

УДК: 666.1.056

DOI: 10.20535/iwccmm2024302715

ЕМІСІЙНІ ВЛАСИВОСТІ СКЛА З ТВЕРДИМ ПІРОЛІТИЧНИМ ПОКРИТТЯМ ПРИ ПІДВИЩЕНИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Катерина Карпюк,
студент,
КПІ ім. Ігоря Сікорського
karpukkata4@gmail.com

Артем Яценко,
к.т.н., доцент,
КПІ ім. Ігоря Сікорського
ar.iatsenko@gmail.com

Анотація: В роботі досліджено особливості процесу теплової емісії в оточуюче середовище поверхні скла, вкритої твердим піролітичним покриттям на основі SnO_2 . Отримані за контактним (кондуктивним) та безконтактним (пірометричним) методами результати порівнювали зі здатністю до теплової емісії звичайного силікатного скла та поверхні енергозберігаючого скла, яка не містила покриття. Встановлено, що за підвищених температур в інтервалі від $50\text{ }^\circ\text{C}$ до $500\text{ }^\circ\text{C}$ емісійна здатність твердого піролітичного покриття зберігається на низькому рівні, та характеризується низьким коефіцієнтом емісії в межах $\epsilon_k=0,2\dots0,4$, про що свідчать отримані дані температури його поверхні, отримані пірометричним методом в процесі охолодження зразків від температури $500\text{ }^\circ\text{C}$ до $50\text{ }^\circ\text{C}$. Рекомендовано, у випадку застосування низькоемісійного скла з електропровідним прозорим покриттям в конструкціях ІЧ-випромінювачів, розташовувати сторону скла з піролітичним покриттям в напрямку протилежному від напрямку обігріву, що викликано максимальним коефіцієнтом емісії в ІРС-діапазоні саме зі сторони, яка не містить покриття.

Ключові слова: тверде низькоемісійне покриття, силікатне скло, енергозберігаюче К-скло, ІЧ-випромінювач, ІРС-діапазон.

Abstract: In this work, the process of heat emission into the environment of a glass surface covered with a solid pyrolytic coating based on SnO_2 is investigated. The results obtained by contact (conductive) and non-contact (pyrometric) methods were compared with the ability to thermal emission of ordinary silicate glass and the surface of energy-saving glass, which did not contain a coating. It was established that at elevated temperatures in the range from $50\text{ }^\circ\text{C}$ to $500\text{ }^\circ\text{C}$, the emissivity of the solid pyrolytic coating remains at a low level, and is characterized by a low emission coefficient in the range of $\epsilon_k=0.2\dots0.4$, as evidenced by the obtained data of its surface temperature, obtained by the pyrometric method in the process of cooling samples from a temperature of $500\text{ }^\circ\text{C}$ to $50\text{ }^\circ\text{C}$. It is recommended, in the case of using low-emission glass with an electrically conductive transparent coating in the construction of IR emitters, to place the side of the glass with a pyrolytic coating in the direction opposite to the direction of heating, which is caused by the maximum emission coefficient in the IRC range of the side that does not contain a coating.

Key words: solid low-emissivity coating, silicate glass, energy-saving K-glass, IR-emitter, IRC-range.

Сучасне енергозберігаюче скло випускається абсолютною більшістю виробників листового флоат-скла світу, таких як Pilkington, Saint-Gobain, Guardian, AGC, EuroGlass та ін. [1]. Спрощено класифікується на листове флоат-скло з «твердим» низькоемісійним покриттям, за яким закріпилась тривіальна назва «К-скло», за торговою маркою такого скла «K-glass» від виробника Pilkington, та листове флоат-скло з «м'яким» низькоемісійним покриттям з тривіальною назвою «І-скло», за відповідною торговою маркою «I-glass» від того ж виробника. В порівнянні зі звичайним флоат-склом має порівняно близькі показники зі світлопропускання у видимому діапазоні довжин хвиль, але завдяки наявності тонкошарового низькоемісійного покриття має широку область затримання у довгохвильовій ІЧ-частині оптичного спектру [2].

Застосування твердого покриття у якості функціонального не обмежується лише енергозбереженням для скління віконних прорізів приміщень. Таке покриття у випадку нанесення на тканину, полімерну плівку чи інші матеріали може блокувати проходження теплової частини спектру, маскуючи тепловий об'єкт, який знаходиться за цим матеріалом [3]. Низькоемісійне скло вкрите тонким шаром напівпровідника SnO_2 є досить розповсюдженим матеріалом не лише у будівництві, для створення енергозберігаючих вікон, такі стекла використовують у складі рідкокристалічних екранів та touch-screen дисплеїв, у фотоелектричних елементах в радіоелектроніці (фоторезистори, кристали світловипромінювальних діодів, напівпровідникові лазерні випромінювачі та ін.), у фотовольтаїці (сонячні елементи та батареї), в прозорих тепловиділяючих покриттях на елементах різних оптичних систем, в авіа-, судо- та автобудівній індустрії у якості скла із захистом від запотівання та обмерзання тощо [2–4].

Властивості такого скла добре вивчені та описані в інтервалі температур від $-20\text{ }^\circ\text{C}$ до $40\text{ }^\circ\text{C}$, за температурних умов оточуючого середовища його найчастішої експлуатації. Проте, в літературі недостатньо розкриті нюанси процесів теплопередачі такого скла при підвищених температурах: понад $50\text{ }^\circ\text{C}$

і впритул до температур початку початку інтервалу пластичної деформації (> 500 °C). Достатні дані механізмів теплопередачі вивчено та висвітлено лише для звичайного силікатного скла [5]. Тому метою даного дослідження обрано вивчення особливостей процесів тепловіддачі в оточуюче середовище поверхні скла, вкритою твердим низькоемісійним покриттям на основі SnO₂.

З широкого переліку систем, які використовують для створення прозорих функціональних покриттів на поверхні скла, металоксидні прозорі покриття на основі SnO₂ відрізняються збільшеним коефіцієнтом заломлення, який в залежності від довжини хвилі може становити $\eta \geq 1,8$ [6], високою електропровідністю (питомий поверхневий електричний опір такого покриття на одиницю площі сягає значень $\rho \leq 10$ Ом, що наближується до значень опору металів) [7], високу світлопропускання у видимій частині спектру $T \geq 90$ %, та низьку в довгохвильовій його частині, а саме в IRC: $T \rightarrow 0$ % [7–9]. Цей комплекс характеристик і визначив область застосування скла з розглянутим покриттям.

Нові та потенційні області застосування такого скла, наприклад, створення безспіральних ІЧ-випромінювачів та нагрівальних елементів, високотемпературної оптики та розробок оборонного характеру пов'язані з необхідністю додаткового дослідження властивостей такого скла з твердим низькоемісійним покриттям при підвищених температурах, а саме, в першу чергу, вивчення випромінюючої здатності його поверхні та процесів передачі теплоти оточуючому середовищу.

Для дослідження було обрано низькоемісійне скло торгової марки «Planibel G» виробника AGC у максимально наявному номіналі 6 мм. Чим більша товщина скла, тим більш яскраво буде виражена різниця у властивостях теплопередачі для протилежних його поверхонь. Одна поверхня не містить покриття і далі позначатиметься «О», інша – вкрита твердим низькоемісійним покриттям на основі SnO₂ і далі позначатиметься «К». Для порівняння використане звичане віконне флоат-скло 6 мм завтовшки, того ж виробника.

З наявних літературних даних [8] відомо, що верхню межу стійкості до термічної деструкції покриттів такого типу є температури близькі до 500 °С, що і стало причиною вибору зазначеної температурної межі дослідження.

Методика дослідження передбачала рівномірний прогрів зразків скла, розмірами 50 x 50 мм, розміщених догори певною поверхнею «О» або «К» на керамічних підкладках в муфельній печі до температури 500 °С, з ізотермічною витримкою протягом 30 хв і наступним вилученням зразків та розміщенням їх на поверхні теплоізоляційного вогнетриву. Момент вилучення зразків з камери муфельної печі фіксували як початок експерименту з дослідження процесу передачі теплоти від нагрітих зразків з одєї з їх поверхні до оточуючого зразки середовища.

Отримані експериментальних дані по зміні температури кожної з однаково прогрітих поверхонь двома методами: безконтактним (пірометричним), в діапазоні теплового ІРС-випромінення з довжиною хвилі $\lambda = 8\div 14$ мкм за допомогою ІЧ-пірометрів Venetech GM1651 та Venetech GM550E, які використовували по чергово для оцінки коефіцієнту емісії поверхонь і контролю похибки вимірювання; та контактним (кондуктивним) методом – за допомогою цифрового мілівольтметра UNI-T з підключеною термопарою типу ХА. Загальний вигляд експериментального стенду наведений на рис. 1.



Рис. 1. Дослідження температури поверхні зразків: а – контактним (кондуктивним) методом; б – безконтактним (пірометричним) методом

Як видно з експериментальних даних, представлених у вигляді залежностей зміни температур поверхонь скла в процесі охолодження, виміряних двома різними методами (рис. 2), характер тепловіддачі для поверхні без покриття («О») є подібним до такого для поверхні скла, вкритого твердим низькоемісійним покриттям на основі SnO_2 («К»), але відрізняється за розташуванням над віссю абсцис.

Отримані результати свідчать, що тепловіддача випромінюванням найбільша з поверхні без покриття («О»), в порівнянні з поверхнею скла, вкритою твердим низькоемісійним покриттям на основі SnO_2 («К»). що добре узгоджується з даними коефіцієнтів емісії: $\epsilon_o=0,8\dots0,9$ для поверхні силікатного скла, та $\epsilon_k=0,2\dots0,4$ для каситериту (SnO_2) [9,10]. Конвекційна ж складова тепловіддачі з поверхні скла вкритого твердим низькоемісійним покриттям на основі SnO_2 («К») вища за таку для поверхні без покриття («О»), що є закономірним з точки зору закону збереження енергії: якщо емісійна складова тепловіддачі буде зменшена, а характер конвекційної складової лишатиметься незмінним, тоді частина енергії, яка ускладнена до передачі оточуючому середовищу через випромінювання буде збільшувати градієнт температур (рушійну силу) конвекційної складової, хоча, в загальна сума і не буде повністю компенсована.

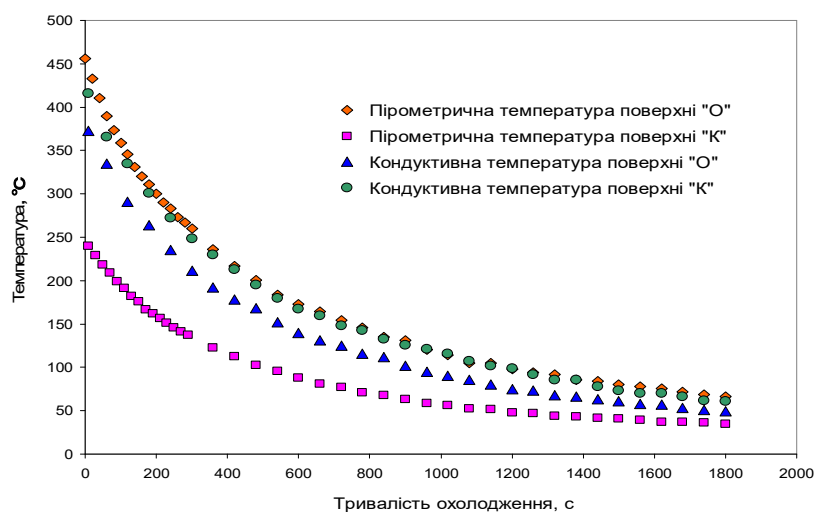


Рис. 2. Зміна температури поверхонь скла в процесі охолодження, виміряна різними методами

Залежності отримані для контрольного зразку листового бмм флоат-скала підтверджують дані, отримані для поверхні «О» без покриття низькоемісійного скла і для уникнення нагромадження ескпериментальних даних не представлені на рис. 2. Подальші дослідження властивостей скла з твердими піролітичними покриттями заплановано провести в рамках майбутньої магістерської дисертації.

ВИСНОВКИ

Проведені дослідження закономірно підтверджують енергоефективні властивості скла з твердим низькоемісійним покриттям на основі SnO_2 не тільки при низьких (від $-20\text{ }^\circ\text{C}$ до $40\text{ }^\circ\text{C}$), але й при високих (від $50\text{ }^\circ\text{C}$ до $500\text{ }^\circ\text{C}$) температурах і дають пояснення чому є важливим заповнення низькотеплопровідним осушеним інертним газом не тільки камер енергозберігаючих склопакетів, об'єм яких контактує безпосередньо з поверхнею скла з низькоемісійним покриттям, але й в міжелементного простору оглядових та захисних вікон та оптичних систем, які застосовуються в високотемпературних технологічних процесах і призначені для захисту органів зору спостерігача або сенсорів цифрових камер. До того ж показано, що у випадку застосування низькоемісійного скла з електропровідним прозорим покриттям стороною, яка повинна слугувати ІЧ-випромінювачем має бути саме сторона «О», яка не містить покриття, та характеризується високим коефіцієнтом емісії в ІРС-діапазоні.

Список літератури:

1. Каталог виробників енергозберігаючого листового скла. (nd). https://www.busel.ua/ua/products/energo_steklo.html
2. Племянніков, М. М., & Жданюк, Н. В. (2024). Нові склоподібні матеріали і методи їх синтезу. Склоподібні матеріали і вироби. Функціональні покриття. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/65150>
3. Afre, R. A., Sharma, N., Sharon, M., & Sharon, M. (2018, January 1). Transparent Conducting Oxide Films for Various Applications: A Review.

<https://doi.org/10.1515/rams-2018-0006>

4. М. М. Племянніков, А. П. Яценко, І. В. Пилипенко, Б. Ю. Корнілович (2018). Інноваційні технології у виробництві спеціального та побутового скла . <https://htks.kpi.ua/files/Books/Glass.pdf>

5. Племянников М.М., Крупа А.А. Хімія та теплофізика скла. Навчальний посібник. — К.: НТУУ «КПІ» 2000. — 559 с

6. Giani, E., & Kelly, R. (1974). A Study of SnO₂ Thin Films Formed by Sputtering and by Anodizing. Journal of the Electrochemical Society, 121(3), 394. <https://doi.org/10.1149/1.2401823>

7. Хрипко, С. Л. (2016). Модифікування структур системи кремній – пористий кремній – нанорозмірні плівки оксидів (SiO₂, SnO₂, ZnO) для пристроїв електронної техніки. Дисертація На Здобуття Наукового Ступеня Доктора. http://ena.lp.edu.ua:8080/bitstream/ntb/35868/3/diser_khrypko_s.l.pdf

8. Iatsenko, A., Mishchenko, A., & Kornilovych, B. (2019, October 31). Investigation of thermal stability, optical properties, phase and chemical composition of transparent conductive tin oxide films deposited by pyrolytic method on silica float glass. Technology Audit and Production Reserves, 5(3(49)), 10–14. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2019.182863>

9. Pulker, H., & Pulker, H. (1999, March 29). Coatings on Glass. Elsevier. http://books.google.ie/books?id=ho2pYhOiEMcC&printsec=frontcover&dq=9.%09Pulker+H.K.+Coatings+on+Glass+2nd+Edition&hl=&cd=1&source=gbp_api

10. Aukkaravittayapun, S., Wongtida, N., Kasewatin, T., Charojrochkul, S., Unnanon, K., & Chindaudom, P. (2006, February). Large scale F-doped SnO₂ coating on glass by spray pyrolysis. Thin Solid Films, 496(1), 117–120. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2005.08.259>