєво відрізняються між собою в інтервалі температур $T = 20^\circ - 400^\circ$ С. Зокрема при $T = 400^\circ$ і $\lambda = 380$ нм значення ε_λ для зразка № 2 більше у 3,41 раза, $\lambda = 520$ нм – у 3 рази, $\lambda = 600$ нм – 1,8 раза, $\lambda = 1000$ нм – 1,7 раза ніж для зразка № 0.

Отже, антиерозійне лакове покриття теплозахисної плитки збільшує спектральний ступінь чорноти за температури нагріву її до 400° С. У процесі проведених досліджень визначено спад ε_λ покриття за температури більшої ніж 400° С. Це пов'язано з тим, що лакове покриття починає вигорати.

За температури нагріву 600° С (рис. 1, крива *4*) спектральний ступінь чорнот значно знижується порівняно зі значеннями ε_λ для $T = 20^\circ$ С, $T = 250^\circ$ С, $T = 400^\circ$ С (рис. 1, криві *I*, *2*, *3*). В короткохвильовій частині спектра $\lambda = 340 - 500$ нм ε_λ приймає значення в межах 0,212–0,161, а в довгохвильовій – 0,143 при $T = 600^\circ$ С. Зниження значень ε_λ зразка № 2 за $T = 600^\circ$ С пояснюють тим, що за цієї температури лакове покриття повністю вигорає і поверхня зразка набуває білого кольору. Таке явище простежують у разі першого спуску космічного корабля з

орбіти в зонах, де температура перевищує $T = 450^\circ\text{C}$ [5]. Дані таблиці свідчать, що значення ε_λ для зразків № 2 і № 0 незначно відрізняються за $T = 600^\circ\text{C}$.

Таблиця

Значення ε_λ теплозахисних плиток типу ЕВС-6

Зразок №	$T = 250^\circ\text{C}$				$T = 400^\circ\text{C}$			
	$\lambda, \text{нм}$				$\lambda, \text{нм}$			
	380	520	680	1000	380	520	680	1 000
0	0,260	0,177	0,162	0,136	0,181	0,138	0,140	0,113
2	0,621	0,419	0,250	0,207	0,614	0,425	0,265	0,191
3	0,432	0,245	0,199	0,157	0,672	0,515	0,344	0,284

Зразок №	$T = 600^\circ\text{C}$				$T = 900^\circ\text{C}$			
	$\lambda, \text{нм}$				$\lambda, \text{нм}$			
	380	520	680	1000	380	520	680	1 000
0	0,171	0,131	0,122	0,112	0,161	0,126	0,117	0,111
2	0,212	0,162	0,161	0,143	0,169	0,126	0,120	0,120
3	0,210	0,137	0,143	0,118	0,190	0,122	0,133	0,116

З підвищенням температури до $900\text{--}1\,000^\circ\text{C}$ спектральний ступінь чорноти зразка № 2 зменшується, але незначно порівняно із значеннями ε_λ за $T = 600^\circ\text{C}$ (рис. 1, криві 4, 5). У разі цих температур простежують подальше відбілювання зразка і дані таблиці свідчать, що числові значення ε_λ для зразків № 2 і № 0 збігаються з точністю до похибки вимірювань.

Нагрівання теплозахисних матеріалів спричинює структурні перетворення, що зумовлює й відповідні зміни в їх оптичних спектрах відбивання і поглинання. Порівняння спектральних оптичних коефіцієнтів для нагрітих і застиглих зразків дає змогу оцінити оборотність оптичних характеристик зразка. Для зразка № 2 в інтервалі $\lambda = 740\text{--}1\,100\text{ нм}$ за $T = 250\text{--}400^\circ\text{C}$ простежують оборотність оптичних спектрів, оскільки відповідні криві 6, 7 дуже близькі до кривої 1 (рис. 1). Вище температури нагріву $T = 400^\circ$ простежують деяку їх необоротність у всьому дослідженому інтервалі довжин хвиль, особливо помітну за $T = 600^\circ\text{--}1\,000^\circ\text{C}$. При цьому збігаються числові значення ε_λ для нагрітого і застиглого зразка (рис. 1, криві 4 і 5, 7 і 9).

У процесі проведених досліджень визначено, що значення ε_λ для зразків № 1 і № 2 при $T = 200^\circ\text{C}$ збігаються з точністю до похибки вимірювань. Це свідчить про те, що відпалювання зразка № 1 при $T = 200^\circ\text{C}$ протягом восьми годин не впливає на його оптичні характеристики.

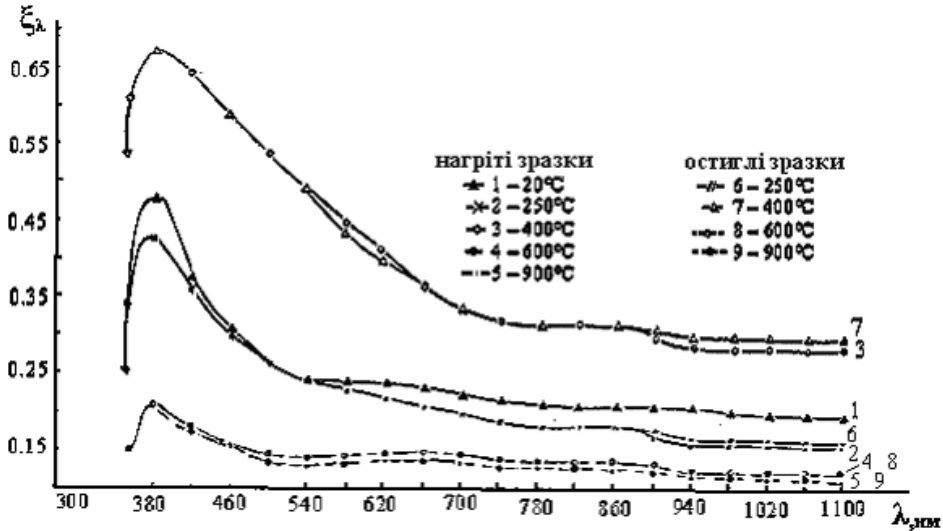


Рис. 3. Залежність ε_λ від температури нагрівання для зразка № 3

Зразок № 3 має такі ж характеристики, що і зразок № 2, крім цього він забруднений землею, але не піддавався дії метеорологічних чинників. Значення ε_λ і їх залежність від температури показані на рис. 2. Криві 1–5 відповідають температурам нагріву 20°, 250°, 400°, 600°, 900° С. Криві 6–9 побудовані для зразків, нагрітих до 250°, 400°, 600°, 900° С, а потім витриманих не менше 12 годин при 20° С. За температури 20° С спектральний ступінь чорноти має максимум в області 380 нм (крива 1), який досягає значення 0,485. В області більших довжин хвиль ε_λ має менші значення, тобто зі збільшенням довжини хвилі ε_λ має тенденцію до зменшення. При цьому значення ε_λ при $T = 20^\circ \text{C}$ для зразків № 2 і № 3 у спектральному інтервалі $\lambda = 340\text{--}1100$ нм відрізняються незначно (рис. 1, 2, крива 1). Однак, значення ε_λ для зразка № 3 значно більші при цій же температурі і в цьому ж інтервалі довжин хвиль порівняно із ε_λ зразка № 0 (рис. 2, крива 1, крива 11). Отже при $T = 20^\circ$ забруднення землею мало впливає на оптичні властивості зразка, а лакове покриття суттєво змінює його оптичні характеристики.

В інтервалі температур нагріву 100°–150° С значення ε_λ зразка № 3 мало відрізняються від ε_λ за температурі 20° С. При 250° С величина ε_λ незначно зменшується в короткохвильовій області, в середній області спектра ($\lambda = 460\text{--}540$ нм) значення збігаються, а в довгохвильовій – знову зменшується порівняно з ε_λ за $T = 20^\circ \text{C}$ (рис. 2, криві 1, 2). За цієї температури лак починає плавитись, утворюються темно-коричневі плями. Порівняння кривих 2, рис. 1 та 2 свідчать, що ε_λ за $T = 250^\circ \text{C}$ для зразка № 3 значно менша, ніж для зразка № 2. Однак, значення ε_λ зразка № 3 більше майже в 1,5 раза порівняно із ε_λ зразка № 0 (табл.). Зменшення ε_λ за цих умов пов'язане з виділенням хімічних продуктів, що забарвлюють зразок у темно-коричневий колір.

Зі збільшенням температури до 400°C спектральний ступінь чорноти ε_{λ} зразка № 3 значно зростає у всьому дослідженому інтервалі довжин хвиль (рис. 2, крива 3). Із даних таблиці і кривих 3, рис. 1 та 2 простежуємо, що при $T = 400^{\circ}\text{C}$ значення ε_{λ} зразка № 3 більші, ніж зразка № 2 і особливо вони значно більші порівняно зі зразком № 0.

Нагрівання зразка № 3 до 600°C спричинює до зниження спектрального ступеня чорноти у всьому дослідженому інтервалі довжин хвиль (рис. 2, крива 4). Якісний хід цієї залежності зразка № 3 подібний до тої, яку простежували для зразка № 2 (рис. 1 та 2, крива 4). Однак, чисельні значення ε_{λ} для зразка № 3 набувають меншої величини при всіх довжинах хвиль. За подальшого збільшення температури до $900^{\circ}\text{--}1\,000^{\circ}\text{C}$ відбуваються невеликі зміни ε_{λ} , порівняно із значеннями за 600°C (криві 4, 5, рис. 2). В інтервалі температур $600^{\circ}\text{--}1\,000^{\circ}\text{C}$ значення ε_{λ} зразка № 3 наближається до ε_{λ} зразка № 0 (табл.1). Для зразка № 3 простежено повну необоротність оптичних спектрів за остигання, тобто збіг кривих 6–9 застиглих зразків з відповідними кривими 2–5 нагрітих зразків (рис. 2).

Із порівняння кривих 1–5, рис. 1 та 2 видно, що забруднення землею поверхні теплозахисної плитки веде до зміни ε_{λ} і особливо за температури 400°C . За вищих температур вплив забруднення зникає. Наведені на рис. 1 та 2 криві спектрального ступеня чорноти свідчать, що окрім діапазону $\lambda = 340\text{--}620\text{ нм}$ значення ε_{λ} мало змінюється із довжиною хвилі.

Отже, як видно із дослідження зразків № 0–3 на оптичні характеристики плиток теплозахисної ізоляції орбітального корабля впливає антиерозійне (лакове) покриття, забруднення землею в інтервалі до температур $400^{\circ}\text{--}450^{\circ}\text{C}$. Суттєво, що при високих температурах нагріву ($600\text{--}1\,000^{\circ}\text{C}$) значення оптичних коефіцієнтів майже не залежить від зазначених і метеорологічних чинників.

Одержано експериментальні дані стосовно впливу антиерозійного покриття на оптичні характеристики теплозахисних плиток, які дають змогу прогнозувати оптичні властивості теплозахисної ізоляції космічного корабля. Результати досліджень можуть бути застосовані у разі проектуванні елементів теплозахисної ізоляції орбітальних кораблів багаторазового використання.

1. Лозино-Лозинский Г.Е., Воинов Л.П., Скорodelов В.А. Летные эксперименты по программе “Космос”, проведенные в обеспечение создания ОК “Буран”. Доклад (ИИЕТ РАН 30 марта 1992 г).
2. Лозино-Лозинский Г.Е., Братухин А.Г. Авиационно-космические системы МАИ. Москва, 1997.
3. Бородай Д.М., Коломієць І.Д., Бородай М.В. // Тез. Допов. Всеукраїнської конференції теоретичної та експериментальної фізики “Еврика – 2003”. Л., 2003.
4. Тиходеев П.М. Световые измерения в светотехнике. М.: Госэнергоиздат, 1962.
5. Гофин М.Я. Структура теплозащиты орбитального космического корабля многократного использования. В кн.: Авиационно-космические системы. М.: МАИ, 1997. С. 136–144.

**THE INVESTIGATION OF OPTICAL CHARACTERISTICS OF EROSION
RESISTANT COATING OF INSULATING TILES OF BURAN'S SHELL**

D. Boroday

*Hmelnsky National University, Phisic Department
Institutska str11., UA-29016 Khmelnsky, Ukraine
Phone: (0382) 72-80-76 Fax(03822) 2-32-65
e-mail: centr@mailhub.tup.km.ua*

Investigations are conducted on temperature dependence of optical characteristics of erosion resistant coating which is on the insulating tile of EVS-6 type orbital ship Buran. Optical characteristics of erosion preventing are investigated in waves length $\lambda = 0,3-0,1$ mkm and temperature $T = 20^{\circ}-1\ 000^{\circ}$ C. Erosion resistant coating in temperature interval from 400° C to 450° C influence the optical characteristics of the insulating tiles. Values of optical coefficients of the tile are independent from the coating and meteorological factors at high temperatures of $600^{\circ}-1\ 000^{\circ}$ C.

Key words: heat protection isolation, orbital spaceship, optical characteristics, erosion resistant coating, emissitivity factor.

Стаття надійшла до редколегії 31.05.2005
Прийнята до друку 26.02.2007