

Технічні науки

УДК 536.24:621.1.016.4:621.791.4

**Фіалко Наталія Михайлівна**

*доктор технічних наук, професор,  
чл.-кор. НАН України, завідувач 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*

**Шеренковський Юлій Владиславович**

*кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,  
провідний науковий співробітник  
Інститут технічної теплофізики НАН України*

**Sherenkovskiy Julii**

*Candidate of Technical Sciences,  
Senior Scientific Researcher, Leading Researcher  
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

**Меранова Наталія Олегівна**

*кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,  
провідний науковий співробітник  
Інститут технічної теплофізики НАН України*

**Meranova Nataliia**

*Candidate of Technical Sciences,  
Senior Scientific Researcher, Leading Researcher  
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

**Юрчук Володимир Леонідович**

*кандидат технічних наук, старший науковий співробітник*

*Інститут технічної теплофізики НАН України*

**Yurchuk Volodymyr**

*Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher*

*Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

**Полозенко Ніна Петрівна**

*кандидат технічних наук, старший науковий співробітник*

*Інститут технічної теплофізики НАН України*

**Polozenko Nina**

*Cand. of Tech. Sciences, Senior Researcher*

*Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

DOI: <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2026-7-12102>

**ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ВПЛИВУ НА ТЕПЛОВИЙ  
СТАН БАГАТОШАРОВОЇ СИСТЕМИ УМОВ ЇЇ ОХОЛОДЖЕННЯ  
STUDY OF THE REGULARITIES OF COOLING CONDITIONS  
INFLUENCE ON THE THERMAL STATE OF A MULTILAYER SYSTEM**

***Анотація.** Дану роботу присвячено аналізу закономірностей впливу струменевого охолодження на температурний режим багатошарової системи «покриття-підшар-основа».*

***Ключові слова:** температура, охолодження, система «покриття-підшар-основа».*

**Summary.** This work is devoted to the analysis of the regularities of influence of jet cooling on the temperature regime of the multilayer "coating-sublayer-base" system.

**Key words:** temperature, cooling, multilayer "coating-sublayer-base" system.

При реалізації плазмово-дугового способу нанесення покриттів достатньо широке застосування знаходить струменеве охолодження оброблюваних деталей. Дане охолодження запобігає перегріву виробу та окисленню власне покриття. Крім того воно служить для усунення небезпеки короблення в умовах достатньо невеликих розмірів напилюваних деталей і достатньо значних товщин напилюваних покриттів (більш  $0,5 \cdot 10^{-3} \dots 1 \cdot 10^{-3}$ ). Як охолоджуючі агенти а даній роботі використовуються різні гази (стиснутий газ, аргон, азот, вуглецевий газ) та вода [1-8].

Дана робота присвячена аналізу закономірностей впливу струменевого охолодження на температурний режим досліджуваної багатошарової системи. Розглядались ситуації, що відповідають різним умовам охолодження на верхній та нижній обмежуючих поверхнях досліджуваного об'єкту. Досліджуються умови, які відповідають відсутності та наявності спеціального охолодження системи. В останньому випадку розгляду підлягали такі варіанти охолодження: 1 – спеціальне охолодження повітрям або водою вільної поверхні покриття; 2 – охолодження водою тільки вільної поверхні основи; 3 – спільне охолодження водою вільних поверхонь покриття та основи.

На рисунках 1, 2 та 3 наведено характерні дані отриманих чисельних рішень за наступних значень вихідних параметрів:  $x_1 = 2,56$ ; безрозмірна товщина підшару  $\Delta_2 = 0,0085$ ; товщина одиночного шару покриття  $\Delta_3 = 0,00425$ ;  $Re = 129,6$ . Інші вихідні дані наведено в таблиці 1.

Згідно з отриманими даними струменево повітряне охолодження в умовах, що розглядаються малоефективне. А водяне ж охолодження дозволяє в цілому суттєво зменшити температурні рівні покриття, як показано на рис. 1.

Тут  $\theta^* = \theta / \theta_{\text{сид}}^{\text{max}}$ , де  $\theta_{\text{сид}}^{\text{max}}$  - максимальна безрозмірна температура при відсутності спеціального охолодження системи. Відмінності температур, які відповідають відсутності і наявності спеціального охолодження поверхні покриття повітрям, не перевищують 0,0172, зниженню температури за рахунок водяного охолодження досягає 0,145. Як видно, вплив охолодження локалізується в зоні прилеглої до поверхні теплопідводу. По мірі віддалення від поверхні теплопідводу розбіжність порівнюваних температур зменшується, так що на нижній поверхні системи вони виявляються незначними. В ситуації, що аналізується спостерігається прояв ефекту регіонального впливу граничних умов третього роду на поверхні теплопідводу.

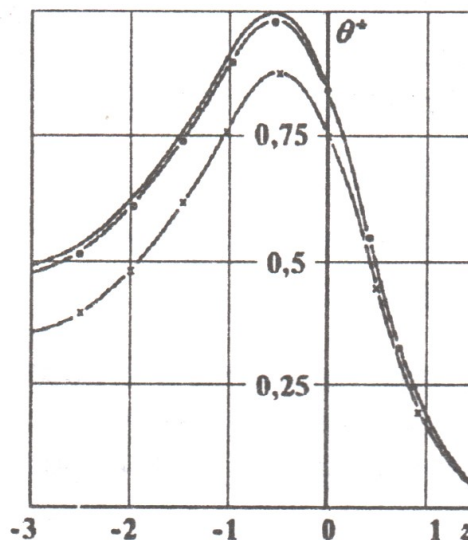
Таблиця 1

### Варіанти розрахунків

| № варіанту | Характеристика умов охолодження                               | $Bi_{y_0}, 10^{-3}$ | $Bi_{y_1}, 10^{-3}$ | Товщина основи $\Delta_1$ |
|------------|---------------------------------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------------|
| 1          | Відсутність спеціального охолодження                          | 5,95                | 5,96                | 0,34                      |
| 2          | Спеціальне охолодження повітрям вільної поверхні покриття     | 149                 | 5,96                | 0,4                       |
| 3          | Охолодження водою вільної поверхні покриття                   | 1490                | 5,96                | 0,34                      |
| 4          | Спеціальне охолодження повітрям вільної поверхні покриття     | 5,96                | 149                 | 0,34                      |
| 5          | Охолодження водою вільної поверхні покриття                   | 5,96                | 1490                | 0,34                      |
| 6          | Сумісне охолодження водою вільної поверхні покриття та основи | 1490                | 1490                | 0,34                      |
| 7          | Відсутність спеціального охолодження                          | 5,96                | 5,96                | 0,34                      |
| 8          | Охолодження водою вільної поверхні основи                     | 5,96                | 1490                | 0,34                      |
| 9          | Сумісне охолодження водою вільної поверхні покриття та основи | 1490                | 1490                | 0,34                      |

Зупинимось на розгляді закономірностей впливу умов охолодження на вільній поверхні основи. Особлива увага приділяється порівняльному аналізу даних, що відповідають різним товщинам основи  $\delta_1$ . На рис. 2а) наведено результати, що відносяться до ситуації, коли товщина основи  $\delta_1 = 0,34$  на рис. 2

б) –  $\delta_1 = 0,17$ . Як видно із зіставлення рис. 2а) та б) чим більша товщина основи  $\delta_1$ , тим менші при інших рівних умовах відхилення температур  $\Delta\theta_\alpha^*$ . Тут  $\Delta\theta_\alpha^* = \Delta\theta_\alpha / \Delta\theta_{\text{від}}^*$ , де  $\Delta\theta = \theta_{\text{від}} - \theta$ , де  $\theta_{\text{від}}$ ,  $\theta$  – відповідно температури системи при відсутності та наявності спеціального охолодження. Ефект зниження температури пов'язаний з водяним охолодженням основи виявляється більш суттєвим при малих значеннях  $\delta_1$ . Так в точці з координатами  $x = 0$ ,  $z = -3,075$ , розташованій на нижній поверхні системи, вказане зниження температури  $\Delta\theta_\alpha^*$  складає 0,0382 при  $\delta_1 = 0,34$  і досягає 0,137 при  $\delta_1 = 0,17$ . В випадку достатньо великої товщини  $\delta_1$  вплив умов охолодження основи локалізується поблизу її нижньої поверхні, а при малих товщинах  $\delta_1$  вплив водяного охолодження основи помітно позначається по всій її товщині.



**Рис. 1. Розподіл безрозмірної температури  $\theta^*$  вздовж осі  $z$  в шарово-неоднорідній системі «одношарове покриття-підшар-основа» для різних умов охолодження вільної поверхні покриття: 1 – відсутність спеціального охолодження,  $Bi_{y_0} = 5,96 \cdot 10^{-3}$ ; 2 – спеціальне охолодження повітрям  $Bi_{y_0} = 0,149$ ; 3 – спеціальне охолодження водою,  $Bi_{y_0} = 1,49$**

Із проведеного аналізу слідує, що в умовах газотермічного напilenня водяне охолодження вільної поверхні основи виявляється достатньо

ефективним в плані забезпечення необхідного температурного режиму власне покриття лише при відносно невеликих товщинах основи.

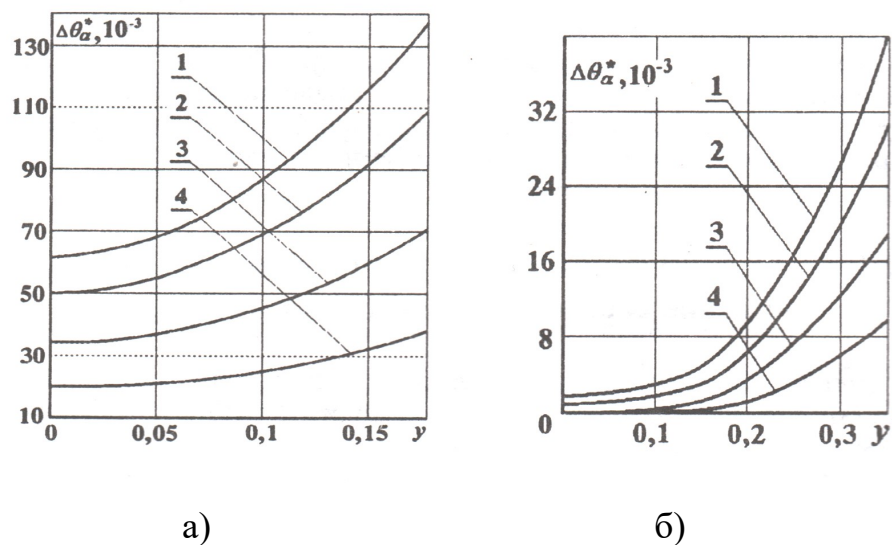


Рис. 2. Залежність  $\Delta\theta_{\alpha}^* = f(y)$  в системі «одношарове покриття-підшар-основа» для  $z = -3,075$  за умов спеціального охолодження водою ( $Bi_{y_0} = 1,49$ ) вільної поверхні основи:

1 –  $x = 0$ ; 2 –  $x = 0,53$ ; 3 –  $x = 0,85$ ; 4 –  $x = 1,12$ ; а) при  $\Delta_1 = 0,34$ ; б) при  $\Delta_1 = 0,17$

Рис. 3. Залежність  $\Delta\theta_{\alpha}^* = f(y)$  в системі «одношарове покриття-підшар-основа» при

$\Delta_1 = 0,17$  для  $z = -2,05$ : 1 –  $x = 0$ ; 2 –  $x = 0,53$ ; 3 –  $x = 0,85$ ; 4 –  $x = 1,12$ ; пунктирна (штрихова) лінія – охолодження водою тільки вільної поверхні основи  $Bi_{y_0} = 1,49$ ; суцільна лінія – сумісне охолодження водою вільної поверхні покриття і основи,

$$Bi_{y_0} = Bi_{y_1} = 1,49$$

Перейдемо до розгляду особливостей впливу на тепловий стан системи спільного охолодження водою її верхньої та нижньої поверхні. Для з'ясування специфіки цього впливу доцільним є зіставлення отриманих даних з відповідними результатами, які відповідають охолодженню лише вільної поверхні основи. Згідно з отриманими результатами, зниження температури обумовлене спільним охолодженням, виявляється значно більшим за величиною ніж у випадку охолодження тільки вільної поверхні основи. Наприклад, в точці з координатами  $x = 0$ ,  $z = -3,075$ , яка знаходиться на верхній поверхні системи, величина  $\Delta\theta_{\alpha}^* = 0,246$  в умовах спільного охолодження і  $\Delta\theta_{\alpha}^* = 0,137$  при охолодженні лише нижньої поверхні основи.

Представляє також інтерес також те, що при односторонньому та двосторонньому охолодженні характер впливу умов охолодження по висоті системи є принципово різним. А саме, у випадку одностороннього охолодження максимальне зниження температури  $\Delta\theta_{\alpha}^*$  реалізується на поверхні, що охолоджується, з віддаленням від неї величина  $\Delta\theta_{\alpha}^*$  зменшується. Тобто має місце монотонна зміна величини  $\Delta\theta_{\alpha}^*$  вздовж координати  $y$  (див пунктирні лінії на рис. 3). В умовах двостороннього охолодження залежність  $\Delta\theta_{\alpha}^* = f(y)$  має екстремальний характер. При цьому найменші значення відмінностей температур  $\Delta\theta_{\alpha}^*$  спостерігаються в центральній по товщині частини системи (суцільні лінії на рисунку 3). Очевидно, описана картина поведінки величини  $\Delta\theta_{\alpha}^*$  безпосередньо пов'язана з тенденціями, які зумовлені ефектами регіонального впливу граничних умов третього роду на вільних поверхнях покриття та основи.

## Література

1. Прокопов В.Г., Фиалко Н.М., Шеренковский Ю.В., Меранова Н.О., Половинкина Л.Б. Закономерности влияния предварительного нанесения подслоев на тепловое состояние деталей с аморфными и нанокристаллическими газотермическими покрытиями. *Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики* : тр. XIV Межд. конф. Киев: Ин-т пром. экологии, «ИПЦ АЛКОН» НАНУ, 2005. С. 148-152.
2. Прокопов В.Г., Фиалко Н.М., Теплофизика энергосберегающих технологий для энергетики. Киев: Институт технической теплофизики НАН Украины, 2000. 224 с. ISBN 966-02-1415-4.
3. Шпак. А.П., Прокопов В.Г., Фиалко Н.М., Меранова Н.О., Шеренковский Ю.В., Коржик В.Н. Теплофизика формирования аморфных и нанокристаллических газотермических покрытий. *Математические модели*. Киев : Академперіодика. 2005. 120 с.
4. 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. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.214810>
5. Shchepetov V.V., Fialko N.M., Bys S.S. Abrasive-resistant self-lubricating forsterite-based coatings. *Mater. Sci.* 2025. 61. P. 566–571. <https://doi.org/10.1007/s11003-026-01026-w>
6. 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. 82(1). P. 145-155. <https://doi.org/10.33070/etars.1.2025.11>



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. <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. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2026-5-12062>