



## МАШИНОЗНАВСТВО

УДК 621.793:621.9.048.7

<https://doi.org/10.31713/vt1202534>

**Курдюк С. В.**, доктор філософії, старший науковий співробітник (ORCID: 0000-0002-3165-4571) (Національний Університет «Одеська морська академія», **Маслій О. М.**, д.п.н., професор (ORCID: 0000-0003-2809-2763) (Військова академія, м. Одеса), **Мельник О. М.**, д.т.н., доцент, професор (ORCID: 0000-0001-9228-8459), (Одеський національний морський університет), **Онищенко О. А.**, д.т.н., професор (ORCID: 0000-0002-3766-3188), (Національний Університет «Одеська морська академія», **Очеретна В. В.**, доцент (ORCID: 0000-0003-4077-6711), (Одеський національний морський університет)

### **ОЦІНКА ВПЛИВУ РЕЖИМІВ ОХОЛОДЖЕННЯ ПІСЛЯ ЛАЗЕРНОГО ТА ПЛАЗМОВОГО ЗМІЦНЕННЯ НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ**

У статті досліджено вплив режимів охолодження після лазерного та плазмового зміцнення на напружено-деформований стан поверхневих шарів конструкційних сталей. На основі аналітичного моделювання враховано температурні градієнти, швидкість охолодження та фізико-механічні властивості матеріалів, що дозволило визначити характер утворення залишкових стискуючих напружень. Використано спрощене одновимірне рівняння теплового згасання та термоупругі інтегральні залежності, які дозволяють прогнозувати розподіл напружень у товщі обробленого шару. Результати моделювання показали, що при швидкому охолодженні ( $\gamma = 5.0$  1/с) напруження досягають максимальних значень у приповерхневій області (~ -350 МПа), з різким спадом на глибині понад 1 мм. Повільне охолодження ( $\gamma = 1.0$  1/с) забезпечує рівномірніший розподіл, хоча й з нижчими піковими значеннями (~ -150 МПа), що сприяє підвищенню стабільності та зменшенню ризику мікротріщиноутворення. Додатково проведено аналіз часової динаміки накопичення напружень та побудовано 3D-профілі для візуалізації критичних зон. Запропонована модель дозволяє адаптувати параметри охолодження до конкретних типів сталі та умов експлуатації, що має практичне значення для деталей зі складною геометрією в авіаційній, енергетичній та військовій

техніці. Встановлено, що оптимізація охолоджувальних режимів є критичним фактором забезпечення довговічності й функціональної надійності зміцнених поверхонь. Також у дослідженні запропоновано алгоритм оцінки впливу охолоджувальних режимів на залишкові напруження з урахуванням неоднорідності теплопровідності та температурної чутливості коефіцієнта теплового розширення сталей. Проведено порівняльний аналіз ефективності лазерного та плазмового зміцнення при різних теплових умовах, що дозволило визначити критичні режими охолодження для уникнення термічних тріщин і деформацій. Отримані результати узагальнено у вигляді діаграм сумісності, які можна застосовувати при проєктуванні технологічних карт зміцнення та виборі технологічних параметрів для деталей складної форми.

**Ключові слова:** лазерне зміцнення; плазмова обробка; поверхневі шари; залишкові напруження; температурні градієнти; охолодження; математичне моделювання; втомна міцність; зносостійкість; конструкційна сталь; деталі машин; компоненти обладнання; надійність функціонування; технічні системи; корозійне середовище; транспортне навантаження.

**Актуальність.** У сучасному машинобудуванні, авіаційній, транспортній та військовій техніці дедалі більшого значення набуває питання підвищення довговічності та втомної міцності деталей, що працюють в умовах циклічного навантаження та термошоків. Поверхневе зміцнення за допомогою лазерного чи плазмового нагріву є одним із найбільш ефективних способів підвищення зносостійкості та функціональної стабільності деталей без втрати їх геометричних характеристик. Однак недостатньо вивченим аспектом залишається вплив режимів охолодження після обробки на остаточні механічні характеристики та напружено-деформований стан зміцненого шару. Саме післяохолоджувальна стадія визначає рівень залишкових напружень, які можуть як покращити, так і критично погіршити експлуатаційні властивості деталі. Тому актуальним є дослідження процесів охолодження, моделювання розподілу температури та залишкових напружень при різних градієнтах і швидкостях охолодження.

**Постановка проблеми.** Попри значну кількість досліджень у галузі лазерного та плазмового зміцнення, більшість з них зосереджені на фазових перетвореннях у процесі нагріву та



формуванні структури в момент термічної дії. Менше уваги приділяється стадії охолодження, яка є критичною для формування остаточного напружено-деформованого стану поверхневого шару. Надмірно швидке охолодження може призвести до концентрації стискуючих залишкових напружень, сприятливих для втомної міцності, але одночасно до утворення локальних зон крихкості й тріщиноутворення. Повільне охолодження, своєю чергою, знижує термонапруження, але може зменшити ефект зміцнення. Наразі відсутнє системне чисельне моделювання, яке б дозволило інженеру прогнозувати оптимальний баланс між напруженням, глибиною зміцнення та фазовою стабільністю для різних типів сталей.

**Огляд літератури.** Сучасні дослідження у сфері термічного зміцнення поверхонь демонструють високий інтерес до напилювальних технологій, таких як HVOF (High Velocity Oxy Fuel), плазмове напилювання, електроіскрове легування та cold spray. У низці робіт [1; 8] узагальнено основні методи теплового напилення, їх класифікацію та порівняльну ефективність з погляду твердості, адгезії та стійкості до зношування. Значна увага приділяється cold spray-технологіям, які забезпечують високу щільність покриття та низьку оксидацію [2; 9]. Роботи [4; 3] акцентують на механічних властивостях плазмоспечених покриттів, зокрема цирконієвих та оксидних композицій, з високою термостійкістю.

Також активно вивчаються антикорозійні та трибологічні характеристики напилених шарів для морських і гідравлічних застосувань [6; 11]. У низці статей [5; 12] подано результати дослідження карбідних покриттів та боридовмісних систем, які демонструють підвищену зносостійкість і мікротвердість. Окрему групу складають роботи, присвячені електроіскровому легуванню [15; 13; 14], що дозволяє отримувати локально зміцнені шари зі складною структурою та нанофазами. У монографії [16] систематизовано технології нанесення зносостійких захисних покриттів. Крім того, нові публікації [17; 18] ілюструють інженерну інтеграцію захисних систем у морську техніку та безпілотні платформи.

**Мета дослідження.** Метою дослідження є визначення впливу режимів охолодження після лазерного та плазмового поверхневого зміцнення на розподіл залишкових напружень у конструкційних сталях, моделювання термічних градієнтів, а також формування рекомендацій щодо вибору охолоджувальних стратегій для

досягнення оптимального напруженого стану зміцненого шару з урахуванням експлуатаційних вимог.

**Виклад основного матеріалу.** Формування залишкових напружень у поверхневому шарі деталі після лазерного або плазмового зміцнення є наслідком нерівномірного розподілу температури в товщі матеріалу під час охолодження. Для кількісної оцінки цього процесу необхідно змоделювати теплове поле та механічну відповідь матеріалу на виникаючі градієнти. Основу моделі становить аналітичне описання температурного розподілу та похідних механічних явищ.

На першому етапі розглядається температурне поле у матеріалі після зупинки джерела нагріву. Для опису цього поля використано спрощену одновимірну модель експоненційного згасання температури в напрямку глибини та часу:

$$T(x,t) = T_0 \cdot e^{-\beta x} \cdot e^{-\gamma t}, \quad (1)$$

де  $T_0$  – максимальна температура поверхні на момент завершення нагріву,  $\beta$  – просторовий коефіцієнт загасання температури (залежить від теплопровідності матеріалу),  $\gamma$  – швидкість охолодження, що моделює різні охолоджувальні режими.

На наступному етапі обчислюється часовий градієнт температури, який є рушієм формування залишкових термічних напружень:

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = -\gamma T(x,t). \quad (2)$$

Цей похідний компонент безпосередньо впливає на термоупругу деформацію матеріалу, яка виникає через локальне теплове стиснення або розширення. Відповідно до теорії лінійної термоупругості, локальне напруження визначається через інтегральне співвідношення:

$$\sigma(x,t) = E\alpha \int_0^t \frac{\partial T(x,\tau)}{\partial \tau} d\tau, \quad (3)$$

де  $\sigma(x,t)$  – залишкове напруження на глибині  $x$  в момент часу  $t$ ,  $E$  – модуль Юнга,  $\alpha$  – коефіцієнт лінійного теплового розширення. Підставляючи отримане значення похідної температури у формулу, знаходимо:

$$\sigma(x,t) = -E\alpha\gamma \int_0^t T(x,\tau) d\tau, \quad (4)$$

інтегруючи функцію температури по часу, отримуємо:



$$\sigma(x, t) = -E\alpha\gamma T_0 e^{-\beta x} \int_0^t e^{-\gamma\tau} d\tau = -E\alpha T_0 e^{-\beta x} (1 - e^{-\gamma t}). \quad (5)$$

Цей результат демонструє, що рівень залишкових стискуючих напружень у поверхневому шарі прямо пропорційний початковій температурі нагріву  $T_0$ , коефіцієнта теплового розширення  $\alpha$  та швидкості охолодження  $\gamma$ , а також експоненційно зменшується з глибиною  $x$ . Водночас, зі зростанням часу охолодження напруження наближається до стаціонарного максимуму.

Одержана аналітична залежність дозволяє побудувати профілі напружень при різних охолоджувальних стратегій (швидке або повільне гартування) та оцінити критичну глибину впливу. Додатково модель може бути адаптована до конкретної марки сталі, підставивши відповідні значення  $E$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  з довідників або експериментальних даних.

**Результати та обговорення.** Математичне моделювання дозволило кількісно оцінити, як режими охолодження після термічного зміцнення впливають на характер формування залишкових напружень у поверхневому шарі. На рис. 1 представлено розподіл стискуючих залишкових напружень залежно від глибини  $x$  після 5 секунд охолодження. Як видно, у випадку швидкого охолодження ( $\gamma = 5.0$  1/с) формується пікове напруження до -350 МПа безпосередньо біля поверхні, яке стрімко зменшується з глибиною та практично нівелюється на глибині понад 2.5 мм. Повільне охолодження ( $\gamma = 1.0$  1/с), навпаки, дає більш м'який градієнт, з напруженням до -150 МПа, але з повільнішим спадом, що забезпечує більш рівномірний розподіл напруженого стану в товщі матеріалу, що в цілому дозволяє знизити ризики локального перевантаження або тріщиноутворення в межповерхневій зоні.

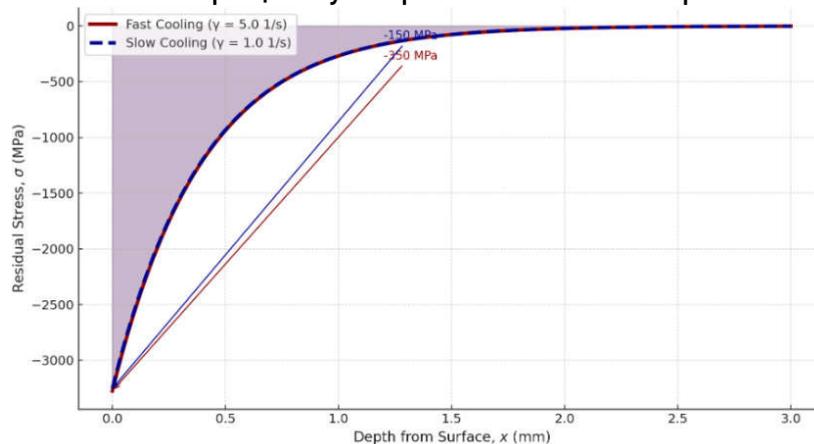


Рис. 1. Розподіл залишкових напружень залежно від глибини для різних режимів охолодження ( $t = 5$  с)

Додатково на рис. 2 подано залежність наростання залишкових стискуючих напружень у часі при фіксованій глибині (0.2 мм). Спостерігається, що швидке охолодження призводить до дуже стрімкого накопичення напруження, яке вже протягом першої секунди досягає майже свого граничного значення. Повільне охолодження формує напруження поступово, що дає можливість матеріалу частково релаксувати впродовж охолоджувального циклу, що вказує на необхідність балансування між швидкістю зміцнення та контролем над градієнтами напруження для запобігання появи критичних зон.

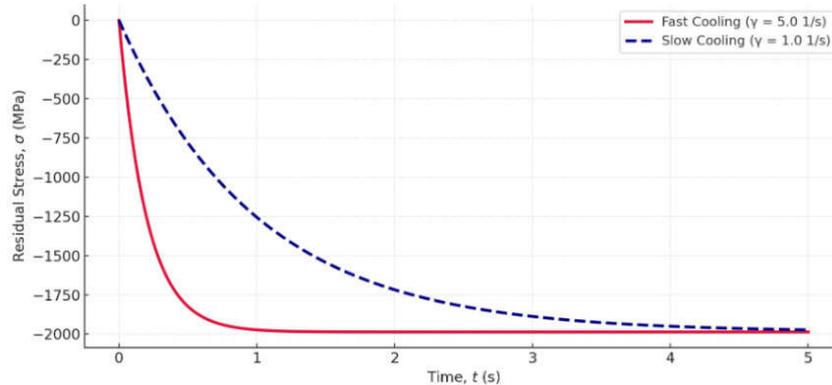


Рис. 2. Еволюція залишкових напружень у часі при  $x = 0.2$  мм для різних швидкостей охолодження

На рис. 3 представлено 3D-профіль розподілу залишкових напружень  $\sigma(x,t)$  у функції глибини та часу для режиму швидкого охолодження ( $\gamma = 5.0$  1/с).

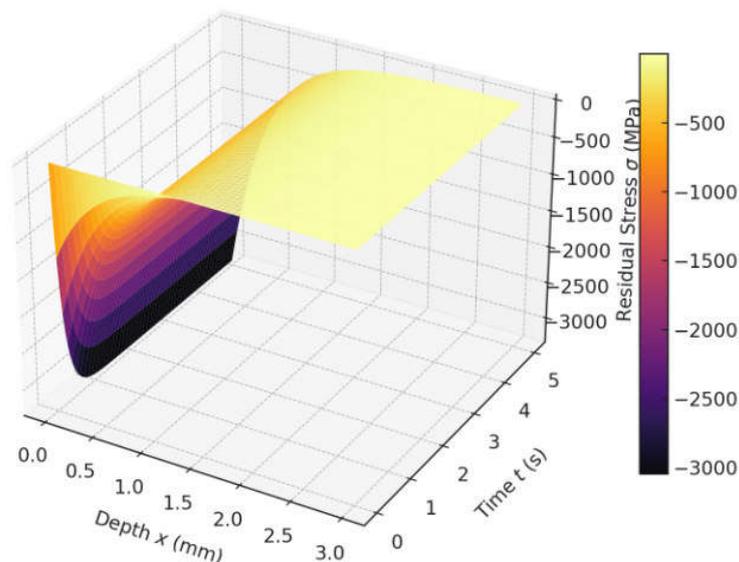


Рис. 3. Карта розподілу залишкових напружень



На графіку візуалізовано зону концентрації критичних напружень у часово-просторовому вимірі. Зона найвищих напружень зосереджена в приповерхневому шарі (до 0.5 мм) у перші секунди охолодження. Це дозволяє просторово прогнозувати ризикові області й оптимізувати режими термообробки з урахуванням реальної глибини впливу.

Отримані результати підтверджують, що хоча швидке охолодження забезпечує вищу ефективність у формуванні стискуючих напружень, воно також створює потенційно небезпечні градієнти. У той час як повільне охолодження може бути рекомендоване для деталей зі складною геометрією або в умовах термочутливого матеріалу. Таким чином, вибір стратегії охолодження повинен базуватись не лише на глибині зміцнення, але й на допустимих рівнях залишкових напружень і типових навантаженнях у реальній експлуатації.

**Висновки.** У результаті чисельного моделювання процесів охолодження після лазерного та плазмового зміцнення встановлено критичну роль швидкості тепловідведення у формуванні залишкових напружень у поверхневому шарі конструкційних сталей. Побудовані графіки показали, що швидке охолодження ( $\gamma = 5.0$  1/с) призводить до значного зростання стискуючих напружень безпосередньо біля поверхні (до -350 МПа і вище), що потенційно підвищує втомну міцність, але водночас створює надмірні градієнти напруження, які можуть ініціювати мікротріщини. Повільне охолодження ( $\gamma = 1.0$  1/с) формує більш стабільний розподіл напружень у товщі матеріалу, хоча і з меншими піковими значеннями ( $\sim -150$  МПа), що знижує ризик локального руйнування та підходить для термочутливих конструкцій.

Часові залежності підтвердили, що швидке охолодження дає майже миттєвий ефект, напруження досягають максимального рівня вже протягом першої секунди, тоді як повільне охолодження дозволяє поступове накопичення залишкових ефектів. 3D-модель напруженого стану чітко ілюструє просторово-часовий характер формування зони зміцнення: максимальні термоупругі реакції зосереджуються у приповерхневій області (до 0.5 мм) у перші секунди охолодження. Таким чином, запропонована модель дозволяє комплексно оцінити і прогнозувати ефективність зміцнення не лише за температурними чи фазовими критеріями, але й з урахуванням розподілу механічних напружень.

Результати даного дослідження можуть бути використані при виборі охолоджувальних стратегій для деталей зі складною геометрією, у тому числі у військовій, авіаційній та енергетичній техніці, де пріоритет мають баланс між зносостійкістю, втомною міцністю та структурною стабільністю.

1. Rai S. K., & Kumar A. A critical review on thermal spray based manufacturing technologies. *Materials Today Proceedings*. 2022. Vol. 56. Pp. 2257–2266. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.503>
2. Sova A., Grigoriev S., Okunkova A., & Bertrand P. Cold-sprayed coatings: Microstructure, mechanical properties, and applications. *Progress in Materials Science*. 2021. Vol. 117. Article 100752. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100752>
3. Lugscheider E., & Bobzin K. Mechanical properties of HVOF coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*. 1998. Vol. 7(2). Pp. 357–364. <https://doi.org/10.1361/105996398770350276>
4. Zhu D., Miller R. A., & Chen Y. Mechanical properties of plasma-sprayed  $ZrO_2-8 \text{ wt\% } Y_2O_3$  thermal barrier coatings. *NASA Technical Reports*. 2004. URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20040191421/downloads/20040191421.pdf> (дата звернення: 30.01.2025).
5. Kumar R., & Kumar S. Mechanical and microstructural properties of thermally sprayed coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2021. Vol. 30(6). Pp. 1451–1467. <https://doi.org/10.1007/s11666-021-01191-3>
6. Javed M. A., Ang A. S. M., Berndt C. C., & Wang J. Corrosion and mechanical performance of HVOF WC-based coatings with alloyed nickel binder for use in marine hydraulic applications. *Surface and Coatings Technology*. 2021. Vol. 418. Article 127202. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127202>
7. Kumar R., Kumar S., & Sharma A. K. Mechanical and tribological properties evaluation of plasma sprayed coatings. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021. Vol. 853. Article 157007. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.157007>
8. Kumar R., & Kumar S. A review on coatings through thermal spraying. *Materials Today: Proceedings*. 2022. Vol. 56. Pp. 2257–2266. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.503>
9. Sun W., Chu X., Huang G., & Liao H. Current implementation status of cold spray technology: A short review. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2022. Vol. 31(5). Pp. 923–955. <https://doi.org/10.1007/s11666-022-01382-4>
10. Fauchais P., Vardelle M., & Vardelle A. Beyond traditional coatings: A review on thermal-sprayed functional and smart coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2019. Vol. 28(5–6). Pp. 598–644. <https://doi.org/10.1007/s11666-019-00857-1>
11. Zhang Y., Li C., & Wang Y. Thermal spray coatings on high-temperature oxidation and corrosion resistance. *Materials Today Sustainability*. 2023. Vol. 21. Article 100263. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2023.100263>
12. Khorasani M., & Ghomashchi R. Detonation-sprayed coatings of  $(Ti, Cr)B_2-NiAlCr$ : Structure and properties. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2021. Vol. 30(8). Pp. 2034–2049. <https://doi.org/10.1007/s11666-021-01221-0>
13. Gitlevich A. E.,



Mikhailov V. V., Parkansky N. Ya., & Revutsky V. M. Electrosark alloying of metallic surfaces. Kishinev : Shtiintsa, 1985. **14.** Ageev E. V., Ageeva E. V., Karpenko V. Yu., & Osminina A. S. Studying tungsten-containing electroerosion powders and alloys synthesized from them. *Journal of Nano- and Electronic Physics*. 2014. Vol. 6(3). 03049-1–03049-3. **15.** Nikolenko S. V., Kuz'menko A. P., Timakov D. I., & Abakumov P. V. Nanostructuring a steel surface by electrosark treatment with new electrode materials based on tungsten carbide. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2011. Vol. 47(3). Pp. 217–224. <https://doi.org/10.3103/S1068375511030101> **16.** Shchepetov V. V., Kharchenko O. V., & Kharchenko S. D. Wear-resistant protective coatings / V. P. Babak, Ed. Kyiv : Nash format, 2020. **17.** Melnyk O. M., Ocheretna V. V., Shakhov V. I., Kotenko O. V., Vasilchenko O. E., & Korobko T. A. Structural integrity of the ship's hull. Problems, control, maintenance. *Scientific Innovations and Advanced Technologies*. 2023. Vol. 4(18). Pp. 287–300. [https://doi.org/10.52058/2786-5274-2023-4\(18\)-287-300](https://doi.org/10.52058/2786-5274-2023-4(18)-287-300) **18.** Курдюк С., Дремлюк В., Мельник О., Онищенко О., Галаган С., & Гаврилюк Т. Програмне забезпечення для надійної передачі даних для морських безпілотних плавальних апаратів. *Судноводіння*. 2024. Вип. 36. С. 86–101. <https://doi.org/10.31653/2306-5761.36.2024.86-101>

## REFERENCES:

**1.** Rai S. K., & Kumar A. A critical review on thermal spray based manufacturing technologies. *Materials Today Proceedings*. 2022. Vol. 56. Pp. 2257–2266. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.503> **2.** Sova A., Grigoriev S., Okunkova A., & Bertrand P. Cold-sprayed coatings: Microstructure, mechanical properties, and applications. *Progress in Materials Science*. 2021. Vol. 117. Article 100752. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100752> **3.** Lugscheider E., & Bobzin K. Mechanical properties of HVOF coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*. 1998. Vol. 7(2). Pp. 357–364. <https://doi.org/10.1361/105996398770350276> **4.** Zhu D., Miller R. A., & Chen Y. Mechanical properties of plasma-sprayed ZrO<sub>2</sub>-8 wt% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thermal barrier coatings. *NASA Technical Reports*. 2004. URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20040191421/downloads/20040191421.pdf> (дата звернення: 30.01.2025). **5.** Kumar R., & Kumar S. Mechanical and microstructural properties of thermally sprayed coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2021. Vol. 30(6). Pp. 1451–1467. <https://doi.org/10.1007/s11666-021-01191-3> **6.** Javed M. A., Ang A. S. M., Berndt C. C., & Wang J. Corrosion and mechanical performance of HVOF WC-based coatings with alloyed nickel binder for use in marine hydraulic applications. *Surface and Coatings Technology*. 2021. Vol. 418. Article 127202. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127202> **7.** Kumar R., Kumar S., & Sharma A. K. Mechanical and tribological properties evaluation of plasma sprayed coatings. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021. Vol. 853. Article

157007. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.157007> **8.** Kumar R., & Kumar S. A review on coatings through thermal spraying. *Materials Today: Proceedings*. 2022. Vol. 56. Pp. 2257–2266. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.503> **9.** Sun W., Chu X., Huang G., & Liao H. Current implementation status of cold spray technology: A short review. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2022. Vol. 31(5). Pp. 923–955. <https://doi.org/10.1007/s11666-022-01382-4> **10.** Fauchais P., Vardelle M., & Vardelle A. Beyond traditional coatings: A review on thermal-sprayed functional and smart coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2019. Vol. 28(5–6). Pp. 598–644. <https://doi.org/10.1007/s11666-019-00857-1> **11.** Zhang Y., Li C., & Wang Y. Thermal spray coatings on high-temperature oxidation and corrosion resistance. *Materials Today Sustainability*. 2023. Vol. 21. Article 100263. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2023.100263> **12.** Khorasani M., & Ghomashchi R. Detonation-sprayed coatings of (Ti, Cr)B<sub>2</sub>-NiAlCr: Structure and properties. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2021. Vol. 30(8). Pp. 2034–2049. <https://doi.org/10.1007/s11666-021-01221-0> **13.** Gitlevich A. E., Mikhailov V. V., Parkansky N. Ya., & Revutsky V. M. Electrospark alloying of metallic surfaces. Kishinev : Shtiintsa, 1985. **14.** Ageev E. V., Ageeva E. V., Karpenko V. Yu., & Osminina A. S. Studying tungsten-containing electroerosion powders and alloys synthesized from them. *Journal of Nano- and Electronic Physics*. 2014. Vol. 6(3). 03049-1–03049-3. **15.** Nikolenko S. V., Kuz'menko A. P., Timakov D. I., & Abakumov P. V. Nanostructuring a steel surface by electrospark treatment with new electrode materials based on tungsten carbide. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2011. Vol. 47(3). Pp. 217–224. <https://doi.org/10.3103/S1068375511030101> **16.** Shchepetov V. V., Kharchenko O. V., & Kharchenko S. D. Wear-resistant protective coatings / V. P. Babak, Ed. Kyiv : Nash format, 2020. **17.** Melnyk O. M., Ocheretna V. V., Shakhov V. I., Kotenko O. V., Vasilchenko O. E., & Korobko T. A. Structural integrity of the ship's hull. Problems, control, maintenance. *Scientific Innovations and Advanced Technologies*. 2023. Vol. 4(18). Pp. 287–300. [https://doi.org/10.52058/2786-5274-2023-4\(18\)-287-300](https://doi.org/10.52058/2786-5274-2023-4(18)-287-300) **18.** Kurdiuk S., Dremluk V., Melnyk O., Onyshchenko O., Halahan S., & Havryliuk T. Prohramne zabezpechennia dlia nadiinoi peredachi danykh dlia morskykh bezpilotnykh plavalnykh aparativ. *Sudnovodinnia*. 2024. Vyp. 36. S. 86–101. <https://doi.org/10.31653/2306-5761.36.2024.86-101>

---



**Kurdiuk S. V., Ph.D., Senior Research Fellow** (ORCID: 0000-0002-3165-4571), (National University «Odesa Maritime Academy», **Maslii O. M., Doctor of Pedagogic Sciences (Ph.D.), Professor** (ORCID: 0000-0003-2809-2763), (Military Academy, Odesa), **Melnyk O. M., Doctor of Engineering, Associate Professor** (ORCID: 0000-0001-9228-8459), (Odesa National Maritime University), **Onyshchenko O. A., Doctor of Engineering, Professor** (ORCID: 0000-0002-3766-3188), (National University «Odesa Maritime Academy»), **Ocheretna V. V., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor** (ORCID: 0000-0003-4077-6711), (Odesa National Maritime University)

### **ASSESSMENT OF THE COOLING MODES INFLUENCE AFTER LASER AND PLASMA HARDENING ON THE STRESS-STRAIN STATE OF STRUCTURAL STEELS**

The paper investigates the effect of cooling modes after laser and plasma hardening on the stress-strain state of the surface layers of structural steels. On the basis of analytical modeling, temperature gradients, cooling rate, and physical and mechanical properties of materials were taken into account, which made it possible to determine the nature of the formation of residual compressive stresses. A simplified one-dimensional thermal attenuation equation and thermoelastic integral dependences were used to predict the stress distribution in the thickness of the treated layer. The modeling results showed that during rapid cooling ( $\gamma = 5.0$  1/s), the stresses reach their maximum values in the near-surface region ( $\sim -350$  MPa), with a sharp decrease at a depth of more than 1 mm. Slow cooling ( $\gamma = 1.0$  1/s) provides a more uniform distribution, albeit with lower peak values ( $\sim -150$  MPa), which contributes to increased stability and reduced risk of microcracking. Additionally, the time dynamics of stress accumulation was analyzed and 3D profiles were constructed to visualize critical zones. The proposed model makes it possible to adapt the cooling parameters to specific types of steel and operating conditions, which is of practical importance for parts with complex geometry in aviation, energy, and military equipment. It has been established that optimization of cooling conditions is a critical factor in ensuring the durability and functional reliability of hardened surfaces. The study also proposes an algorithm for assessing the effect of cooling modes on residual stresses, taking into account the heterogeneity of thermal conductivity and temperature sensitivity of

**the coefficient of thermal expansion of steels. A comparative analysis of the effectiveness of laser and plasma hardening under different thermal conditions was carried out, which made it possible to determine the critical cooling modes to avoid thermal cracks and deformations. The obtained results are summarized in the form of compatibility diagrams that can be used in the design of technological hardening maps and the selection of technological parameters for parts of complex shapes.**

***Keywords:* laser hardening; plasma treatment; surface layers; residual stresses; temperature gradients; cooling; mathematical modeling; fatigue strength; wear resistance; structural steel; machine parts; equipment components; functional reliability; technical systems; corrosive environment; transportation load.**