

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*

Полозенко Ніна Петрівна

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник

Інститут технічної теплофізики НАН України

Polozenko Nina

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher

Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine

Хміль Дмитро Петрович

доктор філософії, старший науковий співробітник

Інститут технічної теплофізики НАН України

Khmil Dmitro

PhD, Senior Researcher

Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine

Місюра Тимофій Олексійович

доктор філософії, науковий співробітник

Інститут технічної теплофізики НАН України

Misiura Tymofii

PhD, Scientific Researcher

Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine

Кутняк Ольга Миколаївна

науковий співробітник

Інститут технічної теплофізики НАН України

Kutnyak Olha

Scientific Researcher

Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine

DOI: <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2026-6-12087>

**ТЕМПЕРАТУРНІ РЕЖИМИ БАГАТОШАРОВОЇ СИСТЕМИ ПРИ
ВАРІЮВАННІ ДИСТАНЦІЇ НАПИЛЕННЯ
TEMPERATURE CONDITIONS OF THE MULTILAYER SYSTEM
WHEN VARYING THE SPRAYING DISTANCE**

Анотація. В роботі розглянуто закономірності впливу дистанції напилення на тепловий стан системи «багатошарове покриття-підшар-основа».

Ключові слова: система «багатошарове покриття-підшар-основа», дистанція напилювання, пляма нагріву.

Summary. The work discusses the regularities of the influence of the spraying distance on the thermal state of the system "multilayer coating-sublayer-base".

Key words: "multilayer coating-sublayer-base" system, spraying distance, heating spot.

Проблеми захисту великогабаритних виробів, які працюють в умовах зносу в агресивних середовищах зберігає свою актуальність і на даному етапі розвитку техніки. Для вирішення даної проблеми широке застосування знаходять способи газотермічного нанесення покриттів на різні вузли тертя які працюють без самозмащування, а також в умовах граничного тертя [1-8].

Розглядається тривимірна нестационарна задача теплопровідності для багатошарової системи. При цьому основними були такі передумови. Джерело теплопідводу вважається рухомим із постійною швидкістю у відповідності з рухом плазмотрону. Розподіл теплового потоку в плямі нагріву передбачається таким, що відповідає закону Гауса. Зростання товщини покриття після одного проходу плазмотрона не враховується.

Постановка задачі ставиться в лінійній формі. Всі обмежені поверхні багат шарової системи, виключаючи поверхню теплопідводу, приймаються адиабатними.

Робота присвячена впливу дистанції наплення l_p на тепловий стан системи «багат шарове покриття-підшар-основа». Дослідження проводились в широкому діапазоні зміни параметра l_p ($0,05 \leq l_p < 0,15$ м). Нижче наводяться дані обчислювальних експериментів, які відповідають значенням l_p : $l_p = 0,05$; $0,1$ м і $0,15$ м.

Зміна дистанції наплення l_p пов'язана із зміною коефіцієнта зосередженості теплового потоку k та ефективного коефіцієнта корисної дії (ККД) нагріву виробу цим потоком η . Вихідні дані $k = 2 \cdot 10^{-4}$ 1/м², $\eta = 23$ % при $l_p = 0,05$ м, $k = 0,95 \cdot 10^{-4}$ 1/ м², $\eta = 14$ % при $l_p = 0,1$ м і $k = 0,73 \cdot 10^{-4}$ 1/ м², $\eta = 9$ % при $l_p = 0,15$ м (див. рис. 1а) та б)). Розподіл безрозмірної густини підведеного теплового потоку \bar{q} по плямі нагріву, визначається величинами k та η при розглянутих дистанціях наплення l показано на рис.2а). Тут $\bar{q} = q/q_{\max}^*$, де q_{\max}^* – максимальне значення густини теплового потоку при $l_p = 0,05$ м; величини q_{\max} для всіх дистанцій наплення знаходились за співвідношенню $q_{\max} = Q/(\pi \cdot r_0^2)$, де Q - потужність теплового потоку; $Z = z_p/r_0$; $l = l_p/r_{0\min}$, $\bar{r}_0 = r_0/r_{0\min}$, де $r_{0\min}$ – радіус плями нагріву при $l_p = 0,05$ м.

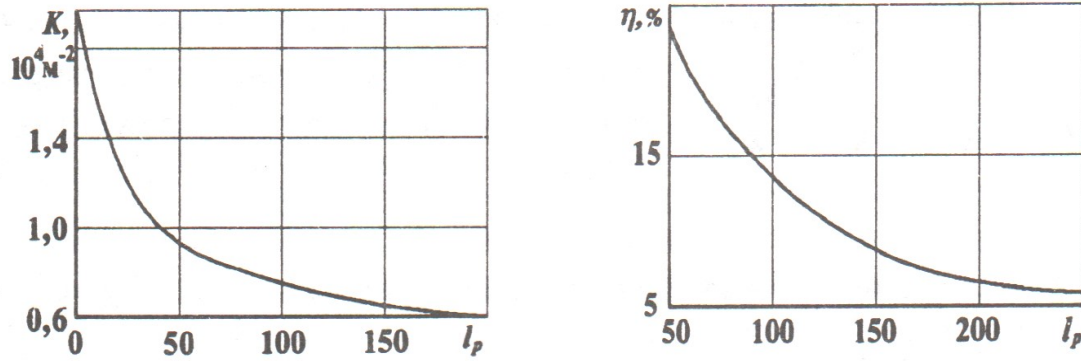


Рис. 1. Залежність від дистанції наплення l : а) коефіцієнта зосередженості питомого теплового потоку двофазного струменя K ; б) ККД нагріву виробу двофазного струменя η

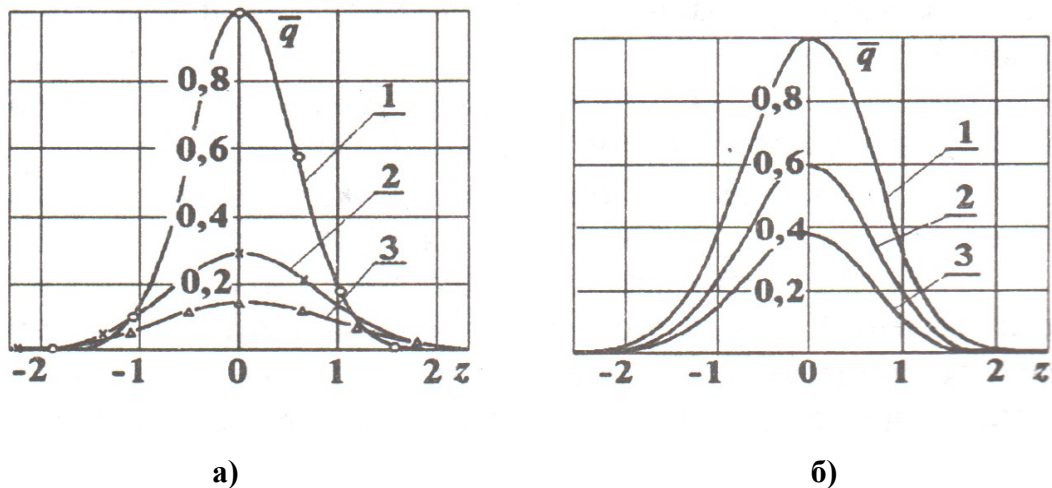


Рис. 2. Розподіл густини підведеного теплового потоку: а) при різній дистанції наплення: 1 – $l = 7,07$ ($\bar{q}_{\max} = 1$, $\bar{r}_0 = 1$); 2 – $l = 14,14$ ($\bar{q}_{\max} = 0,29$, $\bar{r}_0 = 1,45$); 3 – $l = 21,21$ ($\bar{q}_{\max} = 0,143$, $\bar{r}_0 = 1,65$); б) при $\bar{r}_0 = 1$ для ефективного ККД нагріву виробу двофазним струменем, що відповідає різній дистанції наплення: 1 – $l = 7,07$ ($\eta = 23\%$); 2 – $l = 14,14$ ($\eta = 14\%$); 3 – $l = 21,21$ ($\eta = 9\%$)

Для з'ясування впливу закономірностей коефіцієнта зосередженості теплового потоку k і ефективного ККД η – доцільним є розгляд деякої гіпотетичної ситуації, в якій зі зміною дистанції наплення змінюється тільки ефективний ККД нагріву η , коефіцієнт зосередженості k

залишається незмінним. Розподіл щільності підведеного теплового потоку \bar{q} при $\bar{r}_0 = 1$ для різних l , що відповідає даній ситуації ілюструє рис. 3.

Як видно із рисунку в 3 зоні, яка прилягає до максимуму теплопідводу температурні рівні системи тим вище, чим менша дистанція напilenня l . Причому велику роль відіграє збільшення плями нагріву зі збільшенням величини l . Для незмінних розмірів плями нагріву ефект зміни температурних рівнів при варіюванні дистанції напilenня є менш суттєвим (зіставлення суцільних і пунктирних ліній на графіках відповідають фактичній і гіпотетичній ситуаціям).

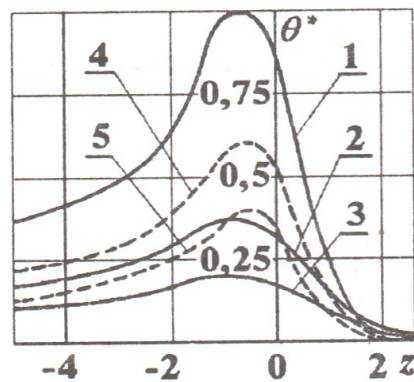


Рис. 3. Розподіл температури θ^* вздовж осі z в шарувато-неоднорідній системі «одношарове покриття-підшар-основа» при різних дистанціях напilenня : 1 – $l = 7,07$ ($\bar{q}_{\max} = 1$, $\bar{r}_0 = 1$); 2 – $l = 14,14$ ($\bar{q}_{\max} = 0,29$, $\bar{r}_0 = 1,45$); 3 – $l = 21,21$ ($\bar{q}_{\max} = 0,143$, $\bar{r}_0 = 1,65$); 4, 5 – дані, що відповідають $\bar{r}_0 = 1$ та ефективному ККД нагріву виробу двофазним струменем, який відповідає дистанції напilenня $l = 14,14$ і $21,21$

Аналізуючи закономірності зміни температури на поверхні теплопідводу слід відмітити також, що з віддаленням від місцезнаходження максимуму температурної функції $\theta^* = f(z)$ відмінності температур відносяться до різних дистанцій напilenня (лінії 1, 2, 3 на рис. 3) помітно змінюються. Перед джерелом плазмового нагріву (по ходу його руху) вбачається інверсія зіставлюваних температурних кривих.

Останнє зумовлене тим, що при підвищенні дистанції напилення l має місце росту плями нагріву. Це підтверджується тим, що в випадку відміченої вище гіпотетичної ситуації, коли розміри плями нагріву \bar{r}_0 залишаються постійними незалежно від дистанції напилювання, ефект вказаної інверсії не спостерігається.

Література

1. Прокопов В. Г., Фіалко Н. М., Шеренковський 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 Междунар. конф. Київ: Ін-т пром. екології, ІПЦ «АЛКОН» НАНУ, 2005. С. 148–152.
2. Прокопов В. Г., Фіалко Н. М. Теплофізика енергозберігаючих технологій для енергетики. Київ: Інститут технічної теплофізики НАН України, 2000. 224 с.
3. Шпак А. П., Прокопов В. Г., Фіалко Н. М., Меранова Н. О., Шеренковський Ю. В., Коржик В. М. Теплофізика формування аморфних і нанокристалічних газотермічних покриттів. Математичні моделі. Київ: Академперіодика, 2005. 120 с.
4. Dinzhos R., Fialko N., Prokopov V., Sherenkovskiy Yu., 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. No. 5/6 (107). P. 49–57. DOI: <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. *Materials Science*. 2025. Vol. 61. P. 566–571. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-026-01026-w>

6. Fialko N., Meranova N., Korzhik V., Babak V., Sherenkovskiy Yu., 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, No. 1. P. 145–155. DOI: <https://doi.org/10.33070/etars.1.2025.11>

7. Shchepetov V. V., Fialko N. M., Bys S. S. Solid lubricant nanocoatings based on magnesium compounds. *Problems of Tribology*. 2026. Vol. 31, No. 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>