

Технічні науки

УДК 536.24:621.1.016.4:621.791.4

Фіалко Наталія Михайлівна

доктор технічних наук, професор,

чл.-кор. НАН України, зав. відділу

Інститут технічної теплофізики НАН України

Fialko Nataliia

Doctor of Technical Sciences, Professor,

Corresponding Member of the NAS of Ukraine, Head of the Department

Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine

Альошко Сергій Олександрович

кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник

Інститут технічної теплофізики НАН України

Aleshko Sergey

Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher

Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine

Місюра Тимофій Олексійович

доктор філософії, старший науковий співробітник

Інститут технічної теплофізики НАН України

Misiura Tymofii

PhD, Senior Researcher

Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine

Малецька Ольга Євгенівна

старший науковий співробітник

Інститут технічної теплофізики НАН України

Maletska Olha

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher

Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine

Бетін Юрій Олексійович

доктор філософії, старший науковий співробітник

Інститут технічної теплофізики НАН України

Betin Yurii

PhD, Senior Researcher

Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine

Мельниченко Тарас Васильович

аспірант

Інституту технічної теплофізики НАН України

Melnychenko Taras

Graduate Student of the

Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine

Кліщ Андрій Володимирович

молодший науковий співробітник

Інститут технічної теплофізики НАН України

Klishch Andrii

Junior Senior Researcher

Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine

Дашковська Ірина Леонідівна

молодший науковий співробітник

Інституту технічної теплофізики НАН України

Dashkovska Iryna

Junior Researcher

Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine

DOI: <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2026-9-12154>

**Тепловий стан системи «покриття-підшар-основа» при використанні
різних плазмоутворюючих газів**
**THERMAL STATE OF THE "COATING-SUBLAYER-BASE" SYSTEM
USING VARIOUS PLASMA-FORMING GASES**

Анотація. Вивчення теплових процесів, що відбуваються при газотермічному напиленні має велике значення при розробці нових мультістійких газотермічних покриттів. В роботі представлені результати математичного моделювання чисельних досліджень порівняльного аналізу температурних режимів системи «покриття-підшар-основа» при використанні різних плазмоутворюючих газів.

Ключові слова: плазмоутворюючі гази, газотермічне напилення, «багатошарове покриття-підшар-основа», математичне моделювання, теплопідвод, високотемпературна зона

Summary. Studying the thermal processes involved in thermal spraying is of great importance for the development of new multi-resistant thermal spray coatings. This paper presents the results of mathematical modeling based on extensive comparative analyses of the temperature regimes within the multilayer coating –bond coat–base system when using various plasma-forming gases.

Key words: plasma-forming gases, thermal spraying, "multilayer coating–bond coat–base" system, mathematical modeling, heat input, high-temperature zone

Вступ. В наш час все більш широке застосування в техніці знаходять газотермічні покриття різного функціонального призначення. Проблеми вдосконалення існуючих технологій газотермічного напилення та створення нових технологій, покращення їх теплозахисних, зносостійких, корозійностійких та електрозахисних характеристик мають важливе

значення в військовий час. При формуванні нових покриттів ведучу роль відіграє вивчення теплових процесів, що відбуваються при газотермічному напиленні. В останній час все більше розповсюдження для виготовлення антифрикційних покриттів різними методами газотермічного напилення получають композиційні плаковані порошки, що мають в своєму складі тверде мастило. Широко застосовуються композити, які в якості вихідного ядра мають графіт. Покриття з композиційних матеріалів, у складі якого є графіт використовуються у вузлах тертя, що працюють у умовах граничного тертя та без змащування. Ці покриття використовуються в газотурбінних двигунах в покриттях стартерів, що стираються, в лопатевих компресорах, в ущільнювачах кільцевих насосів, як покриття опорних поверхонь підшипників ковзання, в спеціальних виробках військової техніки. Виходячи з цього, розробка та вдосконалення технології отримання даних покриттів зумовлює необхідність додаткових досліджень теплових явищ, що спостерігаються у всіх цих ситуаціях. Значний інтерес становлять дані математичного моделювання процесів теплоперенесення при формуванні покриттів із плакованих композиційних порошків, які містять графіт. У представлений роботі надані характерні результати математичного моделювання чисельних досліджень щодо порівняльного аналізу температурних режимів системи «покриття-підшар-основа» при використанні різних плазмоутворюючих газів.

В даній роботі розглядається тривимірна нестационарна задача теплопровідності для багат шарової системи та співставлено тепловий стан системи «покриття-підшар-основа» при використанні різних плазмоутворюючих газів одноатомного аргону та повітря, яке, головним чином, є сумішшю двоатомних газів. Відомо, що процес утворення плазми двоатомних та одноатомних газів суттєво різниться. Тепловміст двоатомних газів значно вище тепловмісту одноатомних газів при однаковій температурі. Це зумовлено тими обставинами, що у випадку двоатомних

газів значна кількість допоміжної енергії забезпечується за рахунок розпаду молекул на атоми. Таким чином, при використанні двоатомного плазмоутворюючого газу, а вірніше суміші, головним чином двоатомного газу-повітря) тепловий потік, що підводиться до виробу повинен бути значно більше, ніж теплопідвод від одноатомного газу аргону.

Порівняння двох ситуацій, що розглядаються, проводиться при наступних умовах. Величина максимальної щільності теплового потоку $q_{\max}$, що підводиться, передбачається однаковою в обох аналізованих ситуаціях. Величина радіусу плями нагріву $\bar{r}_0$ дорівнює 1,0 та 2,0 відповідно для аргонної та повітряної плазми ($\bar{r}_0 = r_0/r_{0a}$, де r_{0a} – радіус плями нагріву для аргонної плазми). Таким чином, ситуації, що порівнюються, характеризуються значеннями r_0 , що відмінні між собою вдвічі при незмінному $q_{\max}$, і отже різняться в чотири рази за величинами загального теплового потоку Q ($Q = q_{\max} \cdot \pi \cdot r_0^2$), що підводиться.

Зміна безрозмірної температури θ^* вздовж координати z для обох випадків, що відповідають використанню різних плазмоутворюючих газів повітря і аргону, представлено на рис.1. Безрозмірна температура $\theta^* = \theta / \theta_{\max}$, де $\theta, \theta_{\max}$ – відповідно безрозмірна температура системи та її максимальне значення при використанні повітряної плазми. Представлені данні відповідають наступним значенням вихідних параметрів: $x_l = 2,56$; $\delta_l = 0,34$ товщина основи; товщина підшару $\Delta_2 = \Delta_{3c} = 0,0085$; $Re = 129,6$; число $Bi_{x_l} = Bi_{y_l} = Bi_{z_0} = Bi_{z_l} = 5,96 \cdot 10^{-3}$. В ситуації повітряної плазми, як видно з малюнка, температурні рівні системи в цілому суттєво вищі. В точці з координатами $x=0$, $y=0$, $z = -24 \cdot 10^{-3}$ м величина θ складає 0,435 для аргонної плазми та 0,026 для повітряної.

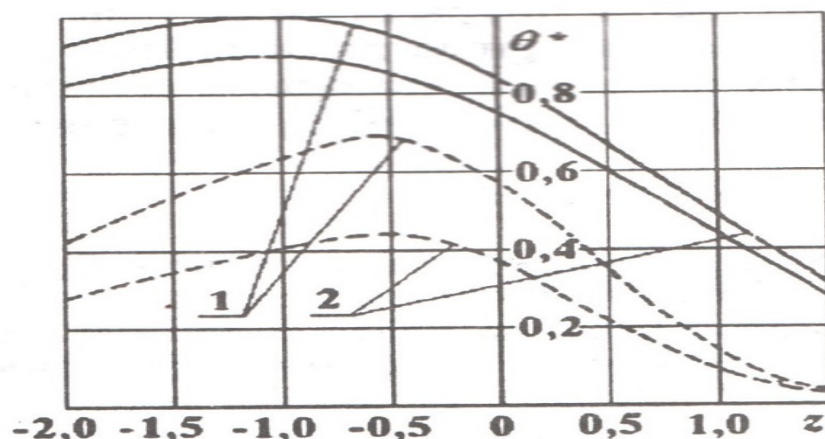


Рис 1. Залежність $\theta^* = f(z)$ в системі «двошарове покриття-підшар-основа» при $y = 0$; 1 - $x=0$; 2 - $x=0,683$;

—— - плазмоутворюючий газ-повітря; ----- - плазмоутворюючий газ – аргон

Відносно відмінностей в характері розподілу температури для ситуацій, що порівнюються, то необхідно відмітити наступне. У випадку аргонової плазми, згідно отриманих даних, на поверхні теплопідводу має місце значно більша нерівномірність температурної функції у високотемпературній зоні, якщо ми порівняємо суцільні та пунктирні лінії.

Висновки. Найбільше відхилення температур, що відповідають повітряній та аргоновій плазмі, спостерігається поблизу розташування максимуму теплового потоку, що підводиться. Картина зміни температур, що порівнюються на поверхні теплопідводу пояснюється різницею в характері епюри q , для двох випадків, що аналізуються. Тобто в розглянутих умовах температурна функція начебто слідує за епюрою q і зумовлює вказані особливості теплового стану системи в ситуаціях, що порівнюються.

Література

1. Dinzhos R., Fialko N., Prokopov V., Sherenkovskiy Ju., Meranova N., Koseva N., Korzhik V., Parkhomenko O., Zhuravskaya N. Identifying the influence of the polymer matrix type on the structure formation of

microcomposites when they are filled with copper particles. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. № 5/6 (107). P. 49–57. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.214810>

2. Fialko N., Meranova N., Korzhik V., Babak V., Sherenkovskiy J., Lazarenko M., Koseva N., Navrodska R., Polozenko N., Dinzhos R. Regularities of influence on thermophysical properties of polymer micro- and nanocomposites of their production methods. *Energy Technologies & Resource Saving*. 2025. Vol. 82, № 1. P. 145–155. DOI: <https://doi.org/10.33070/etars.1.2025.11>

3. Shchepetov V. V., Fialko N. M., Bys S. S. Abrasive-resistant self-lubricating forsterite-based coatings. *Materials Science*. 2025. Vol. 61. P. 566–571. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-026-01026-w>

4. Прокопов В. Г., Фіалко Н. М. Теплофізика енергозберігаючих технологій для енергетики. Київ : Інститут технічної теплофізики НАН України, 2000. 224 с. ISBN 966-02-1415-4.

5. Шпак А. П., Прокопов В. Г., Фіалко Н. М., Меранова Н. О., Шеренковський Ю. В., Коржик В. Н. Теплофізика формування аморфних і нанокристалічних газотермічних покриттів. Математичні моделі. Київ : Академперіодика, 2005. 120 с.

6. Прокопов В. Г., Фіалко Н. М., Шеренковський Ю. В., Меранова Н. О., Половинкина Л. Б. Закономірності впливу попереднього нанесення підшарів на тепловий стан деталей з аморфними і нанокристалічними газотермічними покриттями. *Проблеми екології і експлуатації об'єктів енергетики* : праці XIV Міжнар. конф. Київ : Ін-т пром. екології, ІПЦ «АЛКОН» НАНУ, 2005. С. 148–152.

7. Shchepetov V. V., Fialko N. M., Bys S. S. Solid lubricant nanocoating's based on magnesium compounds. *Problems of Tribology*. 2026. Vol. 31, № 2/120. P. 86–92. DOI: <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2026-120-2-86-92>

8. Фіалко Н. М., Шеренковський Ю. В., Меранова Н. О., Полозенко Н. П., Місюра Т. О., Хміль Д. П., Юрчук В. Л. Закономірності впливу різних

факторів на тепловий стан системи «напилювана частинка–основа».
Міжнародний науковий журнал «Інтернаука». 2026. № 5. DOI:
<https://doi.org/10.25313/2520-2057-2026-5-12062>