

**ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ГАЗОПОРОШКОВОГО СТРУМЕНЯ ПРИ ЗАСТОСУВАННІ  
ГАЗОПОЛУМ'ЯНЕВОГО СПОСОБУ ВІДНОВЛЕННЯ РОБОЧИХ  
ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ СУДНОВИХ МАШИН І МЕХАНІЗМІВ**

**М.С. Агєєв<sup>1</sup>, С.М. Устїнцев<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>д.т.н., професор кафедри експлуатації суднових енергетичних установок,  
Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна,  
ORCID ID: 0000-0001-5691-8986

<sup>2</sup>аспірант кафедри експлуатації суднових енергетичних установок,  
Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна,  
ORCID ID: 0000-0002-4352-9479

**Анотація**

**Вступ.** У процесі газополум'яневого напилення джерелом теплової енергії є полум'я, що утворюється в результаті горіння суміші «кисень – горючий газ». Як горючий газ використовують ацетилен, пропан-бутан, водень, природний газ й інші газоподібні вуглеводні. Однією з найважливіших характеристик полум'я є температура, яка залежить від співвідношення «окислювач – горючий газ». Пульсуючий характер полум'я зумовлює нерівномірний розподіл щільності потоку частинок порошку, отже, їх нерівномірне нагрівання. Тому розрахунки теплових характеристик струменя нагрітих газів і температури частинок не гарантують належної точності. Для дослідження процесів теплообміну в газопорошковому струмені необхідно мати дані про щільність теплового потоку, ентальпії, в'язкості, коефіцієнти тепло- і температуропровідності, що визначають умови й інтенсивність перебігу процесу. У зв'язку із цим основну увагу в роботі приділено експериментальному визначенню теплових характеристик полум'я розпилювача порошку. **Мета** статті полягає в експериментальному дослідженні процесів теплообміну газопорошкового струменя, що впливає на умови, якість та інтенсивність процесу відновлення та зміцнення робочих поверхонь деталей суднових технічних засобів під час відновлювального ремонту. **Результати.** На підставі результатів проведених теоретичних і експериментальних досліджень термічних параметрів полум'я встановлено, що побудовано поля розподілу температури та щільності теплових потоків для ацетилено-кисневого та пропан-бутан-кисневого полум'я. **Висновки.** Дослідження термічних характеристик полум'я у процесі відновлення та зміцнення поверхонь деталей суднових технічних засобів дозволяє стверджувати, що на щільність покриттів і міцність зчеплення з основою передусім впливає ступінь термічної активації матеріалу, що напилюється. Установлено відстань від зрізу сопла та радіус перерізу полум'я, на якій значення щільності теплового потоку та температура досягають максимального значення. Доведено, що максимальні значення щільності потоку та температури зміщуються до осі полум'я, а мінімальні – до периферії.

**Ключові слова:** газопорошковий струмінь, тепловий потік, газополум'яневе покриття, сопло розпилювача, калориметричний зонд, робочі поверхні деталі суднових технічних засобів

STUDY OF THERMAL CHARACTERISTICS OF THE GAS-POWDER FLOW  
USING THE GAS-FLAME METHOD OF RESTORATION OF WORKING SURFACES  
OF PARTS OF SHIP MACHINES AND MECHANISMS

M.S. Ahieiev<sup>1</sup>, S.M. Ustintsev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Operation  
of Ship Power Plants,

Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine,  
ORCID ID: 0000-0001-5691-8986

<sup>2</sup>Graduate student of the Department of Operation of Ship Power Plants,

Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine,  
ORCID ID: 0000-0002-4352-9479

**Summary**

**Introduction.** In gas-flame spraying, the source of thermal energy is the flame formed as a result of burning a mixture of oxygen and combustible gas. Acetylene, propane-butane, hydrogen, natural gas and other gaseous hydrocarbons are used as fuel gas. One of the most important characteristics of a flame is its temperature, which depends on the ratio of oxidizer to combustible gas. The pulsating nature of the flame causes an uneven distribution of the density of the flow of powder particles and, therefore, their uneven heating. Therefore, the calculations of the thermal characteristics of the jet of heated gases and the temperature of the particles do not guarantee sufficient accuracy. To study heat exchange processes in a gas-powder jet, it is necessary to have data on heat flow density, enthalpy, viscosity, coefficients of thermal and thermal conductivity, which determine the conditions and intensity of the process. In connection with the above, the main attention in the work is given to the experimental determination of the thermal characteristics of the flame of the powder atomizer. **Purpose.** The purpose of the article is an experimental study of the processes of heat exchange of a gas-powder jet, which affects the conditions, quality and intensity of the process of restoration and strengthening of the working surfaces of parts of ship's technical equipment in the process of restorative repair. **Results.** Based on the results of theoretical and experimental studies of the thermal parameters of the flame, it was established that the fields of temperature distribution and density of heat flows for acetylene-oxygen and propane-butane-oxygen flames were constructed. **Conclusions.** The study of the thermal characteristics of the flame in the process of restoration and strengthening of the surfaces of parts of ship's technical equipment allows us to state that the degree of thermal activation of the sprayed material has the main effect on the density of the coatings and the strength of adhesion to the base. The distance from the nozzle section and the radius of the flame cross-section at which the value of the heat flux density and the temperature reach the maximum value are established. It is proved that the maximum values of the flux density and temperature shift to the flame axis, and the minimum values to the periphery.

**Key words:** gas powder jet, heat flow, gas flame coating, atomizer nozzle, calorimetric probe, working surfaces of parts of ship's technical equipment.

**Вступ.** Процес нанесення покриттів є результатом таких фізико-хімічних взаємодій у багатофазній системі:

– хімічна взаємодія в системі «горючий газ – окислювач», у результаті якої виділяється кількість енергії, що визначається складом суміші та супроводжується

значним підвищенням температури газів у зоні реакції, утворенням продуктів горіння, підвищенням тиску та швидкості їх переміщення в напрямку руху фронту полум'я;

– взаємодія продуктів горіння із частинками напилюваного матеріалу, під час якої частки одержують деяку кількість теплової та кінетичної енергії;

– перехід кінетичної енергії руху напилюваних частинок у роботу деформації за їх механічного контакту з поверхнею [1; 2].

На поверхні деталі утворюється необхідний шар захисного покриття, властивості якого залежать від кількісних і якісних характеристик взаємодії.

Основний вплив на щільність покриттів і міцність зчеплення з основою здійснює ступінь термічної активації матеріалу, що напилюється, тому бажано, щоб контакт із поверхнею деталі відбувся в точці максимального нагрівання частинок [3].

**Постановка проблеми.** Структурний стан і властивості напилених покриттів залежать від параметрів процесу газополум'яневого напилення, тому для отримання щільних покриттів з високою міцністю зчеплення варто контролювати вплив газопорошкового струменя на фізико-механічні властивості відновлених поверхонь (пористість, мікротвердість, міцність зчеплення, зносостійкість і корозійна стійкість). Формування покриття супроводжується інтенсивним впливом факела на частинки розпиленого матеріалу та їх взаємодією одна з одною в шарі на поверхні деталі [4]. Наприклад, щоб поліпшити проплавлення порошкового матеріалу, що напилюється, і збільшити міцність зчеплення покриття з основою, необхідно збільшити температуру та довжину струменя (полум'я). Для зменшення нагріву деталі у процесі напилення й окислення поверхні необхідно зменшити тепловкладення в поверхню, що напилюється. Окрім цього, високий нагрів поверхні, що напилюється, призводить до структурних змін і зниження твердості в зоні напилення та прилеглих областях, що часто неприпустимо [5].

Тому дослідження термічних характеристик газопорошкового струменя надають можливість аналітично й експериментально оцінити вплив розподілу температур перетину, довжини факела полум'я та температури частинок на якість відновлюваної поверхні.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Як зазначалося в роботах [6; 7], за своїми термічними властивостями пропан-бутан є найближчим до ацетилену газом. Це підтверджується даними роботи [8], де наведено результати дослідження кількості тепла, що виділяється залежно від обсягу пального газу за його згоряння в суміші з киснем.

У розрахунках теплових характеристик полум'я терморозпилювачів, виконаних на підставі законів перебігу затопленого струменя, розглядався безперервний потік нагрітих газів [9; 10]. Проте стробоскопічними дослідженнями, проведеними з використанням приладу ІСС-1, встановлено пульсуючий характер полум'я.

Пульсуючий характер полум'я зумовлює нерівномірний розподіл щільності потоку частинок порошку, отже, їх нерівномірне нагрівання. Тому розрахунки теплових характеристик струменя нагрітих газів і температури частинок не гарантують належної точності [3].

Унаслідок неоднорідності розподілу за поперечним перерізом газового струменя температурного та швидкісного полів порошок, що напилюється,

нагрівається неоднаково. У зв'язку із цим периферійні частинки нагріваються не досить, потрапляння їх у покриття призводить до зниження його якості, як зазначається в роботі [11].

У зв'язку із цим основну увагу в роботі приділено експериментальному визначенню теплових характеристик полум'я порошкового розпилювача.

**Формулювання цілей статті.** Визначення термодинамічних характеристик газопорошкового струменя (ентальпії полум'я, щільності теплового потоку, температури полум'я тощо) для отримання відновлювально-захисних покриттів з підвищеними експлуатаційними характеристиками.

**Виклад основного матеріалу.** Зазвичай дослідження властивостей нагрітих газових потоків проводять за допомогою зондів різного типу. У цій роботі дослідження виконували з використанням калориметричного зонда за відомою методикою [12], що дозволяє визначити теплоенергетичні параметри багатоструменевого джерела теплової енергії з потужністю до 100 кВт.

Зміна температури зонда під час уведення в полум'я (рис. 1). Ділянка 1 на кривій відповідає контакту зонда з полум'ям, ділянка 2 відповідає поширенню теплового потоку вздовж осі зонда, ділянка 3 визначає початок плавлення лицьового торця зонда та характеризується уповільненням зростання температури.

На початку нагріву (етап 1) за час  $t_1 = 0,3l_3^2 / a_3$  (де  $a_3$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу зонда) температура змінюється з деяким прискоренням. Потім, за теплового потоку, що встановився, зміна температури відбувається за лінійним законом до початку плавлення лицьового торця зонда. У мить плавлення підвищення температури уповільнюється, приріст її прагне нуля.

У роботі [12] запропоновано вираз для опису зміни температури за віссю зонда:

$$T = \frac{qt}{\rho_3 C_3 l_3} + \frac{ql_3}{l_3} \times \frac{3x^2 - l_3^2}{6l_3^2}, \quad (1)$$

де  $\rho_3$  – щільність матеріалу зонда, кг/м<sup>3</sup>;

$\tau$  – час взаємодії, с;

$C_3$  – питома теплоємність матеріалу зонда, Дж/кг×К;

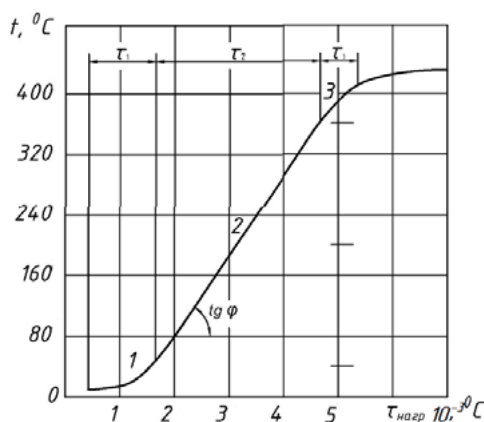


Рис. 1. Кінетика нагріву робочої зони калориметричного зонда

$x$  – поточна координата, м.

Диференціюємо рівняння (1) за часом  $\tau$  й отримаємо значення густини теплового потоку:

$$q = \rho_3 C_3 l_3 \frac{dT}{d\tau}, \quad (2)$$

де  $\frac{dT}{d\tau}$  – зміна температури за часом на лінійній ділянці осцилограми (рис. 1).

За виміряними  $dT/d\tau$  на лінійних ділянках осцилограм, отриманих під час експериментів, розраховувалась щільність теплового потоку в різних точках уздовж осі та за радіусом перерізу полум'я. У тих же точках полум'я вимірювався динамічний тиск газів (тиск гальмування) за допомогою трубки Піто та рідинного тягонапорометра.

Для визначення ентальпії полум'я використовувалась формула Фей – Риддела [13], яка для газів із температурою 2 000 °К та в'язкістю  $\nu \approx 1\,000$  м<sup>2</sup>/с перетворена таким чином:

$$q = 4,5 \times 10^{-4} r_3^{-5} P_0^{0,25} (P_0 - P_\infty)^{0,25} (H_0 - H_\infty), \quad (3)$$

де  $P_0$  – тиск гальмування, Па;

$P_\infty$  – тиск на нескінченній відстані (атмосферний), Па;

$H_0$  і  $H_\infty$  – відповідно питомі ентальпії гальмування та ентальпії у прикордонному шарі, кДж;

$r_3$  – радіус закруглення обтічника зонда, м.

Підставленням у формулу (3) значень щільності теплового потоку, визначених експериментально, було отримано розподіл ентальпії за радіусом перерізу на різних відстанях від сопла розпилювача.

За розрахованою ентальпією визначалася температура ацетилен-кисневого та пропан-бутан-кисневого полум'я (рис. 2).

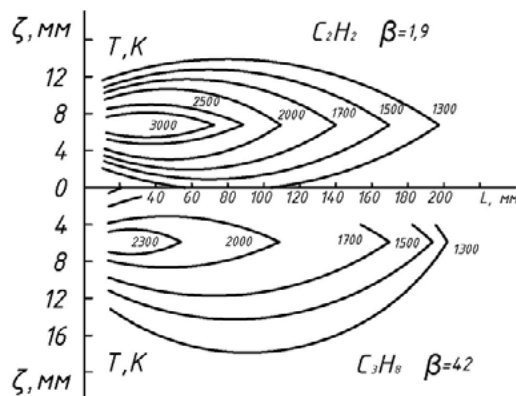


Рис. 2. Температурні поля полум'я терморозпилювального пістолета

Експериментальна перевірка отриманих значень температури полум'я була виконана шляхом вимірювання температур за допомогою Pt10Rh/Pt термопари.

На підставі отриманих даних побудовано поля температури та щільності теплових потоків для ацетилено-кисневого та пропан-бутан-кисневого полум'я (рис. 3).

Аналіз результатів, отриманих експериментальним і розрахунковим шляхом, показує, що дані, починаючи з дистанції вимірювань 60 мм, відрізняються на величину, що не перевищує середньої похибки експериментів, і відповідають результатам інших авторів [14; 15].

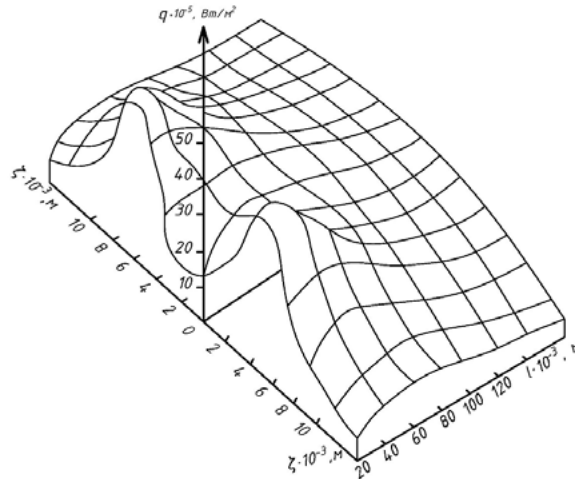


Рис. 3. Щільність теплового потоку терморозпилювального пістолета

**Висновки.** Максимальні значення щільності теплового потоку та температур досягаються з відривом 20–30 мм від зрізу сопла на радіусі перерізу полум'я, що дорівнює 6 мм, тобто в зоні ядра  $((75-78)10^5 \text{ Вт/м}^2)$ . На осі полум'я в цьому перерізі значення густини теплового потоку вдвічі менше, у разі віддалення від сопла відбувається перерозподіл значень  $q$  і температури. Максимальні значення  $q$  та  $T$  зміщуються до осі полум'я, а мінімальні – до периферії.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Інженерія поверхні : підручник / К.А. Ющенко та ін. Київ : Наукова думка, 2007. 559 с.
2. Application of combined electric arc coatings for parts and units of vehicles recovery in Repair Technologies / M. Ahieiev et al. SAE Technical Paper Series. 2021. DOI: 10.4271/2021-01-5100.
3. Агеєв М.С, Устінцев С.М. Особливості формування газотермічних покриттів у разі відновлення робочих поверхонь деталей суднових технічних засобів. *Розвиток транспорту* : науковий журнал. 2023. № 3 (18). С. 76–84. DOI: 10.33082/td.2023.3-18.06.
4. Of combined electric arc coatings / M.S. Ageev et al. *International Scientific Journal Problems of Tribology*. 2019. Vol. 24. № 3/93. P. 51–61. DOI: 10.31891/2079-1372-2019-93-3-51-61.
5. Лузан С.О. Розробка методології управління якістю поверхневих шарів деталей, які наносяться газополум'яним напилюванням, комбінованим з іншими технологіями. *Машинобудування*. Харків : УІПА, 2008. № 2. С. 119–127.

6. Walser B. Our Thermal Spray Industry. *J. of Thermal Spray Technology*. 1996. Vol. 5. № 3. P. 235–238.
7. R. Unger V., Belaschenko W. Kratochvil A new arc spray system to spray high density, low oxides coatings. Thermal spray: Proceeding of the 15' International conference. Edited by Coddet. Nice. 1998. P. 1989–1995.
8. The Influence of Design Parameters for Electric arc Equipment on the Factors of Spray Process and Properties of Coatings / M. Ageev et al. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*. 2019. Col.1 (32). P. 114–122. DOI: 10.32515/2664-262X.
9. Howes C.P. Thermal spraying: processes, preparation, coatings and applications. *Well. J.* 1994. 73. № 4. P. 47–51.
10. Щепетов В.В. Зносостійкі покриття, отримані детонаційним напилюванням. *Збірник наукових праць Центрального науково-дослідного інституту Збройних сил України*. Київ, 2002. № 4 (21). С. 21–27.
11. Datenbank für das thermische Spritzen. *Praktiker*, 1996. 470 p.
12. Агєєв М.С., Головащук М.В. Підвищення експлуатаційних властивостей деталей засобів транспорту шляхом керування факторами процесу електродугового напилення багатофункціональних покриттів. *Вісник Хмельницького національного університету*. Серія «Технічні науки». 2019. № 3 (273). С. 240–248. DOI: 10.31891/2307-5732.
13. Hou Qing-yu. Gao Jia-sheng. *Anhui gongye daxue xuebao. Ziran kexue ban J. Anhui Univ. Technol. Natur. Sci.* 2003. № 1. P. 13–16.
14. Нагрівання частинок в гетерофазному струмені при газополум'яному напиленні покриттів. Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві / М.К. Резніченко та ін. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2011. Вип. 110. С. 80–84.
15. Ohmori Akira, Takasaki Nobuhiro. Sochi Yoshinobu Fusing of sprayed Ni – base coatings by induction heating. *Trans. JWRI*. 1992. 21. № 2. P. 195–200.

#### REFERENCES

1. Yushchenko, K.A., Borisov, Yu. S., Kuznetsov, V. D., Korzh, V.M. Surface engineering [Inzheneriya poverkhn]: handbook. Kiev: Naukova Dumka, 2007. 559 p.
2. Ahieiev, M., Gritsuk, I., Litikova, A., Bilousov, I., Vrublevskyi, R., Boboshko, O., Smyrnov, O., Saraieva, I., Khudiakov, I., Pohorletskyi, D., 2021. Application of combined electric arc coatings for parts and units of vehicles recovery in Repair Technologies. SAE Technical Paper Series. doi: 10.4271/2021-01-5100.
3. Ahieiev, M.S, Ustintsev, S.M. Peculiarities of the formation of gas-thermal coatings in the case of restoration of the working surfaces of parts of ship's technical equipment [Osoblyvosti formuvannya hazotermichnykh pokryttiv u razi vidnovlennya robochych poverkhon' detaley sudnovykh tekhnichnykh zasobiv]. Scientific journal "Transport Development". 2023, № 3 (18), P. 76–84. <https://doi.org/10.33082/td.2023.3-18.06>.

4. Ageev, M.S, Lopata, L., Smirnova, T. Of combined electric arc coatings. International Scientific Journal Problems of Tribology. 2019. Vol. 24, № 3/93. P. 51–61. DOI: <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2019-93-3-51-61>.
5. Luzan, S.O. Development of a quality control methodology for the surface layers of parts applied by gas flame spraying combined with other technologies. [Rozrobka metodolohiyi upravlinnya yakistyupoverkhnevnykh shariv detaley, yaki nanosyat'sya hazopolum'yanym napylyuvannyam, kombinovanyim z inshymy tekhnolohiyamy]. Engineering. Kharkiv: UIPA, 2008. № 2. P. 119–127.
6. Walser, B. Our Thermal Spay Industry. J. of Thermal Spray Technology. 1996. Vol. 5. № 3. P. 235–238.
7. R. Unger, V. Belaschenko, W. Kratochvil A new arc spray system to spray high density, low oxides coatings. Thermal spray: Proceeding of the 15<sup>th</sup> International conference. Edited by Coddet. Nice: 1998. P. 1989–1995.
8. Ageev, M., Dovzhuk, S., Nikolaychuk, V. The Influence of Design Parameters for Electric arc Equipment on the Factors of Spray Process and Properties of Coatings. Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences. 2019. Col. 1 (32). P. 114–122. DOI: <https://doi.org/10.32515/2664-262X>.
9. C.P. Howes Thermal spraying: processes, preparation, coatings and applications. Well. J. 1994. 73, № 4. P. 47–51.
10. Shchepetov, V.V. Wear-resistant coatings obtained by detonation spraying [ Znosostiyki pokryttya, otrymani detonatsiynym napylyuvannyam]. Coll. of science works of the Center for the Armed Forces of Ukraine. K.: 2002. № 4 (21). P. 21–27.
11. Datenbank fur das thermische Spritzen. Praktiker: 1996. 470 p.
12. Ageev, M.S., Golovashchuk, M.V. (2019). Improving the operational properties of parts of means of transport by controlling the factors of the process of electric arc spraying of multifunctional coatings [Pidvyshchennya ekspluatatsiynykh vlastyvostry detaley zasobiv transportu shlyakhom keruvannya faktoramy protsesu elektroduhovoho napyleniya bahatofunktsional'nykh pokryttiv]. Scientific journal "Bulletin of the Khmelnytskyi National University". Technical sciences. № 3 (273). 240–248. doi: 10.31891/2307-5732.
13. Hou Qing-yu. Gao Jia-sheng Anhui gongye daxue xuebao. Ziran kexue ban J. Anhui Univ. Technol. Natur. Sci. 2003. № 1. P. 13–16.
14. Reznichenko, M.K., Baranov, K.A., Luzan, S.O. Heating of particles in a heterophase jet during gas flame sputtering of coatings [Nahrivannya chastynok v heterofaznomu strumeni pry hazopolum yanomu napyleni pokryttiv]. Resource-saving technologies, materials and equipment in repair production: Bulletin of the Kharkiv National Technical University of Agriculture named after Peter Vasylenko. Kharkiv: KhNTUSG. 2011. Issue 110. Pp. 80–84.
15. Ohmori Akira, Takasaki Nobuhiro. Sochi Yoshinobu Fusing of sprayed Ni – base coatings by induction heating. Trans. JWRI. 1992. 21, № 2. P. 195–200.