

## ABSTRACT AND REFERENCES

## MATERIALS SCIENCE

DOI: 10.15587/1729-4061.2023.275510

**FEATURES OF STRUCTURE FORMATION WHEN SURFACING STEEL (IRON) ON TITANIUM WITH PLASMA SPRAYED COATINGS IN THE TECHNOLOGY OF OBTAINING BUTT JOINT OF BIMETALLIC PLATES “TITANIUM – STEEL” (p. 6–16)**

**Volodymyr Korzhyk**

E. O. Paton Electric Welding Institute  
of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9106-8593>

**Vladyslav Khaskin**

Guangdong Welding Institute (E. O. Paton Chinese-Ukrainian  
Institute of Welding), Tian He, Guangzhou, China  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3072-6761>

**Oleg Ganushchak**

Foreign Trade of the Chinese-Ukrainian  
of E. O. Paton Institute of Welding LTD, Kyiv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4392-6682>

**Dmytro Strohonov**

E. O. Paton Electric Welding Institute  
of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4194-764X>

**Yevhenii Illiashenko**

E. O. Paton Electric Welding Institute  
of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9876-0320>

**Nataliia Fialko**

Institute of Engineering Thermophysics  
of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0116-7673>

**Chunfu Guo**

Guangdong Welding Institute (E. O. Paton Chinese-Ukrainian  
Institute of Welding), Tian He, Guangzhou, China  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6004-668X>

**Andrii Grynyuk**

E. O. Paton Electric Welding Institute  
of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6088-7980>

**Sviatoslav Peleshenko**

National Technical University of Ukraine  
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6828-2110>

**Aloshyn Andrii**

Foreign Trade of the Chinese-Ukrainian  
of E. O. Paton Institute of Welding LTD, Kyiv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9696-6800>

The object of this study is structural formation during the surfacing of steel (iron) on titanium with plasma-sprayed coatings to obtain a butt connection of titanium-steel bimetallic plates. The task to be solved was to devise a technology for applying a barrier layer between titanium and steel to obtain a defect-free butt joint of the edges of bimetallic sheets of carbon steel, clad with a layer of titanium, under conditions of arc or plasma surfacing of carbon steel on titanium. The application of the barrier layer was carried out by plasma spraying of steel wire or iron

powder. In this case, a coating with a thickness of 150...750  $\mu\text{m}$  was applied on Grade2 titanium, on which 1–2 mm thick layers of materials similar to the sprayed ones were deposited by arc and plasma deposition. It was established that during spraying with subsequent surfacing of steel wire or iron powder, the main technological factors for eliminating cracks in the resulting compound are the thickness of the sprayed coating and the amount of linear surfacing energy. The thickness of the sprayed coating was selected (at least 400...600 microns) followed by plasma surfacing of ER70S-6 steel wire with a diameter of 1.0 mm or CNPC-Fe200 iron powder with unit energy up to ~200...250 J/mm. A defect-free transition layer from titanium to steel was obtained. It is a continuous layer with a thickness of 50–60 microns, consisting of intermetallics FeTi and FeTi<sub>2</sub>, as well as a  $\beta$ -phase titanium with an enhanced iron content, which retains certain ductility without cracks and other defects. With the help of the devised approach for connecting titanium-steel bimetallic edges, it is planned to manufacture seam bimetallic pipes for main pipelines to transport oil and gas raw materials extracted from wells.

**Keywords:** titanium – steel bimetal, multi-pass welding, barrier layer, intermetallic phases, section boundary.

**References**

- Pasang, T., Pramana, S., Kracum, M., Misiolek, W., Aziziderouei, M., Mizutani, M., Kamiya, O. (2018). Characterisation of Intermetallic Phases in Fusion Welded Commercially Pure Titanium and Stainless Steel 304. *Metals*, 8 (11), 863. doi: <https://doi.org/10.3390/met8110863>
- Korzhyk, V., Khaskin, V., Grynyuk, A., Ganushchak, O., Shcheretskiy, V., Peleshenko, S. et al. (2021). Analyzing metallurgical interaction during arc surfacing of barrier layers on titanium to prevent the formation of intermetallics in titanium-steel compounds. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (12 (113)), 69–82. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.240154>
- Cheepu, M., Muthupandi, V., Srinivas, B., Sivaprasad, K. (2017). Development of a Friction Welded Bimetallic Joints Between Titanium and 304 Austenitic Stainless Steel. *Techno-Societal* 2016, 709–717. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-53556-2\\_73](https://doi.org/10.1007/978-3-319-53556-2_73)
- Mo, D., Song, T., Fang, Y., Jiang, X., Luo, C. Q., Simpson, M. D., Luo, Z. (2018). A Review on Diffusion Bonding between Titanium Alloys and Stainless Steels. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018, 1–15. doi: <https://doi.org/10.1155/2018/8701890>
- Liu, D., Wang, W., Zha, X., Jiao, H., Zhao, L., Han, S. (2021). Experimental investigation of butt welded Ti/steel bimetallic sheets by using multi-principal powders as a single filler metal. *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 1499–1512. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.09.004>
- Szymlek, K. (2008). Review of Titanium and Steel Welding Methods. *Advances in Materials Sciences*, 8 (1). doi: <https://doi.org/10.2478/v10077-008-0023-4>
- Chu, Q., Bai, R., Zhang, M., Li, J., Lei, Z., Hu, N. et al. (2017). Microstructure and mechanical properties of titanium/steel bimetallic joints. *Materials Characterization*, 132, 330–337. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2017.08.025>
- Chu, Q., Tong, X., Xu, S., Zhang, M., Yan, F., Cheng, P., Yan, C. (2020). The formation of intermetallics in Ti/steel dissimilar joints welded by Cu-Nb composite filler. *Journal of Alloys and Compounds*, 828, 154389. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.154389>

9. Torbati, A. M., Miranda, R. M., Quintino, L., Williams, S. (2010). Welding bimetal pipes in duplex stainless steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 53 (9-12), 1039–1047. doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-010-2889-7>
10. Petrov, S. V., Korzhik, V. N. (2011). Ustanovka Plazer 80-PL dlya plazmennogo napyleniya. *Svarschik*, 3, 22–26.
11. Korzhik, V. N., Korob, M. F. (2012). Mekhanizirovannaya liniya PLAZER 30PL-W dlya plazmenno-dugovogo provolochnogo napyleniya pokrytiy na krupnogabaritnye detali tipa “val”. *Svarschik*, 4, 13–15.
12. Lunev, V. M., Nemashkalo, O. V. (2010). Adgezionnye kharakteristiki pokrytiy i metody ikh izmereniya. *Fizicheskaya inzheneriya poverkhnosti*, 8 (1), 64–71. Available at: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/98847>
13. Grinyuk, A. A., Korzhik, V. N., Babich, A. A., Tkachuk, V. I., Peleshenko, S. I. (2016). Unifitsirovanniy plazmotron dlya svarki szhatoy dugoy neplayvashchimsya elektrodom. *Tekhnologicheskie sistemy*, 4, 86–89.
14. Korzhik, V. N., Vojtenko, A. N., Peleshenko, S. I., Tkachuk, V. I., Khaskin, V. Yu., Grinyuk, A. A. (2017). Development of automated equipment for manufacturing 3D metal products based on additive technologies. *The Paton Welding Journal*, 2017 (6), 79–85. doi: <https://doi.org/10.15407/tpwj2017.06.15>
15. Okada, A. (1977). Application of Melting Efficiency and its Problems. *Journal of the Japan Welding Society*, 46 (2), 53–61. doi: [https://doi.org/10.2207/qjws1943.46.2\\_53](https://doi.org/10.2207/qjws1943.46.2_53)
16. Dupont, J. N., Marder, A. R. (1995). Thermal Efficiency of Arc Welding Processes. *Welding Journal*, 74, 406s–416s. Available at: [http://files.aws.org/wj/supplement/WJ\\_1995\\_12\\_s406.pdf](http://files.aws.org/wj/supplement/WJ_1995_12_s406.pdf)
17. Fuerschbach, P. W., Knorovsky, G. A. (1991). A Study of Melting Efficiency in Plasma Arc and Gas Tungsten Arc Welding. *Welding Journal*, 70, 287s–297s. Available at: [https://app.aws.org/wj/supplement/WJ\\_1991\\_11\\_s287.pdf](https://app.aws.org/wj/supplement/WJ_1991_11_s287.pdf)
18. Ryabtsev, I. A., Soloviov, V. G., Lankin, Yu. N., Babinets, A. A. (2017). Computer system for automatic control of arc surfacing processes using electrode wires. *The Paton Welding Journal*, 2017 (6), 34–36. doi: <https://doi.org/10.15407/tpwj2017.06.07>
19. Dubovoy, O. M., Karpechenko, A. A., Bobrov, M. M., Gerasin, O. S., Lymar, O. O. (2021). Electric arc spraying of cermet coatings of steel 65G-Tic system. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2, 63–68. doi: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-2/063>

DOI: 10.15587/1729-4061.2023.277252

**SURFACE QUALITY IMPROVEMENT OF STEEL PARTS BY COMBINED LASER-ULTRASONIC TREATMENT: DETERMINATION ALGORITHM OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS (p. 17–26)**

**Dmytro Lesyk**

National Technical University of Ukraine  
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine  
G. V. Kurdyumov Institute for Metal Physics  
of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine  
West Pomeranian University of Technology, Szczecin, Poland  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6919-7409>

**Vitaliy Dzhemelinskyi**

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5797-0134>

**Bohdan Mordiyuk**

G. V. Kurdyumov Institute for Metal Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6025-3884>

**Silvia Martinez**

University of the Basque Country, Zamudio, Spain  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4645-3131>

**Pavlo Kondrashev**

National Technical University of Ukraine  
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7428-710X>

**Dariusz Grzesiak**

West Pomeranian University of Technology, Szczecin, Poland  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6050-708X>

**Yurii Klyuchnikov**

National Technical University of Ukraine  
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1970-6340>

**Aitzol Lamikiz**

University of the Basque Country, Zamudio, Spain  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8477-0699>

To provide the quality of the surface layer and improve operational properties, a combined laser-ultrasonic surface hardening and finishing technology of steel products is proposed. This work is devoted to determining the range of rational parameters of laser heat treatment and ultrasonic impact treatment for enhancing the complex hardening process of AISI 1045 steel and AISI D2 steel. Laser surface transformation hardening was carried out with a constant temperature strategy using a fiber laser and scanning optics at a heating temperature of 1200–1,300 °C and a processing speed of 40–140 mm/min. Ultrasonic surface hardening and finishing were performed on technological equipment with an amplitude of ultrasonic vibration of 18 μm and a load of the ultrasonic tool of 50 N. The ultrasonic treatment duration varied from 60 to 180 s. The results showed that laser-ultrasonic treatment leads to an increase in the hardening intensity by more than 200 %, forming a hardening depth of 200–440 μm. Combined treatment leads to a significant increase in wear resistance due to the formation of ultrafine-grained martensitic microstructure with hardness (58–60 HRC<sub>5</sub>) in the near-surface layer. The combined laser-ultrasonic hardening process control algorithm for surface treatment of structural and tool steels is proposed, limiting the heating temperature, the duration of laser (ultrasonic) exposure, and the vibration amplitudes of the ultrasonic horn. Laser-ultrasonic treatment will allow the formation of a surface layer with a given set of properties, providing increased wear and corrosion resistance. The developed technology can be used for surface hardening and finishing of large-sized steel products in the mechanical engineering industry.

**Keywords:** laser-ultrasonic treatment, AISI 1045 steel, AISI D2 steel, surface hardening.

**References**

1. Roy, S., Zhao, J., Shrotriya, P., Sundararajan, S. (2017). Effect of laser treatment parameters on surface modification and tribological behavior of AISI 8620 steel. *Tribology International*, 112, 94–102. doi: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.03.036>
2. Li, R., Jin, Y., Li, Z., Qi, K. (2014). A Comparative Study of High-Power Diode Laser and CO<sub>2</sub> Laser Surface Hardening of AISI 1045 Steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23 (9), 3085–3091. doi: <https://doi.org/10.1007/s11665-014-1146-x>
3. Kovalenko, V., Zhuk, R. (2004). Systemized approach in laser industrial systems design. *Journal of Materials Processing Technology*, 149 (1-3), 553–556. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.02.020>

4. Ebrahimi, A., Sattari, M., Bremer, S. J. L., Luckabauer, M., Römer, G. R. B. E., Richardson, I. M. et al. (2022). The influence of laser characteristics on internal flow behaviour in laser melting of metallic substrates. *Materials & Design*, 214, 110385. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110385>
5. Idan, A. F. I., Akimov, O., Golovko, L., Goncharuk, O., Kostyk, K. (2016). The study of the influence of laser hardening conditions on the change in properties of steels. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (5 (80)), 69–73. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.65455>
6. Berdnikova, O., Kushnarova, O., Bernatskiy, A., Alekseienco, T., Polovetskiy, Y., Khokhlov, M. (2020). Structure Peculiarities of the Surface Layers of Structural Steel under Laser Alloying. 2020 IEEE 10th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP). doi: <https://doi.org/10.1109/nap51477.2020.9309615>
7. Haskin, V. Y., Bernatskiy, A. V., Siora, O. V., Nikulin, O. T. (2011). Study of influence of conditions of process of laser superficial processing of the loaded steel articles on structure and properties of obtained layers. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, 33, 561–567.
8. Zhu, L., Xue, P., Lan, Q., Meng, G., Ren, Y., Yang, Z. et al. (2021). Recent research and development status of laser cladding: A review. *Optics & Laser Technology*, 138, 106915. doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.106915>
9. Trojan, K., Ocelík, V., Čapek, J., Čech, J., Canelo-Yubero, D., Ganev, N. et al. (2022). Microstructure and Mechanical Properties of Laser Additive Manufactured H13 Tool Steel. *Metals*, 12 (2), 243. doi: <https://doi.org/10.3390/met12020243>
10. Lesyk, D. A., Alnusirat, W., Martinez, S., Dzhemelinskiy, V. V., Mordiyuk, B. N., Lamikiz, A. (2022). Enhancing hardness in overlapping scanner-based laser area of carbon and tool steel by multi-pin ultrasonic impact peening. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, 9 (3), 292–311. doi: <https://doi.org/10.1007/s40516-022-00178-2>
11. Lesyk, D., Hruska, M., Dzhemelinskiy, V., Danyleiko, O., Honner, M. (2022). Selective Surface Modification of Complexly Shaped Steel Parts by Robot-Assisted 3D Scanning Laser Hardening System. *New Technologies, Development and Application V*, 30–36. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-05230-9\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-031-05230-9_3)
12. Radziejewska, J., Skrzypek, S. J. (2009). Microstructure and residual stresses in surface layer of simultaneously laser alloyed and burnished steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 209 (4), 2047–2056. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprot.2008.04.067>
13. Tian, Y., Shin, Y. C. (2007). Laser-assisted burnishing of metals. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47 (1), 14–22. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.03.002>
14. Dzhemelinskiy, V., Lesyk, D., Goncharuk, O., Danyleiko, O. (2018). Surface hardening and finishing of metallic products by hybrid laser-ultrasonic treatment. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (12 (91)), 35–42. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.124031>
15. Lesyk, D., Martinez, S., Mordiyuk, B., Dzhemelinskiy, V., Lamikiz, A. (2021). Wear Characteristics of Carbon and Tool Steels Hardened by Combined Laser-Ultrasonic Surface Treatment. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV*, 62–72. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-77719-7\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-77719-7_7)
16. Kim, C., Park, S., Pyoun, Y., Shim, D. (2021). Effects of Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification on Mechanical Properties of AISI D2 Steel. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 22 (7), 1271–1284. doi: <https://doi.org/10.1007/s12541-021-00536-8>
17. Mao, X., Sun, J., Feng, Y., Zhou, X., Zhao, X. (2019). High-temperature wear properties of gradient microstructure induced by ultrasonic impact treatment. *Materials Letters*, 246, 178–181. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.03.059>
18. Hu, X., Qu, S., Chen, Z., Zhang, P., Lu, Z., Lai, F. et al. (2022). Rolling contact fatigue behaviors of 25CrNi2MoV steel combined treated by discrete laser surface hardening and ultrasonic surface rolling. *Optics & Laser Technology*, 155, 108370. doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.108370>
19. Lesyk, D., Martinez, S., Mordiyuk, B., Dzhemelinskiy, V., Danyleiko, O. (2019). Effects of the Combined Laser-Ultrasonic Surface Hardening Induced Microstructure and Phase State on Mechanical Properties of AISI D2 Tool Steel. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II*, 188–198. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_19)
20. Lesyk, D., Martinez, S., Mordiyuk, B., Dzhemelinskiy, V., Danyleiko, O. (2018). Combined Laser-Ultrasonic Surface Hardening Process for Improving the Properties of Metallic Products. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing*, 97–107. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-93587-4\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-319-93587-4_11)
21. Lesyk, D. A., Mordiyuk, B. N., Martinez, S., Iefimov, M. O., Dzhemelinskiy, V. V., Lamikiz, A. (2020). Influence of combined laser heat treatment and ultrasonic impact treatment on microstructure and corrosion behavior of AISI 1045 steel. *Surface and Coatings Technology*, 401, 126275. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126275>
22. Santhanakrishnan, S., Kong, F., Kovacevic, R. (2012). An experimentally based thermo-kinetic phase transformation model for multi-pass laser heat treatment by using high power direct diode laser. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 64 (1-4), 219–238. doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4029-z>
23. Lv, Y., Lei, L., Sun, L. (2015). Effect of shot peening on the fatigue resistance of laser surface melted 20CrMnTi steel gear. *Materials Science and Engineering: A*, 629, 8–15. doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.01.074>
24. Wang, Z., Jiang, C., Gan, X., Chen, Y., Ji, V. (2011). Influence of shot peening on the fatigue life of laser hardened 17-4PH steel. *International Journal of Fatigue*, 33 (4), 549–556. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2010.10.010>
25. Danyleiko, O., Dzhemelinskiy, V., Lesyk, D. (2021). Increasing wear and corrosion resistance of steel products by combined laser thermomechanical treatment. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (1 (114)), 72–80. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.247552>
26. Souza, P. S., Cangussu, V. M., Câmara, M. A., Abrão, A. M., Denkena, B., Breidenstein, B., Meyer, K. (2020). Formation of White Etching Layers by Deep Rolling of AISI 4140 Steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 29 (7), 4351–4359. doi: <https://doi.org/10.1007/s11665-020-04988-3>
27. Liu, C., Lin, C., Liu, W., Wang, S., Chen, Y., Wang, J., Wang, J. (2021). Effects of local ultrasonic impact treatment on residual stress in an engineering-scale stainless steel pipe girth weld. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 192, 104420. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2021.104420>

DOI: 10.15587/1729-4061.2023.277756

**ANALYSIS OF TECHNOLOGICAL POSSIBILITIES OF N-O-C-H SYSTEM ARC PLASMA IN SURFACE ENGINEERING PROCESSES (p. 27–34)**

**Valeriy Pashchenko**

National Technical University of Ukraine  
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3742-6913>

The object of this study was the substances that could be used to generate arc plasma. Conventional and promising plasma media were analyzed in order to identify the most universal one in terms

of a set of properties for efficient energy transfer of material. It is shown that the mean-enthalpy media have a harmonious ratio of temperature and enthalpy and could provide a change in the energy state of the processed material with maximum efficiency. It is established that the most universal set of properties is demonstrated by the medium enthalpy plasma of the N-O-C-H system. The use of mixtures of air with hydrocarbons for its generation makes it possible to reach the average mass temperature of  $(5..7) \cdot 10^3$  K and change the oxidative-reducing potential of the plasma medium over a wide range. Given this, heat treatment is possible with maximum preservation of the original composition of the material. Experimental studies of plasma flows of the N-O-C-H system confirmed the presence of reducing components capable of binding oxygen to air that is sucked into the jet. On rich mixtures, the oxygen content in the jet at a distance of 100 mm does not exceed 5 %.

The positive effect of combined energy input into plasma-forming substance on the process of generation and formation of plasma jet has been proven. The use of energy of different physical nature makes it possible to maintain the local energy parameters of the plasma flow during material processing. This is due to the release of additional heat as a result of the interaction of plasma and plasma components with ambient air. The use of plasma of the N-O-C-H system in surface engineering technologies could expand the range of processed materials and reduce the operating costs of the process.

**Keywords:** plasma-forming substance, plasma of the N-O-C-H system, reducing components of plasma, oxidative-reducing potential.

#### References

- External atmospheric plasma. Available at: [https://www.oerlikon.com/metco/en/products-services/thermal-spray-equipment/thermal-spray-components/spray-guns/plasma/?tab=external\\_atmospheric\\_plasma](https://www.oerlikon.com/metco/en/products-services/thermal-spray-equipment/thermal-spray-components/spray-guns/plasma/?tab=external_atmospheric_plasma)
- Samal, S., Blanco, I. (2022). An Overview of Thermal Plasma Arc Systems for Treatment of Various Wastes in Recovery of Metals. *Materials*, 15 (2), 683. doi: <https://doi.org/10.3390/ma15020683>
- Babu, A., Dzhurinskiy, D., Dautov, S., Shornikov, P. (2023). Structure and electrochemical behavior of atmospheric plasma sprayed  $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$  cermet composite coatings. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 111, 106105. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jrmhm.2023.106105>
- Atmospheric Plasma Spray Solutions. Available at: [https://smsbttim.com/wp-content/uploads/2016/08/Plasma\\_Solutions\\_EN5.pdf](https://smsbttim.com/wp-content/uploads/2016/08/Plasma_Solutions_EN5.pdf)
- Plasma. Equipment Solutions. Available at: <https://www.praxairsurface-technologies.com/-/media/corporate/praxairsurface/us/documents/brochures/plasma-brochure.pdf?la=en>
- Lynam, A., Rincon Romero, A., Xu, F., Bai, M., Hussain, T. (2022). Atmospheric Plasma Spraying of Environmental Barrier Coatings – A Parametric Study. *Thermal Spray 2022: Proceedings from the International Thermal Spray Conference*. doi: <https://doi.org/10.31399/asm.cp.itsc2022p0001>
- Borysov, Yu. S., Borysova, A. L., Vigilyanska, N. V., Gryshchenko, O. P., Kolomytsev, M. V. (2020). Coatings based on Fe–Al intermetallics produced by the methods of plasma and supersonic plasma gas-air spraying. *The Paton Welding Journal*, 2020 (7), 29–37. doi: <https://doi.org/10.37434/tpwj2020.07.04>
- Korzhyk, V. M., Khaskin, V. Yu., Yuhui, Y., Demianov, O. I., Strogonov, D. V., Shcheretskiy, V. O. (2022). Influence of accompanying compressing air flow on the coating structure and properties in plasma-arc spraying by consumable current-conducting wire. *The Paton Welding Journal*, 2022 (2), 3–10. doi: <https://doi.org/10.37434/tpwj2022.02.01>
- Pashchenko, V. M. (2018). *Duhovi heneratory v tekhnolohiyakh inzheneriyi poverkhni*. Kharkiv: Machulin, 288.
- Khasuy, A. (1975). *Tekhnika napyleniya*. Moscow: Mashinostroenie, 288.
- Bondarenko, B. I. (1980). *Vosstanovlenie okislov metallov v slozhnykh gazovykh sistemakh*. Kyiv: Naukova dumka, 385.
- Pashchenko, V. (2017). Research into the energy conversion processes in hybrid plasma devices for applying the coatings. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (5 (86)), 44–51. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.95578>

DOI: 10.15587/1729-4061.2023.276835

#### IDENTIFYING REGULARITIES OF HIGH TEMPERATURE ON CONSTANT AND VARIABLE FATIGUE LIFE OF AA7075- $\text{Al}_2\text{O}_3$ NANOCOMPOSITE FABRICATED BY STIR CASTING METHOD (p. 35–41)

Muzher Taha Mohamed

University of Diyala, Baqubeh, Diyala, Iraq  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3059-065X>

Rawa A. Helal

University of Technology, Baghdad, Iraq  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6340-2862>

Sami A. Nawi

University of Diyala, Baqubeh, Diyala, Iraq  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0239-2859>

Hussain Jasim Alalkawi

Bilad Alrafidain University College, Baqubeh, Diyala, Iraq  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8718-1937>

Ahmed AAG Al-ruba'iy

University of Diyala, Baqubeh, Diyala, Iraq  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3331-321X>

This study aims to determine the effect of high temperature on the fatigue life of AA7075- $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanocomposites (6 wt %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) fabricated by stir casting. The research problem is to determine the durability, fatigue resistance, and mechanical properties of the nanocomposite under constant and variable loading conditions at elevated temperatures, as well as to identify changes in its behavior due to exposure to high temperatures. The results show that higher temperatures have a big effect on the nanocomposite's fatigue performance under both loading conditions. When the material was tested at a high temperature (150 °C) with an extra 6 wt %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , the ultimate tensile strength and yield stress both went up by 16 % and 15.7 %, respectively. Its fatigue life was also successfully tested under both variable and constant amplitude load conditions. The interpretation of the results suggests that the changes in the microstructure of the nanocomposite material at elevated temperatures lead to an increase in dislocation density and grain size, resulting in an improvement in its mechanical properties. The findings can be utilized to optimize the nanocomposite fabrication process and enhance its fatigue resistance at high temperatures. In addition, the results can be used to enhance the design of aerospace components and high-temperature engines that require materials with excellent fatigue resistance at elevated temperatures. In summary, the investigation of the effect of high temperature on the constant and variable fatigue lives of AA7075- $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanocomposite provides valuable insight into the material's mechanical properties. The findings contribute to the development of materials that can withstand high-temperature conditions, which has implications for a variety of industries.

**Keywords:** AA7075, ceramic particles  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , mechanical properties, fatigue characterizations, high temperature.



## References

- Aynalem, G. F. (2020). Processing Methods and Mechanical Properties of Aluminium Matrix Composites. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020, 1–19. doi: <https://doi.org/10.1155/2020/3765791>
- Hussain, F., Abdullah, S., Nuawi, M. Z. (2016). Effect of temperature on fatigue life behaviour of aluminium alloy AA6061 using analytical approach. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 10 (3), 2324–2335. doi: <https://doi.org/10.15282/jmes.10.3.2016.10.0216>
- RaviKumar, M., Reddappa, H. N., Suresh, R. (2018). Mechanical and Wear behavior of Al7075/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC Hybrid Composite. *Materials Today: Proceedings*, 5 (2), 5573–5579. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.12.148>
- Abed, R. M., Khenyab, A. Y., Alalkawi, H. J. M. (2021). Development in mechanical and fatigue properties of AA6061/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocomposites under stirring temperature (ST). *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (12 (112)), 47–52. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.238588>
- Winter, L., Hockauf, K., Lampke, T. (2018). Temperature and Particle Size Influence on the High Cycle Fatigue Behavior of the SiC Reinforced 2124 Aluminum Alloy. *Metals*, 8 (1), 43. doi: <https://doi.org/10.3390/met8010043>
- Al-Mushehdany, A. M., Yahya, M. M., Hmood, B. K., Alalkawi, H. J. M. (2022). Using modern concepts in the design of extrusion dies to improve the mechanical extrusion and fatigue properties for AA1100. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (12 (119)), 31–37. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.265712>
- Bharath, V., Ashita, D. H., Auradi, V., Nagaral, M. (2020). Influence of variable particle size reinforcement on mechanical and wear properties of alumina reinforced 2014Al alloy particulate composite. *FME Transactions*, 48 (4), 968–978. doi: <https://doi.org/10.5937/fme2004968b>
- Mahdi, H. S., Alalkawi, H. J., Mohamed, M. T., Faris, S. T. (2022). Evaluation of creep-fatigue life and strength for AA7001-T6 under constant amplitude loading. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (12 (118)), 22–28. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263344>
- Radha Krishnan, B., Theerkka Tharisanan, R., Arumuga Prabu, V., Immanuel, P., Ramakrishnan, A. (2022). Experimental investigation of mechanical properties of Al7075-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-B4C composite via stir route. *Materials Today: Proceedings*, 64, 1721–1724. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.498>
- Zahra, H. S. (2017). The effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nano materials on fatigue behavior of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nano materials on fatigue behavior of 7075Al-alloy. Al. Mustansiriahah University.
- Fadhel, E. Z. (2018). Effect of the Elevated Temperature on Fatigue Behavior of Aluminum Alloy AA 7075. *Journal of University of Babylon for Engineering Sciences*, 26 (8), 256–264. Available at: <https://www.journalofbabylon.com/index.php/JUBES/article/view/1630>
- Allawi, H. Al., Hatem, K., Driss, Z., Alalkawi, H. J. M. (2023). Safe fatigue life model for AA2024-T4 and AA2024-T361 under combined high temperature and shot peening. *Cyrved and Layered Structures*.
- Adil, A. N., Alasadi, A. A., Alalkawi, H. J. M. (2023). Effect of nano particle size on mechanical and fatigue behaviour of TiO<sub>2</sub> particulate reinforced aluminum alloy composites. *IJNE*, 16 (3).
- ASTM B221-14. Standard Specification For Aluminum And Aluminum-Alloy Extruded Bars, Rods, Wire, Profiles, And Tubes. Available at: <https://webstore.ansi.org/standards/astm/astmb22114>
- Ghdhban, T. Y. (2020). Design and Modification of a computerized tensile test machine at high temperature. University of Technology.
- Designation: E8/E8M – 09 Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. Available at: [https://www.academia.edu/14298711/Designation\\_E8\\_E8M\\_09\\_Standard\\_Test\\_Methods\\_for\\_Tension\\_Testing\\_of\\_Metallic\\_Materials](https://www.academia.edu/14298711/Designation_E8_E8M_09_Standard_Test_Methods_for_Tension_Testing_of_Metallic_Materials)

DOI: 10.15587/1729-4061.2023.276746

**DEVELOPMENT OF A TECHNOLOGY TO PRODUCE TITANIUM POWDER WITH A LOW CARBON FOOTPRINT (p. 42–54)**
**Andrii Gonchar**VELTA RD TITAN LLC, Dnipro, Ukraine  
RD Titan Group Ltd, vil. Solonka, UkraineORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6873-5677>**Viktor Troshchylo**VELTA RD TITAN LLC, Dnipro, Ukraine  
RD Titan Group Ltd, vil. Solonka, UkraineORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4216-5949>**Andriy Brodskyy**

VELTA HOLDING US INC, Wilmington, New Castle, USA

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5455-8040>**Volodymyr Yarovynskyy**

Titanera LLC, Dnipro, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9923-8219>**Oleksandr Chukhmanov**

VELTA RD TITAN LLC, Dnipro, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1050-2090>

This paper reports the analysis of modern technologies for the production of titanium from oxide raw materials. It has been established that current industrial methods for producing titanium require the use of carbon as a reducing agent and, accordingly, cannot decrease carbon emissions without changing the technology. That is why devising a technology for producing titanium with a reduction in emissions of carbon components is a relevant task. So, the object of research is the technology of obtaining titanium from its oxide without the use of carbon components. It was found that an integrated approach to the preparation of raw materials and the separation of reduction processes with the successive use of two types of reducing agents – magnesium and calcium, made it possible to create an effective process for producing titanium without the use of carbon reducing agents. The influence of calcium and magnesium chlorides as promoters of the reduction process was revealed. Experimental studies have established that the shape and density of raw materials significantly affect the efficiency of the reduction process by streamlining the reducing agent flows and reaction products in the furnace charge. The established regularities made it possible to improve the process of reduction of titanium oxide to obtain samples of titanium powders with an oxygen content of 0.17 %, which corresponds to international standards for titanium alloys and powders. Additional plasma treatment made it possible to obtain materials that were suitable for additive processes in all respects. A systematic approach to the utilization of reaction products made it possible to devise a technological scheme in which all possible waste is either returned to the technological process after treatment or processed into marketable products. Based on the results of the study, a technological scheme for obtaining powders of titanium alloys from titanium oxide by complex reduction in two stages – magnesium and calcium – was developed. The proposed scheme involves standard metallurgical processes and is brought to standard processes and equipment of metallurgical enterprises and chemical industry.

In terms of practical significance, the results of this work could be used in the development of industrial technology to produce titanium from titanium dioxide without the use of carbon components.

**Keywords:** titanium powders, titanium dioxide, dendrite, titanium deoxidation, carbon footprint, reduction.

## References

- Williams, J. C., Boyer, R. R. (2020). Opportunities and Issues in the Application of Titanium Alloys for Aerospace Components. *Metals*, 10 (6), 705. doi: <https://doi.org/10.3390/met10060705>
- Liu, S., Song, X., Xue, T., Ma, N., Wang, Y., Wang, L. (2020). Application and development of titanium alloy and titanium matrix composites in aerospace field. *Journal of Aeronautical Materials*, 2020, 40 (3), 77–94. doi: <https://doi.org/10.11868/j.issn.1005-5053.2020.000061>
- Haider, A. J., Jameel, Z. N., Al-Hussaini, I. H. M. (2019). Review on: Titanium Dioxide Applications. *Energy Procedia*, 157, 17–29. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.159>
- Chen, M. C., Koh, P. W., Ponnusamy, V. K., Lee, S. L. (2022). Titanium dioxide and other nanomaterials based antimicrobial additives in functional paints and coatings: Review. *Progress in Organic Coatings*, 163, 106660. doi: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2021.106660>
- Adams, R. (2022). Thirtieth anniversary conference: TiO<sub>2</sub> & colour pigments in amsterdam. *Focus on Pigments*, 2022 (11), 1–4. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fop.2022.10.001>
- Kapustyan, A. Y., Ovchinnikov, A. V., Yanko, T. B. (2018). Sintered titanium alloys for nuclear industry. *Questions of atomic science and technology*, 1 (113), 134–141. Available at: [https://vant.kipt.kharkov.ua/ARTICLE/VANT\\_2018\\_1/article\\_2018\\_1\\_134.pdf](https://vant.kipt.kharkov.ua/ARTICLE/VANT_2018_1/article_2018_1_134.pdf)
- Baltatu, M. S., Tugui, C. A., Perju, M. C., Benchea, M., Spataru, M. C., Sandu, A. V., Vizureanu, P. (2019). Biocompatible titanium alloys used in medical applications. *Revista de Chimie*, 70 (4), 1302–1306. doi: <https://doi.org/10.37358/RC.19.4.7114>
- Taşdemir, A., Nohut, S. (2021). An overview of wire arc additive manufacturing (WAAM) in shipbuilding industry. *Ships and Offshore Structures*, 16 (7), 797–814. doi: <https://doi.org/10.1080/17445302.2020.1786232>
- Li, M., Pan, Y., Zou, Y. (2021). Application and optimization design of Titanium alloy in sports equipment. *Journal of Physics: Conference Series*, 1820. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1820/1/012011>
- Zhang, L.-C., Chen, L.-Y. (2019). A review on biomedical titanium alloys: recent progress and prospect. *Advanced Engineering Materials*, 21 (4), 1801215. doi: <https://doi.org/10.1002/adem.201801215>
- Froes, F. H., Qian, M., Niinomi, M. (Eds.) (2019). *Titanium for Consumer Applications: Real-World Use of Titanium*. Elsevier.
- Mohr, W. (2010). *Assessment of Structural Integrity of Titanium Weldments for U.S. Navy Applications*. Singapore. doi: [https://doi.org/10.3850/978-981-08-5118-7\\_070](https://doi.org/10.3850/978-981-08-5118-7_070)
- Yimeng, F., Wenhua, W., Xun, G., Yadong, L., Xiaozhou, Z., Qingyan, M. et al. (2021). Characteristics, Connotation and Military Application of Additive Remanufacturing Technology. *Journal of Physics: Conference Series*, 1948 (1), 012118. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1948/1/012118>
- Fang, Z. Z., Paramore, J. D., Sun, P., Chandran, K. R., Zhang, Y., Xia, Y. et al. (2018). Powder metallurgy of titanium – past, present, and future. *International Materials Reviews*, 63 (7), 407–459. doi: <https://doi.org/10.1080/09506608.2017.1366003>
- Behera, M. P., Dougherty, T., Singamneni, S. (2019). Conventional and Additive Manufacturing with Metal Matrix Composites: A Perspective. *Procedia Manufacturing*, 30, 159–166. doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.023>
- Zhang, T., Liu, C.-T. (2021). Design of titanium alloys by additive manufacturing: A critical review. *Advanced Powder Materials*, 1 (1), 100014. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apmate.2021.11.001>
- Denkena, B., Jacob, S. (2015). Approach for increasing the resource efficiency for the production process of titanium structural components. *Procedia CIRP*, 35, 45–49. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.08.054>
- Xin, S., Zhang, J., Mao, X., Zhao, Y., Hong, Q. (2019). Research and Development of Low-cost Titanium Alloys. *Journal of Physics: Conference Series*, 1347 (1), 012022. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1347/1/012022>
- Reddy, R. G., Shinde, P. S., Liu, A. (2021). Review – The Emerging Technologies for Producing Low-Cost Titanium. *Journal of The Electrochemical Society*, 168 (4), 042502. doi: <https://doi.org/10.1149/1945-7111/abe50d>
- Titanium Manufacturing Process. Available at: [https://www.osakati.co.jp/e/e\\_product/titan/](https://www.osakati.co.jp/e/e_product/titan/)
- Doblin, C., Chryss, A., Monch, A. (2012). Titanium powder from the TiRO™ process. *Key Engineering Materials*, 520, 95–100. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.520.95>
- van Vuuren, D. S. (2015). Direct titanium powder production by metallothermic processes. *Titanium Powder Metallurgy*, 69–93. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800054-0.00005-8>
- Hansen, D. A., Gerdemann, S. J. (1998). Producing titanium powder by continuous vapor-phase reduction. *JOM*, 50 (11), 56–58. doi: <https://doi.org/10.1007/s11837-998-0289-3>
- Chen, W., Yamamoto, Y., Peter, W. H. (2010). Investigation of pressing and sintering processes of CP-Ti powder made by Armstrong Process. *Key Engineering Materials*, 436, 123–130. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.436.123>
- El Khalloufi, M., Drevelle, O., Soucy, G. (2021). Titanium: An Overview of Resources and Production Methods. *Minerals*, 11, 1425. doi: <https://doi.org/10.3390/min11121425>
- Zhang, Y., Fang, Z. Z., Xia, Y., Huang, Z., Lefler, H., Zhang, T. et al. (2016). A novel chemical pathway for energy efficient production of Ti metal from upgraded titanium slag. *Chemical Engineering Journal*, 286, 517–527. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.10.090>
- Zhang, Y., Fang, Z. Z., Sun, P., Zheng, S., Xia, Y., Free, M. (2017). A perspective on thermochemical and electrochemical processes for titanium metal production. *JOM*, 69, 1861–1868. doi: <https://doi.org/10.1007/s11837-017-2481-9>
- Noguchi, H., Natsui, S., Kikuchi, T., Suzuki, R. O. (2018). Reduction of CaTiO<sub>3</sub> by electrolysis in the molten salt CaCl<sub>2</sub>-CaO. *Electrochemistry*, 86 (2), 82–87. doi: <https://doi.org/10.5796/electrochemistry.17-00078>
- Yanko, T. B., Ovchinnikov, A. V., Lyutyk, N. P., Korzhyk, V. N. (2018). Technology for obtaining of plasma spheroidised HDH titanium alloy powders used in 3D printing. *Technological systems*, 85/4. doi: <https://doi.org/10.29010/085.7>
- Karaca, A., Sermond, B., Wilfing, G. (2008). Pat. No. US UA102387C2. Method for manufacturing alloy powders based on titanium, zirconium and hafnium, alloyed with elements Ni, Cu, Ta, W, Re, Os, and Ir. Available at: <https://patents.google.com/patent/UA102387C2/en>
- Buttner, G., Domazer, H.-G., Eggert, H. (1980). Pat. No. US 4373947A. Process for the preparation of alloy powders which can be sintered and which are based on titanium. Available at: <https://patents.google.com/patent/US4373947A/de>
- Moxson, V. S., Duz, V. A., Klevtsov, A. G., Sukhoplyuyev, V. D., Sopka, M. D., Shuvalov, Y. V., Matviychuk, M. (2012). Pat. No. US9067264B2. Method of manufacturing pure titanium hydride powder and alloyed titanium hydride powders by combined hydrogen-magnesium reduction of metal halides.
- Abayaweera, G., Amaratunga, G., Fernando, N., Karunaratne, V., Kottegoda, N., Ekanayake, R. (2016). Pat. No. US 10316391B2. Method of producing titanium from titanium oxides through magnesium vapour reduction. Available at: <https://patents.google.com/patent/US10316391B2/en>
- Bolivar, R., Friedrich, B. (2019). Magnesiothermic Reduction from Titanium Dioxide to Produce Titanium Powder. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 5 (2), 219–229. doi: <https://doi.org/10.1007/s40831-019-00215-z>
- Bolivar, R., Friedrich, B. (2009). Synthesis of titanium via magnesiothermic reduction of TiO<sub>2</sub> (Pigment). *Proceedings - Eu-*

- ropean Metallurgical Conference. doi: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.11374.61760>
36. Kharytonov, V. M., Kharytonov, V. N., Kharytonov, D. V. (2020). Osoblyvosti khimichnoho skladu ilmenitu.
  37. Brodskyy, A., Troshchyllo, V., Gonchar, A., Chukhmanov, O., Romanov, R. (2022). US Pat. No. 11440096 B2.
  38. Brodskyy, A., Troshchyllo, V., Gonchar, A., Chukhmanov, O., Romanov, R. (2022). WO 2022/046020/A1.
  39. Mineral commodity summaries 2020. doi: <https://doi.org/10.3133/mcs2020>
  40. Cardarelli, F. (2008). Materials handbook: a concise desktop reference. Springer. doi: <https://doi.org/10.1007/978-1-84628-669-8>
  41. Ito, M., Morita, K. (2004). The solubility of MgO in molten MgCl<sub>2</sub>-CaCl<sub>2</sub> salt. Materials transactions, 45 (8), 2712–2718. doi: <https://doi.org/10.2320/matertrans.45.2712>
  42. Chen, G. Z., Fray, D. J., Farthing, T. W. (2000). Direct electrochemical reduction of titanium dioxide to titanium in molten calcium chloride. Nature, 407 (6802), 361–364. <https://doi.org/10.1038/35030069>
  43. Dring, K. (2006). Electrochemical Reduction of Titanium Dioxide in Molten Calcium Chloride. Available at: <http://hdl.handle.net/10044/1/8135>
  44. Suzuki, R. O., Natsui, S., Kikuchi, T. (2020). OS process. Extractive Metallurgy of Titanium, 287–313. doi: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-817200-1.00012-0>
  45. Suzuki, R. O. (2005). Calciothermic reduction of TiO<sub>2</sub> and in situ electrolysis of CaO in the molten CaCl<sub>2</sub>. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 66 (2-4), 461–465. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2004.06.041>
  46. Fray, D. J., Chen, G. Z. (2001). The use of electro-deoxidation to reduce titanium dioxide and other metal oxides. Proceedings of the Fourth International Conference on Materials Engineering for Resources. Available at: <https://nottingham-repository.worktribe.com/output/3214612>
  47. Ono, K., Okabe, T., Ogawa, M., Suzuki, R. (1990). Production of titanium powders by the calciothermic reduction of TiO<sub>2</sub>. Tetsu-to-Hagane, 76 (4), 568–575. doi: [https://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.76.4\\_568](https://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.76.4_568)
  48. Sittig, C., Textor, M., Spencer, N. D., Wieland, M., Vallotton, P. H. (1999). Surface characterization. Journal of Materials Science: Materials in Medicine, 10 (1), 35–46. doi: <https://doi.org/10.1023/a:1008840026907>
  49. Prando, D., Brenna, A., Diamanti, M. V., Beretta, S., Bolzoni, F., Ormellese, M., Pedferri, M. (2017). Corrosion of titanium: Part 2: Effects of surface treatments. Journal of Applied Biomaterials & Functional Materials, 16 (1), 3–13. doi: <https://doi.org/10.5301/jabfm.5000396>
  50. Fuentes, E., Alves, S., López-Ortega, A., Mendizabal, L., Sáenz de Viteri, V. (2019). Advanced Surface Treatments on Titanium and Titanium Alloys Focused on Electrochemical and Physical Technologies for Biomedical Applications. Biomaterial-Supported Tissue Reconstruction or Regeneration. doi: <https://doi.org/10.5772/intechopen.85095>

DOI: 10.15587/1729-4061.2023.277914

**DETERMINATION OF THE BALLISTIC PERFORMANCE RAMIE-FIBER-REINFORCED EPOXY COMPOSITE-SiC CERAMIC IN MULTILAYERED ARMOR SYSTEM (p. 55–64)**

**Alaya Fadllu Hadi Mukhammad**

Diponegoro University, Tembalang, Semarang, Indonesia  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9810-4427>

**Rusnaldy**

Diponegoro University, Tembalang, Semarang, Indonesia  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4540-2890>

**Rifky Ismail**

Diponegoro University, Tembalang, Semarang, Indonesia  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0445-3405>

**Tri Widodo Besar Riyadi**

Universitas Muhammadiyah Surakarta,  
Pabelan Kartasura Surakarta, Jawa Tengah, Indonesia  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3809-0035>

Multilayered Armor System (MAS) is being extensively studied around the world for its ability to retain ceramic fragmentation after a collision occurs. MAS consist of a ceramic layer placed at the front and supported by a composite layer of ramie-fiber-reinforced epoxy resin. Present study utilizes natural fibers of 50 % ramie fibers with epoxy resin as the matrix and Silicon Carbide (SiC) ceramic as the front panel. The ballistic testing in this study used 7.62×51 mm NATO Ball projectile with a firing distance of 15 m from the bullet panel. The velocity of projectile was detected using LIGHT SCREEN B471 type. The aim of the study is to conclude the optimal thickness of ramie fiber-epoxy and SiC ceramics MAS structure based on experiments which can withstand 7.62 NATO ball bullet penetration. To achieve this aim, the following objectives are accomplished: study the effect of SiC ceramic addition to ramie composite on BFS and study the effect of SiC ceramic addition to ramie composite on failure mode. Results show that the addition of the number of layers of SiC increases resistance of ballistic MAS marked by a decrease in the value of BFS clay. The 5SiC+10R is the optimal thickness in resisting the penetration of 7.62×51 mm bullets with 12 mm BFS clay. Failure phenomena found in this study were projectile fragments, matrix cracks, radial cracks, impact points, and ceramic fragments. Matrix crack formation appears on 5SiC+10R with mini deformation in rear side. Phenomenon of ceramic fragmentation in the shot causes the MAS structure to be damaged, so that the ramie fiber composite layer will face the bullet directly if it is subjected to a second shot. Ultra High Hardness Armor (UHHA) as first layer on the MAS structure is an attractive option for further research.

**Keywords:** ballistic performance study, multilayered armor system, SiC, ramie, back face signature.

**References**

1. Chabera, P., Boczkowska, A., Morka, A., Kędzierski, P., Niezgodna, T., Oziębło, A., Witek, A. (2015). Comparison of numerical and experimental study of armour system based on alumina and silicon carbide ceramics. Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences, 63 (2), 363–367. doi: <https://doi.org/10.1515/bpasts-2015-0040>
2. Crouch, I. G. (2019). Body armour – New materials, new systems. Defence Technology, 15 (3), 241–253. doi: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2019.02.002>
3. Medvedovski, E. (2010). Ballistic performance of armour ceramics: Influence of design and structure. Part 1. Ceramics International, 36 (7), 2103–2115. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2010.05.021>
4. Louro, L. H. L., Meyers, M. A. (1989). Effect of stress state and microstructural parameters on impact damage of alumina-based ceramics. Journal of Materials Science, 24 (7), 2516–2532. doi: <https://doi.org/10.1007/bf01174523>
5. Odesanya, K. O., Ahmad, R., Jawaid, M., Bingol, S., Adebayo, G. O., Wong, Y. H. (2021). Natural Fibre-Reinforced Composite for Ballistic Applications: A Review. Journal of Polymers and the Environment, 29 (12), 3795–3812. doi: <https://doi.org/10.1007/s10924-021-02169-4>
6. Monteiro, S. N., Milanezi, T. L., Louro, L. H. L., Lima, É. P., Braga, F. O., Gomes, A. V., Drelich, J. W. (2016). Novel ballistic ramie fabric composite competing with Kevlar™ fabric in multilayered armor. Materials & Design, 96, 263–269. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.02.024>

7. Nurhadiyanto, D., Mujiyono, Mukhammad, A. F. H., Setyoko, M. B., bin Yahya, M. Y., Riyadi, T. W. B. (2021). Drop test resistance on ramie fiber bulletproof panels based on harvest time and fiber treatment of ramie. *Composites: Mechanics, Computations, Applications: An International Journal*, 12 (1), 1–16. doi: <https://doi.org/10.1615/compmechcomputappltj.2020035788>
8. Marsyahyo, E., Jamasri, Heru Santoso Budi Rochardjo, Soekrisno (2009). Preliminary Investigation on Bulletproof Panels Made from Ramie Fiber Reinforced Composites for NIJ Level II, IIA, and IV. *Journal of Industrial Textiles*, 39 (1), 13–26. doi: <https://doi.org/10.1177/1528083708098913>
9. Mukhammad, A. F. H., Murni, Mujiyono, Nurhadiyanto, D., Hassan, S. A., Riyadi, T. W. B. (2020). Preliminary study of fragment simulating projectile on epoxy-ramie composite. *Journal of Physics: Conference Series*, 1446 (1), 012001. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1446/1/012001>
10. Neves Monteiro, S., Salgado de Assis, F., Ferreira, C., Tonini Simonassi, N., Pondé Weber, R., Souza Oliveira, M. et al. (2018). Fique Fabric: A Promising Reinforcement for Polymer Composites. *Polymers*, 10 (3), 246. doi: <https://doi.org/10.3390/polym10030246>
11. Assis, F. S. de, Pereira, A. C., Filho, F. da C. G., Lima, É. P., Monteiro, S. N., Weber, R. P. (2018). Performance of jute non-woven mat reinforced polyester matrix composite in multilayered armor. *Journal of Materials Research and Technology*, 7 (4), 535–540. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.05.026>
12. Braga, F. de O., Bolzan, L. T., Luz, F. S. da, Lopes, P. H. L. M., Lima Jr., É. P., Monteiro, S. N. (2017). High energy ballistic and fracture comparison between multilayered armor systems using non-woven curaua fabric composites and aramid laminates. *Journal of Materials Research and Technology*, 6 (4), 417–422. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2017.08.001>
13. Nascimento, L. F. C., Louro, L. H. L., Monteiro, S. N., Lima, É. P., da Luz, F. S. (2017). Mallow Fiber-Reinforced Epoxy Composites in Multilayered Armor for Personal Ballistic Protection. *JOM*, 69 (10), 2052–2056. doi: <https://doi.org/10.1007/s11837-017-2495-3>
14. Neves Monteiro, S., de Oliveira Braga, F., Pereira Lima, E., Henrique Leme Louro, L., Wieslaw Drelich, J. (2016). Promising curaua fiber-reinforced polyester composite for high-impact ballistic multilayered armor. *Polymer Engineering & Science*, 57 (9), 947–954. doi: <https://doi.org/10.1002/pen.24471>
15. Hu, D., Zhang, Y., Shen, Z., Cai, Q. (2017). Investigation on the ballistic behavior of mosaic SiC/UHMWPE composite armor systems. *Ceramics International*, 43 (13), 10368–10376. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.05.071>
16. Product categories: SiC ceramics. Sancera. Available at: [https://www.china-sancera.com/?products\\_9/](https://www.china-sancera.com/?products_9/)
17. Flores-Johnson, E. A., Saleh, M., Edwards, L. (2011). Ballistic performance of multi-layered metallic plates impacted by a 7.62-mm APM2 projectile. *International Journal of Impact Engineering*, 38 (12), 1022–1032. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2011.08.005>
18. Kumar, S., Malek, A., Babu, R., Mathur, S. (2021). Ballistic Efficiency of Multilayered Armor System Reinforced with Jute-Kevlar Epoxy Composite against High-Energy Steel Core Projectile. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30 (11), 8447–8464. doi: <https://doi.org/10.1007/s11665-021-06057-9>
19. Gupta, J. K. (2018). Salient features of Indian Standard on Bullet resistant jackets (IS 17051:2018). Available at: <https://fikki.in/events/24084/ISP/BRJ.pdf>
20. Mukasey, M. B., Sedgwick, J. L., Hagy, D. W. (2008). Ballistic Resistance of Body Armor. NIJ Standard-0101.06. Available at: <https://www.ojp.gov/pdffiles1/nij/223054.pdf>
21. Monteiro, S. N., Lima, É. P., Louro, L. H. L., da Silva, L. C., Drelich, J. W. (2014). Unlocking Function of Aramid Fibers in Multilayered Ballistic Armor. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 46 (1), 37–40. doi: <https://doi.org/10.1007/s11661-014-2678-2>
22. Luz, F. S. da, Lima Junior, E. P., Louro, L. H. L., Monteiro, S. N. (2015). Ballistic Test of Multilayered Armor with Intermediate Epoxy Composite Reinforced with Jute Fabric. *Materials Research*, 18, 170–177. doi: <https://doi.org/10.1590/1516-1439.358914>
23. Mujiyono, M., Nurhadiyanto, D., Mukhammad, A. F. H., Riyadi, T. W. B., Wahyudi, K., Kholis, N. et al. (2023). Damage formations of ramie fiber composites multilayer armour system under high-velocity impacts. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (12 (121)), 16–25. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.273788>
24. Bekci, M. L., Canpolat, B. H., Usta, E., Güler, M. S., Cora, Ö. N. (2021). Ballistic performances of Ramor 500 and Ramor 550 armor steels at mono and bilayered plate configurations. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 24 (4), 990–995. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2021.01.001>
25. Nascimento, L. F. C., Louro, L. H. L., Monteiro, S. N., Gomes, A. V., Marçal, R. L. S. B., Lima Júnior, É. P., Margem, J. I. (2017). Ballistic Performance of Mallow and Jute Natural Fabrics Reinforced Epoxy Composites in Multilayered Armor. *Materials Research*, 20, 399–403. doi: <https://doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2016-0927>



АНОТАЦІЇ  
MATERIALS SCIENCE

DOI: 10.15587/1729-4061.2023.275510

**ОСОБЛИВОСТІ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ ПРИ НАПЛАВЛЕННІ СТАЛІ (ЗАЛІЗА) НА ТИТАН ІЗ ПЛАЗМОВО-НАПИЛЕНИМИ ПОКРИТТЯМИ В ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ СТИКОВОГО З'ЄДНАННЯ БІМЕТАЛЕВИХ ПЛАСТИН «ТИТАН – СТАЛЬ» (с. 6–16)**

В. М. Коржик, В. Ю. Хаскін, О. В. Ганущак, Д. В. Строгонов, Є. В. Ілляшенко, Н. М. Фіалко, Chunfu Guo, А. А. Гринюк, С. І. Пелешенко, А. О. Альошин

Об'єкт дослідження – структуроутворення при наплавленні сталі (заліза) на титан із плазово-напиленими покриттями для отримання стикового з'єднання біметалевих пластин «титан – сталь». Проблема, що вирішувалася, – створення технології нанесення бар'єрного прошарку між титаном і сталлю для отримання бездефектного з'єднання встик крайок біметалічних листів вуглецевої сталі, плакованих шаром титану, в умовах дугового або плазового наплавлення вуглецевої сталі на титан. Нанесення бар'єрного прошарку виконували методами плазового напилення сталевого дроту або залізного порошку. При цьому наносили покриття товщиною 150...750 мкм на титані Grade2, на яке наплавляли дуговим та плазовим наплавленням шари товщиною 1–2 мм із матеріалів, аналогічних напиленним. Встановлено, що при напиленні із подальшим наплавленням сталевого дроту або залізного порошку, основними технологічними факторами усунення тріщин в отриманому з'єднанні, є товщина напиленого покриття та величина погонної енергії наплавлення. Проведено підбір товщини напиленого покриття (не менш 400...600 мкм) із наступним плазовим наплавленням сталевого дроту ER70S-6 діаметром 1.0 мм або порошку заліза CNPC-Fe200 при погонній енергії до ~200...250 Дж/мм. Отримано бездефектний перехідний шар від титану до сталі. Він являє собою суцільний прошарок товщиною 50–60 мкм, що складається з інтерметалідів FeTi і FeTi<sub>2</sub>, а також β-фази титану з підвищеним вмістом заліза, що зберігає певну пластичність без тріщин та інших дефектів. За допомогою розробленого підходу з'єднання біметалевих крайок «титан – сталь» планується виготовлення шовних біметалевих труб магістральних трубопроводів для транспортування нафтової та газової сировини, видобутої зі свердловин.

**Ключові слова:** біметал титан – сталь, багатопрхідне зварювання, бар'єрний прошарок, інтерметалідні фази, границя розділу.

DOI: 10.15587/1729-4061.2023.277252

**ПОЛІПШЕННЯ ЯКОСТІ ПОВЕРХНІ СТАЛЕВИХ ДЕТАЛЕЙ КОМБІНОВАНИМ ЛАЗЕРНО-УЛЬТРАЗВУКОВИМ ОБРОБЛЕННЯМ: АЛГОРИТМ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ (с. 17–26)**

Д. А. Лесик, В. В. Джемелінський, Б. М. Мордок, Silvia Martinez, П. В. Кондрашев, Dariusz Grzesiak, Ю. В. Ключников, Aitzol Lamikiz

Для забезпечення якості поверхневого шару та підвищення експлуатаційних властивостей, запропоновано комбіновану технологію лазерно-ультразвукового поверхневого зміцнення та оздоблювання сталевих виробів. Дана робота присвячена визначенню діапазону раціональних режимів лазерного термооброблення та ультразвукового ударного оброблення для інтенсифікації процесу комбінованого зміцнення сталі 45 та сталі X12MФ. Лазерне термозміцнення проведено за стратегією постійної температури із використанням волоконного лазера та сканувальної оптики при температурі нагрівання 1200–1300 °C та швидкості оброблення 40–140 мм/хв. Ультразвукове поверхнєве зміцнення та оздоблювання виконано на технологічному обладнанні при амплітуді ультразвукових коливань 18 мкм та навантажуванні ультразвукового інструменту 50 Н. Тривалість ультразвукового оброблення варіювалася в межах 60–180 с. Результати показали, що лазерно-ультразвукове оброблення приводить до підвищення інтенсивності зміцнення більше 200 %, формуючи глибину зміцнення 200–440 мкм. Комбіноване оброблення веде до значного підвищення зносостійкості за рахунок формування дрібнозернистої мартенситної структури з твердістю (58–60 HRC<sub>5</sub>) в приповерхневому шарі. Запропоновано алгоритм керування технологічними режимами комбінованого лазерно-ультразвукового оброблення конструкційних та інструментальних сталей, обмежуючи температуру нагрівання, тривалість лазерного (ультразвукового) впливу та амплітуду ультразвукових коливань концентратора. Лазерно-ультразвукове оброблення дозволить сформувати поверхневий шар із заданим комплексом властивостей, гарантовано підвищуючи зносо- та корозійну стійкість. Розроблена технологія може бути використана для поверхневого зміцнення великогабаритних виробів в галузі машинобудування.

**Ключові слова:** лазерно-ультразвукове оброблення, сталь 45, сталь X12MФ, поверхнєве зміцнення.

DOI: 10.15587/1729-4061.2023.277756

**АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ ДУГОВОЇ ПЛАЗМИ СИСТЕМИ N-O-C-N У ПРОЦЕСАХ ІНЖЕНЕРІЇ ПОВЕРХНІ (с. 27–34)**

В. М. Пашенко

Об'єктом дослідження були речовини, які можуть бути використані для генерації дугової плазми. Проаналізовані традиційні та перспективні плазові середовища з метою виявлення найбільш універсальних за комплексом властивостей для ефективного передавання енергії матеріалу. Показано, що середньоентальпійні середовища мають гармонійне співвідношення температури та

ентальній і можуть з максимальною ефективністю забезпечити зміну енергетичного стану оброблюваного матеріалу. Встановлено, що найбільш універсальний набір властивостей демонструє середньоентальпійна плазма системи N-O-C-H. Застосування для її генерації сумішей повітря з вуглеводнями дозволяє досягати середньомасової температури  $(5..7) \cdot 10^3$  K і змінювати в широкому діапазоні окиснювально-відновний потенціал плазмового середовища. Завдяки цьому можлива термічна обробка із максимальним збереженням вихідного складу матеріалу. Експериментальними дослідженнями потоків плазми системи N-O-C-H підтверджена наявність відновних компонентів, здатних зв'язувати кисень повітря, яке підсмоктується у струмінь. На багатих сумішах вміст кисню в струмені на дистанції 100 мм не перевищує 5 %.

Доведений позитивний вплив комбінованого введення енергії у плазмоутворювальну речовину на процес генерації та формування струменя плазми. Застосування енергії різної фізичної природи дає можливість підтримання локальних енергетичних параметрів плазмового потоку у ході обробки матеріалу. Це відбувається за рахунок виділення додаткового тепла внаслідок взаємодії компонентів плазми та плазми із повітрям навколишнього середовища. Застосування плазми системи N-O-C-H в технологіях інженерії поверхні дозволить розширити номенклатуру матеріалів, які обробляються, і зменшити експлуатаційні витрати на проведення процесу.

**Ключові слова:** плазмоутворювальна речовина, плазма системи N-O-C-H, відновні компоненти плазми, окиснювально-відновний потенціал.

DOI: 10.15587/1729-4061.2023.276835

### ВИЗНАЧЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ВПЛИВУ ВИСОКОЇ ТЕМПЕРАТУРИ НА ПОСТІЙНУ ТА ЗМІННУ ВТОМНУ ДІЯЛЬНІСТЬ НАНОКОМПОЗИТУ AA7075- $Al_2O_3$ , ВИГОТОВЛЕНОГО МЕТОДОМ ПЕРЕМІШУВАЛЬНОГО ЛИТТЯ (с. 35–41)

Muzher T. Mohamed, Rawa A. Helal, Sami A. Nawi, Al alkawi H. J. M, Ahmed AAG Al-rubaiby

Метою цього дослідження є визначення впливу високої температури на довговічність наноконкомпозитів AA7075- $Al_2O_3$  (6 мас. %  $Al_2O_3$ ), виготовлених методом лиття з перемішуванням. Завданням дослідження є визначення довговічності, опору втоми та механічних властивостей наноконкомпозиту за постійних та змінних умов навантаження при підвищених температурах, а також виявлення змін у його поведінці внаслідок дії високих температур. Результати показують, що більш високі температури мають великий вплив на характеристики втоми наноконкомпозиту за обох умов навантаження. Коли матеріал випробовували при високій температурі (150 °C) із додаванням 6 мас. %  $Al_2O_3$ , межа міцності на розрив і межа текучості зросла на 16 % і 15,7 % відповідно. Його стійкість до втоми також була успішно випробувана як в умовах змінної, так і постійної амплітуди навантажень. Інтерпретація результатів свідчить про те, що зміни мікроструктури наноконкомпозитного матеріалу при підвищених температурах призводять до збільшення щільності дислокацій та розміру зерна, що призводить до покращення його механічних властивостей. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації процесу виготовлення наноконкомпозиту та підвищення його стійкості до втоми при високих температурах. Крім того, результати можуть бути використані для вдосконалення дизайну аерокосмічних компонентів і високотемпературних двигунів, для яких потрібні матеріали з відмінною стійкістю до втоми при підвищених температурах. Таким чином, дослідження впливу високої температури на постійну та змінну довговічність наноконкомпозиту AA7075-  $Al_2O_3$  дає цінну інформацію про механічні властивості матеріалу. Отримані висновки сприяють розробці матеріалів, здатних витримувати високі температури, що має значення для різноманітних галузей промисловості.

**Ключові слова:** AA7075, керамічні частинки  $Al_2O_3$ , механічні властивості, характеристика втоми, висока температура.

DOI: 10.15587/1729-4061.2023.276746

### РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА ПОРОШКОВОГО ТИТАНУ З НИЗЬКИМ КАРБОНОВИМ СЛІДОМ (с. 42–54)

A. Г. Гончар, В. В. Троцило, А. В. Бродський, В. Ю. Яровинський, О. І. Чухманов

Проведений аналіз сучасних технологій отримання титану з оксидної сировини. Встановлено, що сучасні промислові методи отримання титану вимагають використання вуглецю в якості відновника та, відповідно, не можуть зменшити кількість вуглецевих викидів без зміни технології. Саме тому розробка технології отримання титану із зменшенням рівня викидів вуглецевих компонентів є актуальною. Отже, об'єктом дослідження є технологія отримання титану з його оксиду без використання вуглецевих компонентів. Встановлено, що комплексний підхід до підготовки сировини та розділення відновних процесів з послідовним використанням двох типів відновників – магнію та кальцію, дозволив створити ефективний процес отримання титану без використання вуглецевих відновників. Виявлений вплив хлоридів кальцію та магнію, як промоторів процесу відновлення. Експериментальними дослідженнями встановлено, що форма та щільність сировинних елементів суттєво впливають на ефективність процесу відновлення за рахунок впорядкування потоків відновника та продуктів реакції в садці печі. Встановлені закономірності дозволили вдосконалити процес відновлення оксиду титану та отримали зразки титанових порошків з вмістом кисню на рівні 0,17 %, що відповідає міжнародним стандартам на титанові сплави та порошки. Додаткова плазмова обробка дозволила отримати матеріали, які за всіма показниками були придатними для адитивних процесів. Системний підхід до утилізації продуктів реакцій дозволив створити технологічну схему, за якої всі можливі відходи або повертаються в технологічний процес після обробки, або переробляються в товарну продукцію. За результатами дослідження розроблена технологічна схема отримання порошків титанових сплавів з оксиду титану методом комплексного відновлення в дві стадії – магнієм та кальцієм. Запропонована схема складається зі стандартних металургійних процесів та приведена до стандартних процесів і обладнання металургійних підприємств та хімічної промисловості.

З точки зору практичної значущості, результати роботи можуть бути використані при розробці промислової технології отримання титану з діоксиду титану без використання вуглецевих компонентів.

**Ключові слова:** титанові порошки, діоксид титану, дендрит, деоксидація титану, карбоновий слід, відновлення.

**DOI:** 10.15587/1729-4061.2023.277914

## **ВИЗНАЧЕННЯ БАЛІСТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕПОКСИДНОЇ КОМПОЗИТНОЇ КЕРАМІКИ, АРМОВАНОЇ ВОЛОКНАМИ РАМІ, У БАГАТОШАРОВІЙ БРОНЬОВІЙ СИСТЕМІ (с. 55–63)**

**Alaya Fadllu Hadi Mukhammad, Rusnaldy, Rifky Ismail, Tri Widodo Besar Riyadi**

Система багатошарової броні (СББ) активно вивчається в усьому світі на предмет її здатності утримувати фрагменти кераміки після зіткнення. СББ складається з керамічного шару, розміщеного спереду та підтримуваного композитним шаром епоксидної смоли, армованої волокном рамі. У цьому дослідженні використовуються натуральні волокна, що складаються з 50 % волокон рамі, з епоксидною смолою як матрицею та керамікою з карбіду кремнію (SiC) як передньою панеллю. Під час балістичних випробувань у цьому дослідженні використовувалася куля NATO Ball калібру 7,62×51 мм із дистанцією стрільби 15 м від панелі кулі. Швидкість кулі визначали за допомогою LIGHT SCREEN типу B471. Мета дослідження полягає в тому, щоб зробити висновок про оптимальну товщину волоконно-епоксидної смоли рамі та структури СББ із SiC-кераміки на основі експериментів, яка може витримати проникнення кулі 7,62 НАТО. Для досягнення цієї мети досягаються такі цілі: вивчити вплив додавання кераміки SiC до композиту рамі на BFS та вивчити вплив додавання кераміки SiC до композиту рамі на режим руйнування. Результати показали, що додавання кількох шарів SiC підвищує стійкість балістичного СББ, що відзначається зниженням значення BFS глини. 5SiC+10R є оптимальною товщиною для опору проникненню кулі калібру 7,62×51 мм із глиною BFS товщиною 12 мм. Явищами руйнування, виявленими в цьому дослідженні, були осколки снарядів, тріщини матриці, радіальні тріщини, точки удару та фрагменти кераміки. Утворення тріщин матриці з'являється на 5SiC+10R з мінімальною деформацією на тильній стороні. Явище роздроблення кераміки під час пострілу спричиняє пошкодження структури СББ, тому шар композитного волокна рамі стикається прямо з кулею, якщо вона піддається другому пострілу. Броня надвисокої твердості як перший шар на структурі СББ є привабливим варіантом для подальших досліджень.

**Ключові слова:** дослідження балістичних характеристик, багатошарова броньова система, SiC, рамі, тильна сигнатура.