

## ABSTRACT AND REFERENCES

## MATERIALS SCIENCE

DOI: 10.15587/1729-4061.2020.210307

**DEVELOPING THE MODIFICATION OF NICKEL CATHODES FOR APPLYING THE ION-PLASMA COATINGS ON THE PARTS OF AIRCRAFT ENGINES (p. 6–13)**

Vladimir Yefanov

Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine  
 ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6363-4081>

Oleksandr Ovchynnykov

Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine  
 ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5649-1094>

Oleksandr Dzhuhan

Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine  
 ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8979-8076>

Ihor Petrik

JSC “MOTOR SICH”, Zaporizhzhia, Ukraine  
 ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6600-1661>

Dmytro Raspornia

Donetsk Institute for Physics and Engineering named after  
 O. O. Galkin of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
 Kyiv, Ukraine  
 ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7738-7790>

Oleksii Kapustian

Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine  
 ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8979-8076>

Yehor Saprykin

Berdiansk Engineering College of Zaporizhzhia Polytechnic  
 National University, Berdiansk, Ukraine  
 ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1470-8221>

This paper reports studying the effect of such highly active, surface-active modifying elements as Y, Hf, and La on the structure and properties of the Ni–Cr–Al system’s consumable cathodes, which are used to apply heat-resistant coatings onto the gas-turbine engines’ blades. Y, Hf, and La are introduced to form the nanoscale separation of phases that stabilize the alloy structure.

In order to obtain cathodes of the required quality, a method of vacuum-arc autocrucible melting has been chosen. The selected technique makes it possible to use raw materials of different dispersity for the manufacture of ingots (in the form of powders or pig metal). The charge was prepared by shredding the materials mechanically, using various methods (cutting and crushing).

It has been shown that the introduction of elements such as Y and La into the cathodes has a similar effect on structural formation processes. It has been established that when Hf is introduced, the structure of the resulting consumable cathodes is characterized by a greater degree of homogeneity. There is also a positive effect of Hf on the uniformity of the distribution of doping elements (Al, Cr) in the volume of the material compared to alloy samples modified by Y and La.

It has been shown that the introduction of Hf has made it possible to achieve the higher quality indicators in comparison with Y and La. An analysis of coating structure has revealed that samples with Hf have a greater degree of homogeneity and fewer defects, which is especially important when applying coatings of greater thickness (over 40 μm). It has been established that the introduction of Hf makes it possible to apply coatings up to 90 μm thick by obtaining a less defective structure. It has been found that the Hf modification

increases the adhesion between the substrate and coating, as well as makes it possible to achieve maximum even distribution of doping elements throughout the entire thickness of the coating applied.

**Keywords:** gas-turbine engine, blade, composition, modification, cathode, coating, structure, adhesion, defect, properties.

## References

- Nicholls, J. R. (2003). Advances in Coating Design for High-Performance Gas Turbines. *MRS Bulletin*, 28 (9), 659–670. doi: <https://doi.org/10.1557/mrs2003.194>
- Nicholls, J. R. (2000). Designing oxidation-resistant coatings. *JOM*, 52 (1), 28–35. doi: <https://doi.org/10.1007/s11837-000-0112-2>
- Bose, S. (2007). High Temperature Coatings. Butterworth-Heinemann, 312. doi: <https://doi.org/10.1016/b978-0-7506-8252-7.x5000-8>
- Reed, R. C. (2009). The Superalloys. Fundamentals and Applications. Cambridge University Press. doi: <https://doi.org/10.1017/cbo9780511541285>
- Yefanov, V. S., Ovchynnykov, O. V., Dzhuhan, O. A., Tkachenko, S. M., Zhdan, V. S. (2019). Improvement of the technology of melting ingots of nickel based alloys by vacuum arc remelting (VAR). *Physical Metallurgy and Heat Treatment of Metals*, 3, 42–48. doi: <https://doi.org/10.30838/j.pmhtm.2413.250619.45.321>
- Sloof, W. G., Nijdam, T. J. (2009). On the high-temperature oxidation of MCrAlY coatings. *International Journal of Materials Research*, 100 (10), 1318–1330. doi: <https://doi.org/10.3139/146.110201>
- Ovchinnikov, A. V., Teslevich, S. M., Tizenberg, D. L., Efanov, V. S. (2019). Technology Of Melting Ingots Of Cobalt Alloy By The Arc Remelting Method. *Sovremennaya Elektrometallurgiya*, 1, 23–27. doi: <https://doi.org/10.15407/sem2019.01.03>
- Yefanov, V. S., Petrik, I. A., Prokopenko, A. N., Ovchinnikov, A. V. (2017). Multi-layer heat-resistant coating deposition on turbine blades exposed to erosion-corrosion. *Aviatsionno-kosmicheskaya tehnika i tehnologiya*, 8, 85–89. Available at: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/aktiv\\_2017\\_8\\_15](http://nbuv.gov.ua/UJRN/aktiv_2017_8_15)
- Kryukov, Sh. I., Masaleva, E. N., Rybnikov, A. I. (1983). Vliyanie malyh dobavok itriya na strukturu i fazoviy sostav splava ZHS6K. *MiTOM*, 3, 44–47.
- Povarova, K. B., Kazanskaya, N. K., Drozdov, A. A. et. al. (2011). Izuchenie vliyaniya redkozemel'nyh metallov na zharoprochnost' splavov na osnove Ni3Al. *Metally*, 1, 128–145. Available at: <https://viam.ru/public/files/2010/2010-205653.pdf>

DOI: 10.15587/1729-4061.2020.209722

**A STUDY OF THE PHASE-STRUCTURAL ENGINEERING POSSIBILITIES OF COATINGS ON D16 ALLOY DURING MICRO-ARC OXIDATION IN ELECTROLYTES OF DIFFERENT TYPES (p. 14–23)**

Valeria Subbotina

National Technical University „Kharkiv Polytechnic Institute“,  
 Kharkiv, Ukraine  
 ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3882-0368>

Oleg Sobol

National Technical University „Kharkiv Polytechnic Institute“,  
 Kharkiv, Ukraine  
 ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4497-4419>

Valery Belozarov

National Technical University „Kharkiv Polytechnic Institute“,  
 Kharkiv, Ukraine  
 ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7623-3658>

**Alexander Subbotin**

National Technical University „Kharkiv Polytechnic Institute“,  
Kharkiv, Ukraine

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-9422-4480>

**Yuliya Smyrnova**

O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv,  
Kharkiv, Ukraine

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-1927-2714>

The effect of electrolysis conditions with different electrolyte compositions on the growth kinetics, phase-structural state, and hardness of coatings obtained by microarc oxidation (MAO) on the D16 aluminum alloy (base – aluminum, main impurity Cu) was studied.

An analysis of the results obtained showed that the choice of the type of electrolyte and the conditions for the MAO process makes it possible to vary the growth kinetics and phase-structural state of the coating on the D16 aluminum alloy within a wide range. For all types of electrolytes, with an increase in the content of KOH, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, or KOH+Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, the growth rate of MAO coatings increases.

It was found that in MAO coatings obtained in an alkaline (KOH) electrolyte, a two-phase ( $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> phases) crystalline state is formed. An increase in the KOH concentration leads to an increase in the relative content of the  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> phase (corundum). During the formation in a silicate electrolyte, the phase composition of MAO coatings with an increase in the content of liquid glass (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) changes from a mixture of the  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> phase and mullite (3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·2SiO<sub>2</sub>) to an X-ray amorphous phase. The use of a complex electrolyte leads to a two-phase state of the coating with a large (compared to an alkaline electrolyte) shift of the  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>→ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> transformation towards the formation of the  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> phase. It was determined that the value of hardness correlates with the content of the  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> phase in the MAO coating, reaching the maximum value of 1620 kg/mm<sup>2</sup> at the highest content (about 80 vol. %) of the  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> phase.

Two types of dependences of the coating thickness on the amount of electricity passed were revealed. For the amount of passed electricity 10–50 A·h/dm<sup>2</sup>, the thickness dependence is determined as 4.2  $\mu$ m/(A·h/dm<sup>2</sup>), which suggests the basic mechanism of electrochemical oxidation during the formation of a coating. For the amount of electricity transmitted 50–120 A·hour/dm<sup>2</sup>, the thickness dependence is determined by a much smaller value of 1.1  $\mu$ m/(A·hour/dm<sup>2</sup>). This suggests a transition to a different mechanism of coating formation – the formation of a coating with the participation of electrolysis components.

**Keywords:** structural engineering, microarc oxidation, D16 alloy, electrolyte type, growth kinetics, phase composition.

**References**

- Smith, J. R., Lamprou, D. A. (2014). Polymer coatings for biomedical applications: a review. *Transactions of the IMF*, 92 (1), 9–19. doi: <https://doi.org/10.1179/0020296713z.000000000157>
- Fedirko, V. M., Pohrelyuk, I. M., Luk'yanenko, O. H., Lavry's, S. M., Kindrachuk, M. V., Dukhota, O. I. et. al. (2018). Thermodiffusion Saturation of the Surface of VT22 Titanium Alloy from a Controlled Oxygen–Nitrogen-Containing Atmosphere in the Stage of Aging. *Materials Science*, 53 (5), 691–701. doi: <https://doi.org/10.1007/s11003-018-0125-z>
- Guo, S., Liu, C. T. (2011). Phase stability in high entropy alloys: Formation of solid-solution phase or amorphous phase. *Progress in Natural Science: Materials International*, 21 (6), 433–446. doi: [https://doi.org/10.1016/s1002-0071\(12\)60080-x](https://doi.org/10.1016/s1002-0071(12)60080-x)
- Azarenkov, N. A., Sobol, O. V., Beresnev, V. M., Pogrebnjak, A. D., Kolesnikov, D. A., Turbin, P. V., Toryanik, I. N. (2013). Vacuum-plasma coatings based on the multielement nitrides. *Metallofizika i noveishie tekhnologii*, 35 (8), 1061–1084. Available at: <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/104178/07-Azarenkov.pdf?sequence=1>
- Sobol', O. V., Andreev, A. A., Gorban', V. F. (2016). Structural Engineering of Vacuum-ARC Multiperiod Coatings. *Metal Science and Heat Treatment*, 58 (1-2), 37–39. doi: <https://doi.org/10.1007/s11041-016-9961-3>
- Sobol', O. V., Andreev, A. A., Gorban', V. F., Meylekhov, A. A., Postelnyk, H. O. (2016). Structural Engineering of the Vacuum Arc ZrN/CrN Multilayer Coatings. *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 8(1), 01042-1–01042-5. doi: [https://doi.org/10.21272/jnep.8\(1\).01042](https://doi.org/10.21272/jnep.8(1).01042)
- Xu, F., Xia, Y., Li, G. (2009). The mechanism of PEO process on Al–Si alloys with the bulk primary silicon. *Applied Surface Science*, 255 (23), 9531–9538. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2009.07.090>
- Belozerov, V., Mahatilova, A., Sobol', O., Subbotina, V., Subbotin, A. (2017). Improvement of energy efficiency in the operation of a thermal reactor with submerged combustion apparatus through the cyclic input of energy. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (5 (86)), 39–43. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.96721>
- Sobol, O. V., Postelnyk, A. A., Meylekhov, A. A., Andreev, A. A., Stolbovoy, V. A. (2017). Structural Engineering of the Multilayer Vacuum Arc Nitride Coatings Based on Ti, Cr, Mo and Zr. *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 9 (3), 03003-1–03003-6. doi: [https://doi.org/10.21272/jnep.9\(3\).03003](https://doi.org/10.21272/jnep.9(3).03003)
- Sobol', O. V., Andreev, A. A., Gorban', V. F., Stolbovoy, V. A., Meylekhov, A. A., Postelnyk, A. A. (2016). Possibilities of structural engineering in multilayer vacuum-arc ZrN/CrN coatings by varying the nanolayer thickness and application of a bias potential. *Technical Physics*, 61 (7), 1060–1063. doi: <https://doi.org/10.1134/s1063784216070252>
- Sobol', O. V., Meilekhov, A. A. (2018). Conditions of Attaining a Superhard State at a Critical Thickness of Nanolayers in Multiperiodic Vacuum-Arc Plasma Deposited Nitride Coatings. *Technical Physics Letters*, 44 (1), 63–66. doi: <https://doi.org/10.1134/s1063785018010224>
- Sobol', O. V., Andreev, A. A., Stolbovoy, V. A., Fil'chikov, V. E. (2012). Structural-phase and stressed state of vacuum-arc-deposited nanostructural Mo-N coatings controlled by substrate bias during deposition. *Technical Physics Letters*, 38 (2), 168–171. doi: <https://doi.org/10.1134/s1063785012020307>
- Lesnevskiy, L. N., Lyakhovetskiy, M. A., Ivanova, S. V., Nagovitsyna, O. A. (2016). Structure and properties of surface layers formed on zirconium alloy by microarc oxidation. *Journal of Surface Investigation. X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 10 (3), 641–647. doi: <https://doi.org/10.1134/s1027451016030289>
- Laleh, M., Kargar, F., Sabour Rouhaghdam, A. (2011). Formation of a compact oxide layer on AZ91D magnesium alloy by microarc oxidation via addition of cerium chloride into the MAO electrolyte. *Journal of Coatings Technology and Research*, 8 (6), 765–771. doi: <https://doi.org/10.1007/s11998-011-9357-7>
- Curran, J. A., Clyne, T. W. (2005). Thermo-physical properties of plasma electrolytic oxide coatings on aluminium. *Surface and Coatings Technology*, 199 (2-3), 168–176. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.09.037>
- Norlin, A., Pan, J., Leygraf, C. (2006). Fabrication of Porous Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> by Plasma Electrolysis Anodization and Electrochemical Characterization of the Oxide. *Journal of The Electrochemical Society*, 153 (7), B225. doi: <https://doi.org/10.1149/1.2196788>
- Curran, J. A., Kalkanç, H., Magurova, Y., Clyne, T. W. (2007). Mullite-rich plasma electrolytic oxide coatings for thermal barrier applications. *Surface and Coatings Technology*, 201 (21), 8683–8687. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.06.050>
- Li, H. X., Li, W. J., Song, R. G., Ji, Z. G. (2012). Effects of different current densities on properties of MAO coatings embedded with and without  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoadditives. *Materials Science and Technology*, 28 (5), 565–568. doi: <https://doi.org/10.1179/1743284711y.00000000084>

19. Veys-Renaux, D., Rocca, E., Henrion, G. (2013). Micro-arc oxidation of AZ91 Mg alloy: An in-situ electrochemical study. *Electrochemistry Communications*, 31, 42–45. doi: <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2013.02.023>
20. Cui, S., Han, J., Du, Y., Li, W. (2007). Corrosion resistance and wear resistance of plasma electrolytic oxidation coatings on metal matrix composites. *Surface and Coatings Technology*, 201 (9-11), 5306–5309. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.07.126>
21. Chen, J., Wang, Z., Lu, S. (2012). Effects of electric parameters on microstructure and properties of MAO coating fabricated on ZK60 Mg alloy in dual electrolyte. *Rare Metals*, 31 (2), 172–177. doi: <https://doi.org/10.1007/s12598-012-0486-7>
22. Mota, R. O., Liu, Y., Mattos, O. R., Skeldon, P., Thompson, G. E. (2008). Influences of ion migration and electric field on the layered anodic films on Al–Mg alloys. *Corrosion Science*, 50 (5), 1391–1396. doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.01.007>
23. Lu, X., Blawert, C., Kainer, K. U., Zheludkevich, M. L. (2016). Investigation of the formation mechanisms of plasma electrolytic oxidation coatings on Mg alloy AM50 using particles. *Electrochimica Acta*, 196, 680–691. doi: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.03.042>
24. Martin, J., Leone, P., Nominé, A., Veys-Renaux, D., Henrion, G., Belmonte, T. (2015). Influence of electrolyte ageing on the Plasma Electrolytic Oxidation of aluminium. *Surface and Coatings Technology*, 269, 36–46. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.11.001>
25. Jovović, J., Stojadinović, S., Šišović, N. M., Konjević, N. (2011). Spectroscopic characterization of plasma during electrolytic oxidation (PEO) of aluminium. *Surface and Coatings Technology*, 206 (1), 24–28. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.06.031>
26. Gu, W., Shen, D., Wang, Y., Chen, G., Feng, W., Zhang, G. et al. (2006). Deposition of duplex Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/aluminum coatings on steel using a combined technique of arc spraying and plasma electrolytic oxidation. *Applied Surface Science*, 252 (8), 2927–2932. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2005.04.036>
27. Tseng, C.-C., Lee, J.-L., Kuo, T.-H., Kuo, S.-N., Tseng, K.-H. (2012). The influence of sodium tungstate concentration and anodizing conditions on microarc oxidation (MAO) coatings for aluminum alloy. *Surface and Coatings Technology*, 206 (16), 3437–3443. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.02.002>
28. Asadi, S., Kazeminezhad, M. (2016). Multi Directional Forging of 2024 Al Alloy After Different Heat Treatments: Microstructural and Mechanical Behavior. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 70 (7), 1707–1719. doi: <https://doi.org/10.1007/s12666-016-0967-8>
29. Yerokhin, A. L., Nie, X., Leyland, A., Matthews, A., Dowey, S. J. (1999). Plasma electrolysis for surface engineering. *Surface and Coatings Technology*, 122 (2-3), 73–93. doi: [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(99\)00441-7](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(99)00441-7)
30. Dunleavy, C. S., Curran, J. A., Clyne, T. W. (2011). Self-similar scaling of discharge events through PEO coatings on aluminium. *Surface and Coatings Technology*, 206 (6), 1051–1061. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.07.065>
31. Matykina, E., Arrabal, R., Pardo, A., Mohedano, M., Mingo, B., Rodríguez, I., González, J. (2014). Energy-efficient PEO process of aluminium alloys. *Materials Letters*, 127, 13–16. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.04.077>
32. Melhem, A., Henrion, G., Czerwiec, T., Briançon, J. L., Duchanoy, T., Brochard, F., Belmonte, T. (2011). Changes induced by process parameters in oxide layers grown by the PEO process on Al alloys. *Surface and Coatings Technology*, 205, S133–S136. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.01.046>
33. Belozero, V., Sobol, O., Mahatlova, A., Subbotina, V., Tabaza, T. A., Al-Qawabeha, U. F., Al-Qawabah, S. M. (2017). The influence of the conditions of microplasma processing (microarc oxidation in anode-cathode regime) of aluminum alloys on their phase composition. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (12 (89)), 52–57. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.112065>
34. Subbotina, V., Al-Qawabeha, U. F., Belozero, V., Sobol, O., Subbotin, A., Tabaza, T. A., Al-Qawabah, S. M. (2019). Determination of influence of electrolyte composition and impurities on the content of  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> phase in MAO-coatings on aluminum. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (12 (102)), 6–13. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.185674>
35. Javidi, M., Fadaee, H. (2013). Plasma electrolytic oxidation of 2024-T3 aluminum alloy and investigation on microstructure and wear behavior. *Applied Surface Science*, 286, 212–219. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.09.049>
36. Belozero, V., Sobol, O., Mahatlova, A., Subbotina, V., Tabaza, T. A., Al-Qawabeha, U. F., Al-Qawabah, S. M. (2018). Effect of electrolysis regimes on the structure and properties of coatings on aluminum alloys formed by anode-cathode micro arc oxidation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (12 (91)), 43–47. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.121744>
37. Subbotina, V. V., Al-Qawabeha, U. F., Sobol', O. V., Belozero, V. V., Schneider, V. V., Tabaza, T. A., Al-Qawabah, S. M. (2019). Increase of the  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> phase content in MAO-coating by optimizing the composition of oxidated aluminum alloy. *Functional Materials*, 26 (4), 752–758. doi: <https://doi.org/10.15407/fm26.04.752>
38. Friedemann, A. E. R., Gesing, T. M., Plagemann, P. (2017). Electrochemical rutile and anatase formation on PEO surfaces. *Surface and Coatings Technology*, 315, 139–149. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.01.042>
39. Yao, Z., Liu, Y., Xu, Y., Jiang, Z., Wang, F. (2011). Effects of cathode pulse at high frequency on structure and composition of Al<sub>2</sub>TiO<sub>5</sub> ceramic coatings on Ti alloy by plasma electrolytic oxidation. *Materials Chemistry and Physics*, 126 (1-2), 227–231. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2010.11.035>
40. Lv, P. X., Chi, G. X., Wei, D. B., Di, S. C. (2011). Design of Scanning Micro-Arc Oxidation Forming Ceramic Coatings on 2024 Aluminium Alloy. *Advanced Materials Research*, 189-193, 1296–1300. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.189-193.1296>
41. Clyne, T. W., Troughton, S. C. (2018). A review of recent work on discharge characteristics during plasma electrolytic oxidation of various metals. *International Materials Reviews*, 64 (3), 127–162. doi: <https://doi.org/10.1080/09506608.2018.1466492>
42. Javidi, M., Fadaee, H. (2013). Plasma electrolytic oxidation of 2024-T3 aluminum alloy and investigation on microstructure and wear behavior. *Applied Surface Science*, 286, 212–219. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.09.049>
43. Matykina, E., Arrabal, R., Mohedano, M., Mingo, B., Gonzalez, J., Pardo, A., Merino, M. C. (2017). Recent advances in energy efficient PEO processing of aluminium alloys. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 27 (7), 1439–1454. doi: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(17\)60166-3](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(17)60166-3)
44. Suminov, I. V., Belkin, P. N., Epel'fel'd, A. V., Lyudin, V. B., Krit, B. L., Borisov, A. M. (2011). Plazmenno-elektroliticheskoe modifitsirovanie poverhnosti metallov i splavov. Vol. 2. Moscow: Tekhnosfera, 512.
45. Sobol', O. V., Shovkoplyas, O. A. (2013). On advantages of X-ray schemes with orthogonal diffraction vectors for studying the structural state of ion-plasma coatings. *Technical Physics Letters*, 39 (6), 536–539. doi: <https://doi.org/10.1134/S1063785013060126>
46. Klopotov, A. A., Abzaev, Yu. A., Potekaev, A. I., Volokitin, O. G. (2012). Osnovy rentgenostruktornogo analiza v materialovedenii. Tomsk: Izd-vo Tom. gos. arhit.-stroit. Un-ta, 276.
47. Subbotina, V. V., Sobol, O. V., Belozero, V. V., Makhatilova, A. I., Shnyder, V. V. (2019). Use of the Method of Micro-arc Plasma Oxidation to Increase the Antifriction Properties of the Titanium Alloy Surface. *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 11 (3), 03025-1–03025-5. doi: [https://doi.org/10.21272/jnep.11\(3\).03025](https://doi.org/10.21272/jnep.11(3).03025)

48. Subbotina, V., Sobol, O., Belozerov, V., Al-Qawabeha, U. F., Tabaza, T. A., Al-Qawabah, S. M., Shnayder, V. (2020). A study of the electrolyte composition influence on the structure and properties of MAO coatings formed on AMg6 alloy. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (12 (105)), 6–14. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.205474>
49. Wang, Y., Jiang, Z., Yao, Z. (2009). Microstructure, bonding strength and thermal shock resistance of ceramic coatings on steels prepared by plasma electrolytic oxidation. *Applied Surface Science*, 256 (3), 650–656. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2009.08.036>
50. Wang, Y., Jiang, Z., Yao, Z. (2009). Preparation and properties of ceramic coating on Q235 carbon steel by plasma electrolytic oxidation. *Current Applied Physics*, 9 (5), 1067–1071. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cap.2008.12.004>

DOI: 10.15587/1729-4061.2020.210773

**INFLUENCE OF PHASE TRANSITIONS ON THE TEMPERATURE BEHAVIOR OF PHOTOLUMINESCENCE SPECTRA IN A  $(\text{N}(\text{CH}_3)_4)_2\text{MnCl}_4$  CRYSTAL (p. 24–30)**

**Hryhorii Ilchuk**

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6647-4343>

**Andrii Kashuba**

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3650-3892>

**Ivan Kuno**

Ivan Franko National University of Lviv, Lviv, Ukraine  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6092-7949>

**Sergey Sveleba**

Ivan Franko National University of Lviv, Lviv, Ukraine  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0823-910X>

**Taras Malyi**

Ivan Franko National University of Lviv, Lviv, Ukraine  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1683-6211>

**Roman Petrus**

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6192-7772>

**Volodymyr Tsiurnia**

Ivan Franko National University of Lviv, Lviv, Ukraine  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8231-3235>

**Ihor Semkiv**

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3432-8779>

Monocrystals  $(\text{N}(\text{CH}_3)_4)_2\text{MnCl}_4$  were grown from an aqueous solution of salts by slow evaporation at room temperature. The effect of phase transitions on the behavior of photoluminescence spectra, as well as excitation spectra and time of attenuation of the glow band of 539 nm is studied in the temperature range of 4.5–300 K. Based on the studies of the spectra of photoluminescence of the  $(\text{N}(\text{CH}_3)_4)_2\text{MnCl}_4$ , the glow bands, which are caused by the glow of the  $\text{Mn}^{2+}$  ion and correspond to the  ${}^4\text{T}_1 \rightarrow {}^6\text{A}_1$  transition, were determined. The temperature evolution of photoluminescence spectra (4.5–300 K) of the  $(\text{N}(\text{CH}_3)_4)_2\text{MnCl}_4$  crystal demonstrates anomalies of their parameters at the points of phase transitions. Temperature dependences of crystal photoluminescence spectra of the  $(\text{N}(\text{CH}_3)_4)_2\text{MnCl}_4$  crystal prove the existence of phase transitions in the temperature intervals from 100 to 300 K. The excitation spectra for the luminescence band of 539 nm and their temperature evolution (4.5–300 K) are shown. The bands of around 2.93 and 2.96 eV are quickly damped with temperature, so at

the temperatures above 170 K and 270 K, the bands of 2.96 and 2.93 eV are not observed, respectively. Peaks in the excitation spectrum correspond to electron transitions from the basic state of  ${}^6\text{A}_1 \text{Mn}^{2+}$  to various excited states  $\text{MnCl}_4^{2-} (T_d)$ . Their excitation energies are explained by a model of crystals using the Tanabe-Sugano diagrams. The Racah B and C parameters, as well as the splitting of crystal field  $\Delta$ , were calculated based on the Tanabe-Sugano diagrams for  $d^5$  of electronic configuration. The temperature behavior of the time of attenuation of the photoluminescence band of 539 nm was studied. The resulting time of attenuation of the photoluminescence band increases at an increase in temperature. The kinetics of attenuation of the photoluminescence band of 539 nm of a crystal is well described by an exponential function.

**Keywords:** photoluminescence, glow spectra, excitation spectra, phase transitions.

**References**

- Kushnir, O. S., Kityk, A. V., Dzyubanski, V. S., Shopa, R. Y. (2011). Critical behaviour of optical birefringence near the normal–incommensurate phase transition in  $[\text{N}(\text{CH}_3)_4]_2\text{ZnCl}_4$  crystals under the influence of hydrostatic pressure. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 23 (22), 225403. doi: <https://doi.org/10.1088/0953-8984/23/22/225403>
- Kunyo, I. M., Kashuba, A. I., Karpa, I. V., Stakhura, V. B., Sveleba, S. A., Katerynychuk, I. M. et. al. (2018). The band energy structure of  $(\text{N}(\text{CH}_3)_4)_2\text{ZnCl}_4$  crystals. *Journal of Physical Studies*, 22 (3). doi: <https://doi.org/10.30970/jps.22.3301>
- Kashuba, A. I., Kunyo, I. M., Malyi, T. S., Ilchuk, H. A., Petrus, R. Yu., Semkiv, I. V. et. al. (2019). The spectral properties of  $(\text{N}(\text{CH}_3)_4)_2\text{ZnCl}_4$  crystal. *Functional Materials*, 26 (3), 472–476. doi: <https://doi.org/10.15407/fm26.03.472>
- Rodríguez-Lazcano, Y., Nataf, L., Rodríguez, F. (2009). Electronic structure and luminescence of  $[(\text{CH}_3)_4\text{N}]_2\text{MnX}_4$  ( $\text{X}=\text{Cl}, \text{Br}$ ) crystals at high pressures by time-resolved spectroscopy: Pressure effects on the Mn–Mn exchange coupling. *Physical Review B*, 80 (8). doi: <https://doi.org/10.1103/physrevb.80.085115>
- Kapustianyk, V., Semak, S., Panasyuk, M., Rudko, M., Rudyk, V. (2019). Temperature evolution of the intra-ion absorption spectra of  $(\text{NH}_2(\text{C}_2\text{H}_5)_2)_2\text{CoCl}_4$  crystals in the region of their phase transitions. *Phase Transitions*, 92 (4), 396–405. doi: <https://doi.org/10.1080/01411594.2019.1591407>
- Kushnir, O. S., Shechepanskyi, P. A., Stadnyk, V. Y., Fedorchuk, A. O. (2019). Relationships among optical and structural characteristics of  $\text{ABSO}_4$  crystals. *Optical Materials*, 95, 109221. doi: <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2019.109221>
- Karpa, I. V., Sveleba, S. A., Kunyo, I. M., Katerynychuk, I. M., Semotyuk, O. V., Blashko, O. I. (2010). Effect of the number of defect density waves on the dynamics of the soliton system in  $[\text{N}(\text{CH}_3)_4]_2\text{CuCl}_4$  and  $[\text{N}(\text{CH}_3)_4]_2\text{Zn}_{0.98}\text{Ni}_{0.02}\text{Cl}_4$  crystals. *Crystallography Reports*, 55 (5), 815–820. doi: <https://doi.org/10.1134/s1063774510050172>
- Sveleba, S. A., Karpa, I. V., Katerynychuk, I. M., Kunyo, I. M., Phitsych, E. I. (2014). Influence of the thickness of  $[\text{N}(\text{CH}_3)_4]_2\text{Zn}_{0.75}\text{Mn}_{0.25}\text{Cl}_4$  crystal on the phase-transition temperature. *Crystallography Reports*, 59 (2), 229–237. doi: <https://doi.org/10.1134/s1063774514020266>
- Mashiyama, H., Koshiji, N. (1989). A structural study of phase transitions in  $[\text{N}(\text{CH}_3)_4]_2\text{MnCl}_4$ . *Acta Crystallographica Section B Structural Science*, 45 (5), 467–473. doi: <https://doi.org/10.1107/s0108768189006981>
- Marco De Lucas, M. C., Rodríguez, F., Moreno, M. (1990). Optical investigations on  $\{\text{N}(\text{CH}_3)_4\}_2\text{MnCl}_4$ : A new phase transition at 90 K. *Ferroelectrics*, 109 (1), 21–26. doi: <https://doi.org/10.1080/00150199008211384>
- Ben Bechir, M., Karoui, K., Tabellout, M., Guidara, K., Ben Rhaiem, A. (2014). Alternative current conduction mechanisms of organic-inorganic compound  $[\text{N}(\text{CH}_3)_3\text{H}]_2\text{ZnCl}_4$ . *Journal of Applied Physics*, 115 (15), 153708. doi: <https://doi.org/10.1063/1.4871662>

12. Zhou, Q., Dolgov, L., Srivastava, A. M., Zhou, L., Wang, Z., Shi, J. et al. (2018). Mn<sup>2+</sup> and Mn<sup>4+</sup> red phosphors: synthesis, luminescence and applications in WLEDs. A review. *Journal of Materials Chemistry C*, 6(11), 2652–2671. doi: <https://doi.org/10.1039/c8tc00251g>
13. Kashuba, A., Zhydachevskyy, Y., Semkiv, I., Franiv, A., Kushnir, O. (2018). Photoluminescence in the solid solution In<sub>0.5</sub>Tl<sub>0.5</sub>I. *Ukrainian Journal of Physical Optics*, 19 (1), 1. doi: <https://doi.org/10.3116/16091833/19/1/1/2018>
14. Artem'ev, A. V., Davydova, M. P., Berezin, A. S., Brel, V. K., Morgalyuk, V. P., Bagryanskaya, I. Y., Samsonenko, D. G. (2019). Luminescence of the Mn<sup>2+</sup> ion in non-Oh and Td coordination environments: the missing case of square pyramid. *Dalton Transactions*, 48 (43), 16448–16456. doi: <https://doi.org/10.1039/c9dt03283e>
15. Zhang, J., Zou, H., Qing, Q., Yang, Y., Li, Q., Liu, Z. et al. (2003). Effect of Chemical Oxidation on the Structure of Single-Walled Carbon Nanotubes. *The Journal of Physical Chemistry B*, 107 (16), 3712–3718. doi: <https://doi.org/10.1021/jp027500u>
16. Griffith, J. S. (2009). *The Theory of Transition-Metal Ions*. Cambridge University Press, 468. Available at: <https://www.cambridge.org/ua/academic/subjects/chemistry/chemistry-general-interest/theory-transition-metal-ions?format=PB&isbn=9780521115995>
17. Sugano, S. (1970). *Multiplets of Transition-Metal Ions in Crystals*. Academic Press, 348. Available at: <https://www.elsevier.com/books/multiplets-of-transition-metal-ions-in-crystals/sugano/978-0-12-676050-7>
18. Liem, L. N., Tran, N. (2018). Calculations of the Racah parameter B for Mn<sup>4+</sup> and Mn<sup>2+</sup> ions doped in CaAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 343, 012026. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/343/1/012026>
19. Bolesta, I., Furgala, Y., Kityk, I. (1996). Effects of phase transitions in luminescence features of [N(CH<sub>3</sub>)<sub>4</sub>]<sub>2</sub>MnCl<sub>4</sub> single crystals. *Phase Transitions*, 56 (1), 1–10. doi: <https://doi.org/10.1080/01411599608207834>

DOI: 10.15587/1729-4061.2020.194610

#### CHANGES IN THE NICKEL HYDROXIDE PROPERTIES UNDER THE INFLUENCE OF THERMAL FIELD *IN SITU* AND *EX SITU* DURING ELECTROCHEMICAL SYNTHESIS (p. 31–38)

Valerii Kotok

Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, Ukraine  
Vyatka State University, Kirov, Russian Federation  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8879-7189>

Vadym Kovalenko

Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, Ukraine  
Vyatka State University, Kirov, Russian Federation  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8012-6732>

Nickel hydroxide is widely used in supercapacitors, alkaline batteries, for the electrocatalytic oxidation of organic contaminants, etc. Due to their electrochemical activity, Ni(OH)<sub>2</sub> (α+β) samples of a layer structure synthesized in a slit diaphragm electrolyzer are the most promising. The effect of the thermal field on the structural characteristics of layered (α+β) Ni(OH)<sub>2</sub> was studied. The effect was assessed in two ways: 1) internal (*in situ*) cooling directly in the electrolyzer by cooling the cathode from the rear side; 2) external (*ex situ*) heating directly after the electrolyzer when passing through a spiral heat exchanger heated to 90 °C. The crystal structure of the samples was studied by X-ray phase analysis. It was shown that the base sample obtained without changing the thermal field was a monophasic layered (α+β) structure with a high content of α-modification and a gradient transition from α to β through a number of intermediate structures. The crystallinity of the sample was not high. During the internal cooling of the cathode, the crystallinity decreased and the fraction of the α-modification increased. External heating of the nickel hydroxide suspension immediately after leaving

the electrolyzer led to the recrystallization of the samples with the decomposition of the (α+β) layered structure and formation of β-Ni(OH)<sub>2</sub> with high crystallinity. It was found that external 6-minute heating did not change the crystal structure. This is explained by the fact that the aging process of nickel hydroxide at an elevated temperature is a crystal-chemical transformation, which is characterized by an induction period, during which the rate of the process is minimal.

As a result, the study has shown the possibility of controlling the type of forming crystalline modification of nickel hydroxide and its crystallinity by changing the internal (*in situ*) or external (*ex situ*) thermal field.

**Keywords:** nickel hydroxide, layered (α+β) structure, internal cooling, external heating, aging, induction period, slit diaphragm electrolyzer.

#### References

1. Hall, D. S., Lockwood, D. J., Bock, C., MacDougall, B. R. (2015). Nickel hydroxides and related materials: a review of their structures, synthesis and properties. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 471 (2174), 20140792. doi: <https://doi.org/10.1098/rspa.2014.0792>
2. Vidotti, M., Torresi, R., Torresi, S. I. C. de. (2010). Nickel hydroxide modified electrodes: a review study concerning its structural and electrochemical properties aiming the application in electrocatalysis, electrochromism and secondary batteries. *Química Nova*, 33 (10), 2176–2186. doi: <https://doi.org/10.1590/s0100-40422010001000030>
3. Chen, J., Bradhurst, D. H., Dou, S. X., Liu, H. K. (2019). Nickel Hydroxide as an Active Material for the Positive Electrode in Rechargeable Alkaline Batteries. *Journal of The Electrochemical Society*, 146 (10), 3606–3612. doi: <https://doi.org/10.1149/1.1392522>
4. Sun, Y.-K., Lee, D.-J., Lee, Y. J., Chen, Z., Myung, S.-T. (2013). Cobalt-Free Nickel Rich Layered Oxide Cathodes for Lithium-Ion Batteries. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 5 (21), 11434–11440. doi: <https://doi.org/10.1021/am403684z>
5. Lang, J.-W., Kong, L.-B., Liu, M., Luo, Y.-C., Kang, L. (2009). Asymmetric supercapacitors based on stabilized α-Ni(OH)<sub>2</sub> and activated carbon. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 14 (8), 1533–1539. doi: <https://doi.org/10.1007/s10008-009-0984-1>
6. Lang, J.-W., Kong, L.-B., Wu, W.-J., Liu, M., Luo, Y.-C., Kang, L. (2008). A facile approach to the preparation of loose-packed Ni(OH)<sub>2</sub> nanoflake materials for electrochemical capacitors. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 13 (2), 333–340. doi: <https://doi.org/10.1007/s10008-008-0560-0>
7. Aghazadeh, M., Ghaemi, M., Sabour, B., Dalvand, S. (2014). Electrochemical preparation of α-Ni(OH)<sub>2</sub> ultrafine nanoparticles for high-performance supercapacitors. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 18 (6), 1569–1584. doi: <https://doi.org/10.1007/s10008-014-2381-7>
8. Zheng, C., Liu, X., Chen, Z., Wu, Z., Fang, D. (2014). Excellent supercapacitive performance of a reduced graphene oxide/Ni(OH)<sub>2</sub> composite synthesized by a facile hydrothermal route. *Journal of Central South University*, 21 (7), 2596–2603. doi: <https://doi.org/10.1007/s11771-014-2218-7>
9. Wang, B., Williams, G. R., Chang, Z., Jiang, M., Liu, J., Lei, X., Sun, X. (2014). Hierarchical NiAl Layered Double Hydroxide/Multiwalled Carbon Nanotube/Nickel Foam Electrodes with Excellent Pseudocapacitive Properties. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 6 (18), 16304–16311. doi: <https://doi.org/10.1021/am504530e>
10. Kotok, V., Kovalenko, V. (2017). The properties investigation of the faradaic supercapacitor electrode formed on foamed nickel substrate with polyvinyl alcohol using. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (12 (88)), 31–37. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.108839>
11. Kotok, V. A., Kovalenko, V. L., Solovov, V. A., Kovalenko, P. V., Ananchenko, B. A. (2018). Effect of deposition time on properties of electro-

- chromic nickel hydroxide films prepared by cathodic template synthesis. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 13 (9), 3076–3086.
12. Kotok, V., Kovalenko, V. (2018). A study of the effect of tungstate ions on the electrochromic properties of Ni(OH)<sub>2</sub> films. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (12 (95)), 18–24. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.145223>
  13. Wang, Y., Zhang, D., Peng, W., Liu, L., Li, M. (2011). Electrocatalytic oxidation of methanol at Ni–Al layered double hydroxide film modified electrode in alkaline medium. *Electrochimica Acta*, 56 (16), 5754–5758. doi: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2011.04.049>
  14. Huang, W., Li, Z. L., Peng, Y. D., Chen, S., Zheng, J. F., Niu, Z. J. (2005). Oscillatory electrocatalytic oxidation of methanol on an Ni(OH)<sub>2</sub> film electrode. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 9 (5), 284–289. doi: <https://doi.org/10.1007/s10008-004-0599-5>
  15. Fan, Y., Yang, Z., Cao, X., Liu, P., Chen, S., Cao, Z. (2014). Hierarchical Macro-Mesoporous Ni(OH)<sub>2</sub> for Nonenzymatic Electrochemical Sensing of Glucose. *Journal of The Electrochemical Society*, 161 (10), B201–B206. doi: <https://doi.org/10.1149/2.0251410jes>
  16. Miao, Y., Ouyang, L., Zhou, S., Xu, L., Yang, Z., Xiao, M., Ouyang, R. (2014). Electrocatalysis and electroanalysis of nickel, its oxides, hydroxides and oxyhydroxides toward small molecules. *Biosensors and Bioelectronics*, 53, 428–439. doi: <https://doi.org/10.1016/j.bios.2013.10.008>
  17. Kovalenko, V., Kotok, V., Bolotin, O. (2016). Definition of factors influencing on Ni(OH)<sub>2</sub> electrochemical characteristics for supercapacitors. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (6 (83)), 17–22. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.79406>
  18. Ramesh, T. N., Kamath, P. V., Shivakumara, C. (2005). Correlation of Structural Disorder with the Reversible Discharge Capacity of Nickel Hydroxide Electrode. *Journal of The Electrochemical Society*, 152 (4), A806. doi: <https://doi.org/10.1149/1.1865852>
  19. Zhao, Y., Zhu, Z., Zhuang, Q.-K. (2005). The relationship of spherical nano-Ni(OH)<sub>2</sub> microstructure with its voltammetric behavior. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 10 (11), 914–919. doi: <https://doi.org/10.1007/s10008-005-0035-5>
  20. Jayashree, R. S., Kamath, P. V., Subbanna, G. N. (2000). The Effect of Crystallinity on the Reversible Discharge Capacity of Nickel Hydroxide. *Journal of The Electrochemical Society*, 147 (6), 2029. doi: <https://doi.org/10.1149/1.1393480>
  21. Jayashree, R. S., Kamath, P. V. (1999). Factors governing the electrochemical synthesis of  $\alpha$ -nickel (II) hydroxide. *Journal of Applied Electrochemistry*, 29 (4), 449–454. doi: <https://doi.org/10.1023/a:1003493711239>
  22. Kotok, V., Kovalenko, V. (2019). Definition of the influence of obtaining method on physical and chemical characteristics of Ni (OH)<sub>2</sub> powders. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (12 (97)), 21–27. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.156093>
  23. Ramesh, T. N., Kamath, P. V. (2006). Synthesis of nickel hydroxide: Effect of precipitation conditions on phase selectivity and structural disorder. *Journal of Power Sources*, 156 (2), 655–661. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.05.050>
  24. Rajamathi, M., Vishnu Kamath, P., Seshadri, R. (2000). Polymorphism in nickel hydroxide: role of interstratification. *Journal of Materials Chemistry*, 10 (2), 503–506. doi: <https://doi.org/10.1039/a905651c>
  25. Rajamathi, M., Subbanna, G. N., Kamath, P. V. (1997). On the existence of a nickel hydroxide phase which is neither  $\alpha$  nor  $\beta$ . *Journal of Materials Chemistry*, 7 (11), 2293–2296. doi: <https://doi.org/10.1039/a700390k>
  26. Hu, M., Yang, Z., Lei, L., Sun, Y. (2011). Structural transformation and its effects on the electrochemical performances of a layered double hydroxide. *Journal of Power Sources*, 196 (3), 1569–1577. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.08.041>
  27. Córdoba de Torresi, S. I., Provazi, K., Malta, M., Torresi, R. M. (2001). Effect of Additives in the Stabilization of the  $\alpha$  Phase of Ni(OH)<sub>2</sub> Electrodes. *Journal of The Electrochemical Society*, 148 (10), A1179. doi: <https://doi.org/10.1149/1.1403731>
  28. Zhang, Z., Zhu, Y., Bao, J., Zhou, Z., Lin, X., Zheng, H. (2012). Structural and electrochemical performance of additives-doped  $\alpha$ -Ni(OH)<sub>2</sub>. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 27 (3), 538–541. doi: <https://doi.org/10.1007/s11595-012-0500-9>
  29. Sugimoto, A. (1999). Preparation and Characterization of Ni/Al-Layered Double Hydroxide. *Journal of The Electrochemical Society*, 146 (4), 1251. doi: <https://doi.org/10.1149/1.1391754>
  30. Zhen, F. Z., Quan, J. W., Min, Y. L., Peng, Z., Jun, J. L. (2004). A study on the structure and electrochemical characteristics of a Ni/Al double hydroxide. *Metals and Materials International*, 10 (5), 485–488. doi: <https://doi.org/10.1007/bf03027353>
  31. Liu, B., Wang, X. Y., Yuan, H. T., Zhang, Y. S., Song, D. Y., Zhou, Z. X. (1999). Physical and electrochemical characteristics of aluminium-substituted nickel hydroxide. *Journal of Applied Electrochemistry*, 29, 853–858. doi: <https://doi.org/10.1023/a:1003537900947>
  32. Caravaggio, G. A., Detellier, C., Wronski, Z. (2001). Synthesis, stability and electrochemical properties of NiAl and NiV layered double hydroxides. *Journal of Materials Chemistry*, 11 (3), 912–921. doi: <https://doi.org/10.1039/b004542j>
  33. Li, Y. W., Yao, J. H., Liu, C. J., Zhao, W. M., Deng, W. X., Zhong, S. K. (2010). Effect of interlayer anions on the electrochemical performance of Al-substituted  $\alpha$ -type nickel hydroxide electrodes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35 (6), 2539–2545. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.01.015>
  34. Zhao, Y. (2004). Al-substituted  $\beta$ -nickel hydroxide prepared by homogeneous precipitation method with urea. *International Journal of Hydrogen Energy*, 29 (8), 889–896. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2003.10.006>
  35. Lei, L., Hu, M., Gao, X., Sun, Y. (2008). The effect of the interlayer anions on the electrochemical performance of layered double hydroxide electrode materials. *Electrochimica Acta*, 54 (2), 671–676. doi: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2008.07.004>
  36. Faour, A., Mousty, C., Prevot, V., Devouard, B., De Roy, A., Bordet, P. et al. (2012). Correlation among Structure, Microstructure, and Electrochemical Properties of NiAl–CO<sub>3</sub> Layered Double Hydroxide Thin Films. *The Journal of Physical Chemistry C*, 116 (29), 15646–15659. doi: <https://doi.org/10.1021/jp300780w>
  37. Kotok, V., Kovalenko, V., Vlasov, S. (2018). Investigation of NiAl hydroxide with silver addition as an active substance of alkaline batteries. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (6 (93)), 6–11. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.133465>
  38. Kovalenko, V., Kotok, V. (2017). Study of the influence of the template concentration under homogeneous precipitation on the properties of Ni(OH)<sub>2</sub> for supercapacitors. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (6 (88)), 17–22. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.106813>
  39. Kovalenko, V., Kotok, V. (2017). Obtaining of Ni–Al layered double hydroxide by slit diaphragm electrolyzer. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (6 (86)), 11–17. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.95699>
  40. Kovalenko, V., Kotok, V. (2017). Definition of effectiveness of  $\beta$ -Ni(OH)<sub>2</sub> application in the alkaline secondary cells and hybrid supercapacitors. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (6 (89)), 17–22. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.110390>
  41. Li, J., Luo, F., Tian, X., Lei, Y., Yuan, H., Xiao, D. (2013). A facile approach to synthesis coral-like nanoporous  $\beta$ -Ni(OH)<sub>2</sub> and its supercapacitor application. *Journal of Power Sources*, 243, 721–727. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.05.172>
  42. Kovalenko, V., Kotok, V. (2018). Influence of ultrasound and template on the properties of nickel hydroxide as an active substance of supercapaci-

- tors. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3 (12 (93)), 32–39. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.133548>
43. Kovalenko, V. L., Kotok, V. A., Sykchin, A. A., Mudryi, I. A., Ananchenko, B. A., Burkov, A. A. et al. (2016). Nickel hydroxide obtained by high-temperature two-step synthesis as an effective material for supercapacitor applications. Journal of Solid State Electrochemistry, 21 (3), 683–691. doi: <https://doi.org/10.1007/s10008-016-3405-2>
  44. Kovalenko, V. L., Kotok, V. A., Sykchin, A., Ananchenko, B. A., Chernyad'ev, A. V., Burkov, A. A. et al. (2020). Al<sup>3+</sup> Additive in the Nickel Hydroxide Obtained by High-Temperature Two-Step Synthesis: Activator or Poisoner for Chemical Power Source Application? Journal of The Electrochemical Society, 167 (10), 100530. doi: <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ab9a2a>
  45. Miao, C., Zhu, Y., Zhao, T., Jian, X., Li, W. (2015). Synthesis and electrochemical performance of mixed phase  $\alpha/\beta$  nickel hydroxide by codoping with Ca<sup>2+</sup> and PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>. Ionics, 21 (12), 3201–3208. doi: <https://doi.org/10.1007/s11581-015-1507-y>
  46. Li, Y., Yao, J., Zhu, Y., Zou, Z., Wang, H. (2012). Synthesis and electrochemical performance of mixed phase  $\alpha/\beta$  nickel hydroxide. Journal of Power Sources, 203, 177–183. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.11.081>
  47. Kovalenko, V., Kotok, V. (2018). Comparative investigation of electrochemically synthesized ( $\alpha+\beta$ ) layered nickel hydroxide with mixture of  $\alpha$ -Ni(OH)<sub>2</sub> and  $\beta$ -Ni(OH)<sub>2</sub>. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2 (6 (92)), 16–22. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.125886>
  48. Kotok, V., Kovalenko, V. (2018). Definition of the aging process parameters for nickel hydroxide in the alkaline medium. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2 (12 (92)), 54–60. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.127764>
  49. Burmistr, M. V., Boiko, V. S., Lipko, E. O., Gerasimenko, K. O., Gomza, Y. P., Vesnin, R. L. et al. (2014). Antifriction and Construction Materials Based on Modified Phenol-Formaldehyde Resins Reinforced with Mineral and Synthetic Fibrous Fillers. Mechanics of Composite Materials, 50 (2), 213–222. doi: <https://doi.org/10.1007/s11029-014-9408-0>
  50. Kovalenko, V., Kotok, V. (2019). Anionic carbonate activation of layered ( $\alpha+\beta$ ) nickel hydroxide. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3 (6 (99)), 44–52. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.169461>
  51. Kovalenko, V., Kotok, V. (2019). Influence of the carbonate ion on characteristics of electrochemically synthesized layered ( $\alpha+\beta$ ) nickel hydroxide. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1 (6 (97)), 40–46. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.155738>
  52. Vasserman, I. N. (1980). Himicheskoe osazhdenie iz rastvorov. Leningrad: Himiya, 208.
  53. Li, Q., Ni, H., Cai, Y., Cai, X., Liu, Y., Chen, G. et al. (2013). Preparation and supercapacitor application of the single crystal nickel hydroxide and oxide nanosheets. Materials Research Bulletin, 48 (9), 3518–3526. doi: <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2013.05.049>
  54. Fang, B., Gu, A., Wang, G., Li, B., Zhang, C., Fang, Y., Zhang, X. (2009). Synthesis hexagonal B-Ni(OH)<sub>2</sub> nanosheets for use in electrochemistry sensors. Microchimica Acta, 167 (1-2), 47–52. doi: <https://doi.org/10.1007/s00604-009-0213-8>
  55. Gourrier, L., Deabate, S., Michel, T., Paillet, M., Hermet, P., Bantignies, J.-L., Henn, F. (2011). Characterization of Unusually Large “Pseudo-Single Crystal” of  $\beta$ -Nickel Hydroxide. The Journal of Physical Chemistry C, 115 (30), 15067–15074. doi: <https://doi.org/10.1021/jp203222t>
  56. Liu, C., Li, Y. (2009). Synthesis and characterization of amorphous  $\alpha$ -nickel hydroxide. Journal of Alloys and Compounds, 478 (1-2), 415–418. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2008.11.049>
  57. Kotok, V., Kovalenko, V. (2017). The electrochemical cathodic template synthesis of nickel hydroxide thin films for electrochromic devices: role of temperature. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2 (11 (86)), 28–34. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.97371>
  58. Kotok, V., Kovalenko, V. (2020). A study of the increased temperature influence on the electrochromic and electrochemical characteristics of Ni(OH)<sub>2</sub>-PVA composite films. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3 (6 (105)), 6–12. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.205352>
  59. Li, Y., Yang, Q., Yao, J., Zhang, Z., Liu, C. (2009). Effect of synthesis temperature on the phase structure and electrochemical performance of nickel hydroxide. Ionics, 16 (3), 221–225. doi: <https://doi.org/10.1007/s11581-009-0397-2>
  60. Ramesh, T. N., Vishnu Kamath, P. (2008). Temperature-induced control over phase selection among hydroxides of nickel. Bulletin of Materials Science, 31 (2), 169–172. doi: <https://doi.org/10.1007/s12034-008-0029-x>
  61. Zhang, W. H., Guo, X. D., He, J., Qian, Z. Y. (2008). Preparation of Ni(II)/Ti(IV) layered double hydroxide at high supersaturation. Journal of the European Ceramic Society, 28 (8), 1623–1629. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2007.11.016>
  62. He, J., Wei, M., Li, B., Kang, Y., Evans, D. G., Duan, X. (2006). Preparation of Layered Double Hydroxides. Structure and Bonding, 89–119. doi: [https://doi.org/10.1007/430\\_006](https://doi.org/10.1007/430_006)
  63. Yang, L.-X., Zhu, Y.-J., Tong, H., Liang, Z.-H., Li, L., Zhang, L. (2007). Hydrothermal synthesis of nickel hydroxide nanostructures in mixed solvents of water and alcohol. Journal of Solid State Chemistry, 180 (7), 2095–2101. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2007.05.009>
  64. Solovov, V., Kovalenko, V., Nikolenko, N., Kotok, V., Vlasova, E. (2017). Influence of temperature on the characteristics of Ni(II), Ti(IV) layered double hydroxides synthesised by different methods. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1 (6 (85)), 16–22. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.90873>

DOI: 10.15587/1729-4061.2020.210710

**TEMPERATURE EFFECT ON THE THERMAL-PHYSICAL PROPERTIES OF FIRE-PROTECTIVE MINERAL WOOL CLADDING OF STEEL STRUCTURES UNDER THE CONDITIONS OF FIRE RESISTANCE TESTS (p. 39–45)**

**Serhii Pozdieiev**

Institute of Public Administration and Research in Civil Protection, Kyiv, Ukraine

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9085-0513>

**Oleksandr Nuianzin**

Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes of National University of Civil Defence of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2527-6073>

**Oksana Binetska**

Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes of National University of Civil Defence of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6975-1353>

**Olena Borsuk**

Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes of National University of Civil Defence of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5759-4506>

**Andrii Shvydenko**

Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes of National University of Civil Defence of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7708-8595>

**Bogdan Alimov**

Institute of Public Administration and Research in Civil Protection, Kyiv, Ukraine

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0248-7003>

The value of the thermal conductivity coefficient depending on the temperature of the samples of steel rod fragments with fire-retardant cladding has been determined in the present research.

The thermal conductivity coefficient of mineral wool fire-retardant cladding was determined; special patterns of its dependence on temperature were revealed. This is explained by the thermal decomposition with the release of thermal energy of inclusions between the fibers of mineral wool and its fibers at a temperature of 750 °C. The apparent minimum of the thermal conductivity factor for fire-retardant mineral wool cladding with a thickness of more than 50 mm is observed at a temperature of about 100 °C. This happens due to the fact that at this temperature the free moisture contained between the fibers of the mineral wool evaporates.

Generalized temperature dependence of the thermal conductivity coefficient of mineral wool fire-retardant cladding has also been derived, in a tabular form. It can be used for calculating the temperature in steel structures with such fire protection. The thickness range for application is up to 80 mm for the specific heat capacity of 1,000 J/(kg °C) and a density of 200 kg/m<sup>3</sup>.

It is shown how the obtained dependence can be used for predicting heating in steel structures with fire-retardant mineral wool cladding. The relative error between the calculated and experimental data was calculated. The Cochran, Student, and Fischer criteria for the results of temperature calculation in steel structures with fire-retardant mineral wool cladding between the calculated and experimental data accept values that do not exceed the tabular quantities. This means that the results of the calculation using the obtained temperature dependence of the thermal conductivity coefficient are adequate

**Keywords:** thermal conductivity coefficient, thermal-physical parameters, steel constructions, fire protection cladding, fire protection test.

## References

- Khomenko, O. H. (2018). Stalevi konstruktsii u budivnytstvi. Hlukhiv, 347.
- DSTU B V.1.1-17:2007. Vohnezakhysni pokryttia dlia budivnykh nesuchykh konstruktsiy. Metod vyznachennia vohnezakhysnoi zdatnosti. (ENV 13381-4:2002) (2007). Kyiv: Ukrarkhbudinorm, 62.
- EN 1993-1-2 (English): Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC].
- Akaa, O. U., Abu, A., Spearpoint, M., Giovinazzi, S. (2016). A group-AHP decision analysis for the selection of applied fire protection to steel structures. *Fire Safety Journal*, 86, 95–105. doi: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2016.10.005>
- Wang, Y. C., Kodur, V. K. R. (2000). Research Toward Use of Unprotected Steel Structures. *Journal of Structural Engineering*, 126 (12), 1442–1450. doi: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(2000\)126:12\(1442\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(2000)126:12(1442))
- Bilotta, A., de Silva, D., Nigro, E. (2016). Tests on intumescent paints for fire protection of existing steel structures. *Construction and Building Materials*, 121, 410–422. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.144>
- Xue, Y., Zhang, S., Yang, W. (2014). Influence of expanded vermiculite on fire protection of intumescent fireproof coatings for steel structures. *Journal of Coatings Technology and Research*, 12 (2), 357–364. doi: <https://doi.org/10.1007/s11998-014-9626-3>
- E Silva, V. P., Fakury, R. H. (2002). Brazilian standards for steel structures fire design. *Fire Safety Journal*, 37 (2), 217–227. doi: [https://doi.org/10.1016/s0379-7112\(01\)00044-3](https://doi.org/10.1016/s0379-7112(01)00044-3)
- Pignatta e Silva, V. (2005). Determination of the steel fire protection material thickness by an analytical process – a simple derivation. *Engineering Structures*, 27 (14), 2036–2043. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2005.05.018>
- Mohammadi, S., Shariatpanahi, H., Taromi, F. A. (2015). Influence of hybrid functionalized graphite nanoplatelets-tripolyphosphate on improvement in fire protection of intumescent fire resistive coating for steel structures. *Polymer Degradation and Stability*, 120, 135–148. doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2015.06.017>
- Watolla, M.-B., Gluth, G. J. G., Sturm, P., Rickard, W. D. A., Krüger, S., Schartel, B. (2017). Intumescent geopolymer-bound coatings for fire protection of steel. *Journal of Ceramic Science and Technology*, 8 (3), 351–364. doi: <http://doi.org/10.4416/JCST2017-00035>
- Yew, M. C., Ramli Sulong, N. H. (2010). Effect of Epoxy Binder on Fire Protection and Bonding Strength of Intumescent Fire Protective Coatings for Steel. *Advanced Materials Research*, 168-170, 1228–1232. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.168-170.1228>
- Gardner, L. (2007). Stainless steel structures in fire. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*, 160 (3), 129–138. doi: <https://doi.org/10.1680/stbu.2007.160.3.129>
- Guoqiang, L. (2000). The development of fire-resistant design method for steel structures. *Steel Construction*, 3.
- Nuianzin, O., Tyshchenko, O., Zhartovskyi, S., Zaika, P., Peregin, A. (2019). The research of carrying capacity of reinforced concrete walls under uneven warming. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 708, 012063. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/708/1/012063>
- Nuianzin, O., Pozdieiev, S., Hora, V., Shvydenko, A., Samchenko, T. (2018). Experimental study of temperature mode of a fire in a cable tunnel. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (10 (93)), 21–27. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.131792>
- EN 1991-1-2:2012: Eurocode 1. Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire Part 1-2: General rules - Structural fire design. Brussels.
- Franchuk, A. U. (1969). *Tablitsy teplotekhnicheskikh pokazateley stroitel'nykh materialov*. Moscow: NIISF, 142.

DOI: 10.15587/1729-4061.2020.206568

## IN SITU FORMATION OF MOLYBDENUM BORIDES AT HARDFACING BY ARC WELDING WITH FLUX-CORED WIRES CONTAINING A REACTION MIXTURE OF B<sub>4</sub>C/MO (p. 46–51)

**Pavlo Prysyazhnyuk**

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas,  
Ivano-Frankivsk, Ukraine

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8325-3745>

**Liubomyr Shlapak**

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas,  
Ivano-Frankivsk, Ukraine

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3640-7702>

**Olexandr Ivanov**

College of Electronic Devices IFNTUOG, Ivano-Frankivsk, Ukraine

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4678-7956>

**Sergiy Korniy**

Karpenko Physico-Mechanical Institute of the National Academy  
of Sciences of Ukraine, Lviv, Ukraine

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3998-2972>

**Lyubomyr Lutsak**

Limited Liability Company Interdisciplinary Research and  
Production Center “Epsilon LTD”, Ivano-Frankivsk, Ukraine

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8111-5461>

**Myroslav Burda**

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas,  
Ivano-Frankivsk, Ukraine

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8450-0720>



**Iryna Hnatenko**

V. Bakul Institute for Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine  
**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-9466-0215>

**Vasyl Yurkiv**

The E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine  
**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-8440-0391>

This paper reports a study into the formation of the phase composition, structure, and properties of arc welding coatings by the flux-cored electrode materials from the Fe-Mo-B-C system. The welding alloys were applied using the flux-cored arc welding (FCAW) electrodes, which consisted of a shell made from the low-carbon steel filled with a reaction powder mixture that contained boron carbide and molybdenum in a ratio of 1:1.

The calculation of the phase composition of alloys that correspond to the surfaced layers by a CALPHAD method using the Thermo-Calc OpenCalphad software shows that under the equilibrium conditions the boride phases of molybdenum and ferrite cannot co-exist. The main phase of such alloys is a  $\text{FeMo}_2\text{B}_2$  compound, which forms the eutectics with austenite. Given that the eutectic structures with borides are characterized by high brittleness, the introduction of components was conducted in the form of a reaction mixture in order to obtain the in situ formed boride phases in the form of separate structural components.

Analysis of the results of studying the microstructure and phase composition of coatings reveals that they consist of three main structural components: the eutectic ( $\text{FeMo}_2\text{B}_2$ +ferrite) and the grains of molybdenum tetraboride  $\text{MoB}_4$ . Thus, under the conditions of arc welding using the reaction mixture, an irregular structure is formed, which is favorable in terms of ensuring wear resistance due to the high microhardness of  $\text{MoB}_4 > 27$  GPa.

The hardness of the coatings obtained is at the level of 63–65 HRC, and the wear resistance is higher compared to standard high-chromium alloys (grades T620 and T590) by 2–2.5 times. This makes it possible to recommend the coating of a given system for hardfacing the working surfaces of equipment in the coal, processing, woodworking industries, etc., where abrasive wear is the dominant type of surface wear.

**Keywords:** powder wire, hardfacing, molybdenum borides, reaction synthesis, abrasive wear.

**References**

- Tang, H., Gao, X., Zhang, J., Gao, B., Zhou, W., Yan, B. et. al. (2019). Boron-Rich Molybdenum Boride with Unusual Short-Range Vacancy Ordering, Anisotropic Hardness, and Superconductivity. *Chemistry of Materials*, 32 (1), 459–467. doi: <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.9b04052>
- Liang, Y., Yuan, X., Fu, Z., Li, Y., Zhong, Z. (2012). An unusual variation of stability and hardness in molybdenum borides. *Applied Physics Letters*, 101 (18), 181908. doi: <https://doi.org/10.1063/1.4764547>
- Mohrbacher, H. (2018). Property Optimization in As-Quenched Martensitic Steel by Molybdenum and Niobium Alloying. *Metals*, 8 (4), 234. doi: <https://doi.org/10.3390/met8040234>
- Ou Yang, X., Yin, F., Hu, J., Zhao, M., Liu, Y. (2017). Experimental investigation and thermodynamic calculation of the B-Fe-Mo ternary system. *Calphad*, 59, 189–198. doi: <https://doi.org/10.1016/j.calphad.2017.10.007>
- Lutsak, D. L., Prisyazhnyuk, P. M., Karpash, M. O., Pylypiv, V. M., Kotsyubynsky, V. O. (2016). Formation of structure and properties of composite coatings  $\text{TiB}_2$ -TiC-Steel obtained by overlapping of electric-arc surfacing and self-propagating High-Temperature Synthesis. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, 38 (9), 1265–1278. doi: <https://doi.org/10.15407/mfint.38.09.1265>
- Wang, T., Gwalani, B., Shukla, S., Frank, M., Mishra, R. S. (2019). Development of in situ composites via reactive friction stir processing of Ti– $\text{B}_4\text{C}$  system. *Composites Part B: Engineering*, 172, 54–60. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.05.067>
- Han, T., Xiao, M., Zhang, Y., Shen, Y. (2019). Laser cladding composite coatings by Ni–Cr–Ti– $\text{B}_4\text{C}$  with different process parameters. *Materials and Manufacturing Processes*, 34 (8), 898–906. doi: <https://doi.org/10.1080/10426914.2019.1605172>
- Tijo, D., Masanta, M. (2019). Effect of Ti/ $\text{B}_4\text{C}$  ratio on the microstructure and mechanical characteristics of TIG cladded TiC– $\text{TiB}_2$  coating on Ti-6Al-4V alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 266, 184–197. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.11.005>
- Yi, M., Zhang, X., Liu, G., Wang, B., Shao, H., Qiao, G. (2018). Comparative investigation on microstructures and mechanical properties of (TiB + TiC)/Ti-6Al-4V composites from Ti– $\text{B}_4\text{C}$ -C and Ti– $\text{TiB}_2$ -TiC systems. *Materials Characterization*, 140, 281–289. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.04.010>
- Zhang, M., Huo, Y., Huang, M., Fang, Y., Zou, B. (2015). *In situ* synthesis and formation mechanism of ZrC and  $\text{ZrB}_2$  by combustion synthesis from the Co-Zr– $\text{B}_4\text{C}$  system. *Journal of Asian Ceramic Societies*, 3 (3), 271–278. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jascer.2015.05.005>
- Zhang, M., Huo, Y., Huang, M., Fang, Y., Wang, G. (2015). The effect of  $\text{B}_4\text{C}$  particle size on the reaction process and product in the Cu–Zr– $\text{B}_4\text{C}$  system. *Journal of Asian Ceramic Societies*, 3 (1), 38–43. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jascer.2014.10.006>
- Kaidash, O. N., Turkevich, V. Z., Ivzhenko, V. V., Itsenko, P. P., Tkach, V. N. (2018). The Influence of in situ Formed  $\text{TiB}_2$ – $\text{VB}_2$  Borides on the Structure and Properties of Hot-Pressed  $\text{B}_4\text{C}$ –( $\text{TiH}_2$ –VC) Ceramic System. *Journal of Superhard Materials*, 40 (6), 365–373. doi: <https://doi.org/10.3103/s1063457618060011>
- Qu, K. L., Wang, X. H., Wang, Z. K. (2016). Characterization of VC–VB particles reinforced Fe-based composite coatings produced by laser cladding. *Surface Review and Letters*, 23 (04), 1650019. doi: <https://doi.org/10.1142/s0218625x16500190>
- Zhang, M., Luo, S. X., Liu, S. S., Wang, X. H. (2018). Effect of Molybdenum on the Wear Properties of (Ti,Mo)C– $\text{TiB}_2$ – $\text{Mo}_2\text{B}$  Particles Reinforced Fe-Based Laser Cladding Composite Coatings. *Journal of Tribology*, 140 (5). doi: <https://doi.org/10.1115/1.4039411>
- Wang, Y., Zhang, H., Jiao, S., Chou, K., Zhang, G. (2020). A facile pathway to prepare molybdenum boride powder from molybdenum and boron carbide. *Journal of the American Ceramic Society*, 103 (4), 2399–2406. doi: <https://doi.org/10.1111/jace.16984>
- Shlapak, L. S., Shihab, T., Prisyazhnyuk, P. M., Yaremiv, I. P. (2016). Structure Formation of the Chromium Carbide-Based Cermet with Copper–Nickel–Manganese Binder. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, 38 (7), 969–980. doi: <https://doi.org/10.15407/mfint.38.07.0969>
- Sundman, B., Kattner, U. R., Palumbo, M., Fries, S. G. (2015). OpenCalphad - a free thermodynamic software. *Integrating Materials and Manufacturing Innovation*, 4 (1), 1–15. doi: <https://doi.org/10.1186/s40192-014-0029-1>
- Hillert, M., Qiu, C. (1992). A reassessment of the Fe–Cr–Mo–C system. *Journal of Phase Equilibria*, 13 (5), 512–521. doi: <https://doi.org/10.1007/bf02665764>
- Miettinen, J., Visuri, V. V., Farbitius, T., Vassilev, G. (2020). Thermodynamic Description of Ternary Fe–B–X Systems. Part 7: Fe–B–C. *Archives of Metallurgy and Materials*, 65 (2), 923–933. doi: <http://doi.org/10.24425/amm.2020.132840>
- Shihab, T., Prisyazhnyuk, P., Semyanyk, I., Anrusyshyn, R., Ivanov, O., Troshchuk, L. (2020). Thermodynamic Approach to the Development and Selection of Hardfacing Materials in Energy Industry. *Management Systems in Production Engineering*, 28 (2), 84–89. doi: <https://doi.org/10.2478/mspe-2020-0013>

DOI: 10.15587/1729-4061.2020.209761

## AN ANALYSIS OF USING THE METHOD OF TWO-DIMENSIONAL DIGITAL IMAGE CORRELATION IN GLASS COLUMN RESEARCH (p. 52–59)

**Bogdan Demchyna**

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3498-1519>**Mykhailo Surmai**

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5381-6500>**Roman Tkach**

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5866-3796>**Vasylyna Hula**

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5774-966X>**Roman Kozak**

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9617-5128>

The study of glass multilayer columns made of ordinary glass using triplexing technology. The main disadvantage of using ordinary glass is the fragile nature of its destruction, it breaks instantly. To avoid this effect, triplexing technology is used: the glass is joined in several layers with an EVASAFE polymer film (Bridgestone, Japan), after which the columns were heated to a temperature of 130 °C and kept for 30 minutes. The film material is an elastomer (a polymer with highly elastic properties in a wide temperature range). This allowed restraining parts of fragments of glass structures, making them plastic inside the bonding plane, increased their reliability, prevented the instantaneous opening of cracks in the depth of the section.

A method for studying multilayer glass columns for central-axial compression using the method of two-dimensional digital image correlation is developed. Two series of prototypes were manufactured and tested. The tests were performed on a hydraulic press.

The model of the destruction of glass columns of different cross-section is investigated and described. The accuracy of the digital image correlation method using two-dimensional correlation for glass centrally compressed columns is estimated. The results of the digital image correlation method with the results of measurements of absolute deformations by mechanical devices are compared. Based on the analysis of the results, the dependences of relative deformations  $\varepsilon$  on the applied load  $N$  were determined using the digital image correlation method. The dependences of relative deformations  $\varepsilon$  on normal stresses  $\sigma=N/A$  and dependences of relative deformations  $\varepsilon$  on the outer glass surfaces on the applied load  $N$  are determined.

**Keywords:** digital image correlation, multilayer glass column, triplex, sheet glass.

**References**

- Hyatt, P., Hyatt, J. (2004). *Great Glass Buildings: 50 Modern Classics*. Images Publishing, 240.
- Kovalchuk, Y. I. (2012). Possibilities for the use of the method of digital image correlation to study the building structures. *Zbirnyk naukovykh prats (haluzeve mashynobuduvannya, budivnytstvo)*, 5 (35), 92–100.
- Koval, P. M., Ivanytskiy, Ya. L., Kovalchuk, Ya. I., Molkov, Yu. V. (2013). Doslidzhennia napruzhenno-deformovanoho stanu betonnykh zrazkiv metodom tsyfrovoy koreliatsiyi zobrazhen. *Avtomobilni dorohy i dorozhne budivnytstvo*, 89, 185–192. Available at: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/adidb\\_2013\\_89\\_27](http://nbuv.gov.ua/UJRN/adidb_2013_89_27)
- Maksymenko, O. P., Ivanyts'kyi, Y. L., Hvozdyuk, M. M. (2015). Evaluation of the Stiffness of a Composite–Metal Joint by the Method of Digital Image Correlation. *Materials Science*, 50 (6), 817–823. doi: <https://doi.org/10.1007/s11003-015-9788-x>
- Ngeljaratan, L., Moustafa, M. (2017). Digital Image Correlation for Dynamic Shake Table Test Measurements. 7th International Conference on Advances in Experimental Structural Engineering. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/326016564\\_Digital\\_Image\\_Correlation\\_for\\_Dynamic\\_Shake\\_Table\\_Test\\_Measurements](https://www.researchgate.net/publication/326016564_Digital_Image_Correlation_for_Dynamic_Shake_Table_Test_Measurements)
- Blenkinsopp, R., Harland, A., Price, D., Lucas, T., Roberts, J. (2012). A Method to Measure Dynamic Dorsal Foot Surface Shape and Deformation During Linear Running Using Digital Image Correlation. *Procedia Engineering*, 34, 266–271. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.04.046>
- Schreier, H., Orteu, J.-J., Sutton, M. A. (2009). *Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications*. Springer. doi: <https://doi.org/10.1007/978-0-387-78747-3>
- Demchyna, B. H., Cherevko, M. V. (2015). Doslidzhennia mitsnosti ta deformatyvnosti sklianykh balok z vertykalnym rozmishchenniam shariv. *Visnyk Natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnika». Teoriya i praktyka budivnytstva*, 823, 113–116.
- Osadchuk, T., Demchyna, B. (2017). Strain measurement of laminated glass plates using digital image correlation. *Komunalne hospodarstvo mist. Seriya: Tekhnichni nauky ta arkhitektura*, 134, 153–163.
- GOM Correlate Profesional V8 SR1 Manual Basic. GOM mbH. Available at: [http://213.8.45.88/PDF/gom\\_correlate\\_prof\\_basic\\_v8.pdf](http://213.8.45.88/PDF/gom_correlate_prof_basic_v8.pdf)
- Jones, E. M. C., Iadicola, M. A. (Eds.) (2018). *A Good Practices Guide for Digital Image Correlation*. International Digital Image Correlation Society. doi: <https://doi.org/10.32720/idics/gpg.ed1>
- Bomarito, G. F., Hochhalter, J. D., Ruggles, T. J., Cannon, A. H. (2017). Increasing accuracy and precision of digital image correlation through pattern optimization. *Optics and Lasers in Engineering*, 91, 73–85. doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2016.11.005>
- Datsiou, K. C., Overend, M. (2018). Weibull parameter estimation and goodness-of-fit for glass strength data. *Structural Safety*, 73, 29–41. doi: <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2018.02.002>
- Haldimann, M., Luible, A., Overend, M. (2008). Structural use of glass. *IABSE*, 215.
- Sutton, M. A., Yan, J. H., Tiwari, V., Schreier, H. W., Orteu, J. J. (2008). The effect of out-of-plane motion on 2D and 3D digital image correlation measurements. *Optics and Lasers in Engineering*, 46 (10), 746–757. doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2008.05.005>
- Lee, J., Kim, E., Gwon, S., Cho, S., Sim, S.-H. (2019). Uniaxial Static Stress Estimation for Concrete Structures Using Digital Image Correlation. *Sensors*, 19 (2), 319. doi: <https://doi.org/10.3390/s19020319>
- Catt, S., Fick, B., Hoskins, M., Praski, J., Baqersad, J. (2019). Development of a Semi-autonomous Drone for Structural Health Monitoring of Structures Using Digital Image Correlation (DIC). *Proceedings of the 36th IMAC, A Conference and Exposition on Structural Dynamics*, 49–57. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-74476-6\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-319-74476-6_7)
- Demchyna, B. H., Surmai, M. I., Tkach, R. O. (2018). Pat. No. 134878 UA. Sposib vyprovuvannya sklianoi kolony. No. u201812746; declared: 21.12.2018; published: 10.06.2019, Bul. No. 11.
- Ab Ghani, A. F., Ali, M. B., DharMalingam, S., Mahmud, J. (2016). Digital Image Correlation (DIC) Technique in Measuring Strain Using Opensource Platform Ncorr. *Journal of Advanced Research in Applied Mechanics*, 26 (1), 10–21. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/309463775\\_Digital\\_Image\\_Correlation\\_DIC\\_Technique\\_in\\_Measuring\\_Strain\\_Using\\_Opensource\\_Platform\\_Ncorr](https://www.researchgate.net/publication/309463775_Digital_Image_Correlation_DIC_Technique_in_Measuring_Strain_Using_Opensource_Platform_Ncorr)
- Demchyna, B., Surmai, M., Tkach, R. (2019). The experimental study of glass multilayer columns using digital image correlation. *Archives of Materials Science and Engineering*, 1 (96), 32–41. doi: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0013.1990>

DOI: 10.15587/1729-4061.2020.210307

**DEVELOPING THE MODIFICATION OF NICKEL CATHODES FOR APPLYING THE ION-PLASMA COATINGS ON THE PARTS OF AIRCRAFT ENGINES (p. 6–13)**

V. Yefanov, O. Ovchinnikov, O. Dzhugan, I. Petrik, D. Raspornia, O. Kapustian, Ye. Saprykin

Досліджено вплив високоактивних, поверхнево-активних модифікуючих елементів як Y, Hf і La на структуру і властивості катодів системи Ni–Cr–Al, які використовуються для нанесення жаростійких покриттів робочих лопаток газотурбінних двигунів. Y, Hf і La вводяться з метою формування нанорозмірних виділень фаз, що стабілізують структуру сплаву.

З метою отримання катодів необхідної якості обраний метод вакуумно-дугового гарнісажного переплаву. Обраний спосіб дозволяє використовувати для виготовлення злитків сировину різної дисперсності (у вигляді порошків або чушок). Підготовку шихти здійснювали шляхом механічного подрібнення матеріалів різними методами (порізка та подрібнення).

Показано, що введення до складу катодів таких елементів як Y і La має схоже вплив на процеси структуроутворення. Встановлено, що при введенні Hf структура отриманих катодів характеризується більшим ступенем однорідності. Також відзначено позитивний вплив Hf на рівномірність розподілу легуючих елементів (Al, Cr) в об'ємі матеріалу в порівнянні зі зразками сплаву модифікованих Y і La.

Показано, що введення Hf дозволило досягти більш високих якісних показників в порівнянні з Y і La. Аналіз структури покриттів показав, що зразки з Hf характеризуються більшим ступенем гомогенності і меншою кількістю дефектів, що особливо важливо при нанесенні покриттів великої товщини (понад 40 мкм). Встановлено, що введення Hf дозволяє наносити покриття товщиною до 90 мкм. за рахунок отримання менш дефектної структури. Встановлено, що модифікування Hf підвищує адгезію покриття з підкладкою, а також дозволяє досягти максимальної рівномірності розподілу легуючих елементів по всій товщині покриття.

**Ключові слова:** газотурбінний двигун, лопатка, склад, модифікування, катод, покриття, структура, адгезія, дефект, властивості.

DOI: 10.15587/1729-4061.2020.209722

**A STUDY OF THE PHASE-STRUCTURAL ENGINEERING POSSIBILITIES OF COATINGS ON D16 ALLOY DURING MICRO-ARC OXIDATION IN ELECTROLYTES OF DIFFERENT TYPES (p. 14–23)**

V. Subbotina, O. Sobol, V. Belozarov, O. Subbotin, Yu. Smyrnova

Досліджено вплив умов електролізу з різними складами електроліту на кінетику росту, фазово-структурний стан і твердість покриттів, отриманих мікродуговим окисдуванням (МДО) на алюмінієвому сплаві Д16 (основа – алюміній, основна домішка Cu). Аналіз отриманих результатів показав, що вибір типу електроліту і умов протікання МДО-процесу дозволяє в широких межах змінювати кінетику росту і фазово-структурний стан покриття на алюмінієвому сплаві Д16. Для всіх типів електролітів зі збільшенням вмісту складових КОН, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> або КОН+Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> підвищується швидкість росту МДО-покриттів. Встановлено, що в МДО-покриттях, одержуваних в лужному (КОН) електроліті, формується двофазне (γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> і α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> фази) кристалічний стан. Збільшення концентрації КОН призводить до збільшення відносного вмісту α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> фази (корунду). При формуванні в силікатному електроліті фазовий склад МДО-покриттів зі збільшенням вмісту рідкого скла (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) змінюється від суміші γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> фази і муліта (3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·2SiO<sub>2</sub>) до рентгеноаморфної фази. Використання комплексного електроліту призводить до двофазного стану покриття з більшим (у порівнянні з лужним електролітом) зрушенням перетворення γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>→α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в бік утворення α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> фази. Визначено, що значення твердості корелює зі вмістом α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> фази в МДО-покритті, досягаючи найбільшої величини 1620 кг/мм<sup>2</sup> при найбільшому вмісті (близько 80 об. %) α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> фази.

Встановлено два типи залежностей товщини покриття від кількості електрики яке пройшло. Для кількості електрики яке пройшло 10–50 А-год/дм<sup>2</sup> залежність товщини визначається, як 4.2 мкм/(А-годину/дм<sup>2</sup>), що передбачає базовий механізм електрохімічного окислення при утворенні покриття. Для кількості електрики яке пройшло 50–120 А-годину/дм<sup>2</sup> залежність товщини визначається значно меншою величиною 1.1 мкм/(А-годину/дм<sup>2</sup>). Це передбачає перехід до іншого механізму формування покриття – утворення покриття за участі компонентів електролізу.

**Ключові слова:** структурна інженерія, мікродугове окисдування, сплав Д16, тип електроліту, кінетика росту, фазовий склад.

DOI: 10.15587/1729-4061.2020.210773

**INFLUENCE OF PHASE TRANSITIONS ON THE TEMPERATURE BEHAVIOR OF PHOTOLUMINESCENCE SPECTRA IN A (N(CH<sub>3</sub>)<sub>4</sub>)<sub>2</sub>MNCL<sub>4</sub> CRYSTAL (p. 24–30)**

H. Pchuk, A. Kashuba, I. Kuno, S. Sveleba, T. Malyi, R. Petrus, V. Tsiurma, I. Semkiv

Монокристалічні зразки (N(CH<sub>3</sub>)<sub>4</sub>)<sub>2</sub>MnCl<sub>4</sub> було вирощено із водного розчину шляхом повільного випаровування солей при кімнатній температурі. Вплив фазових переходів на температурну поведінку спектрів фотолюмінесценції, а також спектрів збудження і часу затухання смуги свідчення 539 нм вивчається. Досліджено спектри свідчення фотолюмінесценції полікристалічного зразка (N(CH<sub>3</sub>)<sub>4</sub>)<sub>2</sub>MnCl<sub>4</sub>. Виявлено смугу свідчення локалізовану при 520 нм яка викликана свідченням іона Mn<sup>2+</sup> і відповідає переходу <sup>4</sup>T<sub>1</sub>→<sup>6</sup>A<sub>1</sub>. Температурна поведінка спектрів фотолюмінесценції (4.5-300 К) кристала (N(CH<sub>3</sub>)<sub>4</sub>)<sub>2</sub>MnCl<sub>4</sub> проявляє аномалії їх параметрів в точках фазових переходів. Температурні залежності спектрів фотолюмінесценції кристала (N(CH<sub>3</sub>)<sub>4</sub>)<sub>2</sub>MnCl<sub>4</sub> підтверджують наявність фазових переходів в інтервалі температур від 100 до 300 К. Наведено спектри збудження для смуги люмінесценції 539 нм і їх температурну поведінку (4.5-300 К). Смуги розташовані близько 2.93 і 2.96 еВ швидко гасяться з температурою, так що при температурах вище 170 і 270 К смуги 2.96 і 2.93 еВ

не спостерігається, відповідно. Піки в спектрах збудження відповідають електронним переходам від основного стану  ${}^6A_1 \text{Mn}^{2+}$  до різних збуджених станів  $\text{MnCl}_4^{2-}$  ( $T_d$ ). Їх енергії збудження пояснюються на основі моделі кристалів за допомогою діаграм Танабе-Сугано. Параметри Рака В і С, а також розщеплення кристалічного поля  $\Delta$  розраховане на основі Танабе-Сугано діаграм для  $d^5$  електронної конфігурації. Досліджено температурну поведінку часу загасання смуги фотолюмінесценції 539 нм. Отриманий час загасання смуги фотолюмінесценції зростає з ростом температури. Кінетика загасання смуги фотолюмінесценції 539 нм добре описується експоненційною залежністю.

**Ключові слова:** фотолюмінесценція, спектри свічення, спектри збудження, фазові переходи.

**DOI: 10.15587/1729-4061.2020.194610**

### **CHANGES IN THE NICKEL HYDROXIDE PROPERTIES UNDER THE INFLUENCE OF THERMAL FIELD *IN SITU* AND *EX SITU* DURING ELECTROCHEMICAL SYNTHESIS (p. 31–38)**

V. Kovalenko, V. Kotok

Гідроксид нікелю широко використовується в суперконденсаторах, лужних акумуляторах, для електрокаталітичного окиснення органічних забруднювачів. Найбільш перспективними через високу електрохімічну активність є зразки  $\text{Ni}(\text{OH})_2$  ( $\alpha+\beta$ ) шарової структури, синтезовані в щільному діафрагмовому електролізері (ЩДЕ). Вивчено вплив теплового поля на структурні характеристики шарового ( $\alpha+\beta$ )  $\text{Ni}(\text{OH})_2$ . Оцінку впливу проводили двома шляхами:

- 1) внутрішнє (*in situ*) охолодження безпосередньо в електролізері за рахунок охолодження катоду з тильної сторони;
- 2) зовнішнє (*ex situ*) нагрівання безпосередньо після електролізу при пропусканні через спіральний теплообмінник, нагрітий до 90 °С.

Кристалічна структура зразків вивчена методом рентенофазового аналізу. Показано, що базовий зразок, отриманий без зміни теплового поля, являє собою монофазну шарувату ( $\alpha+\beta$ ) структуру із високим вмістом  $\alpha$ -модифікації та градієнтним переходом від  $\alpha$  до  $\beta$  через ряд проміжних структур. Кристалічність зразка не висока. При внутрішньому охолодженні катоду відбувається зниження кристалічності та збільшення долі  $\alpha$ -модифікації. Зовнішнє нагрівання суспензії гідроксиду нікелю відразу після виходу із електролізера призводить до перекристалізації зразків з розпадом ( $\alpha+\beta$ ) шаруватої структури і формуванням  $\beta$ - $\text{Ni}(\text{OH})_2$  із високою кристалічністю. Виявлено, що при зовнішньому нагріванні протягом 6 хвилин не відбувається зміна кристалічної структури. Це пояснюється тим, що процес старіння гідроксиду нікелю при підвищеній температурі є кристалохімічним перетворенням, для якого характерна наявність індукційного періоду, протягом якого швидкість процесу мінімальна.

Таким чином, дослідження показана можливість управління типом кристалічної модифікації гідроксиду нікелю, що формується, та його кристалічністю шляхом зміни внутрішнього (*in situ*) чи зовнішнього (*ex situ*) теплового поля.

**Ключові слова:** гідроксид нікелю, шарова ( $\alpha+\beta$ ) структура, внутрішнє охолодження, зовнішнє нагрівання, старіння, індукційний період, щільний діафрагмовий електролізер.

**DOI: 10.15587/1729-4061.2020.210710**

### **TEMPERATURE EFFECT ON THE THERMAL-PHYSICAL PROPERTIES OF FIRE-PROTECTIVE MINERAL WOOL CLADDING OF STEEL STRUCTURES UNDER THE CONDITIONS OF FIRE RESISTANCE TESTS (p. 39–45)**

S. Pozdieiev, O. Nuianzin, O. Borsuk, O. Binetska, A. Shvydenko, B. Alimov

Проведеними дослідженнями визначено значення коефіцієнту теплопровідності в залежності від температури зразків фрагментів сталевих стержнів із вогнезахисним облицюванням.

Було визначено коефіцієнт теплопровідності мінераловатного вогнезахисного облицювання та виявлені особливості його залежності від температури. Пояснюється це термічним розкладанням із виділенням теплової енергії включень між волокнами мінеральної вати і її волокон при температурі 750 °С. Наявний мінімум коефіцієнта теплопровідності вогнезахисного мінераловатного облицювання товщиною більше як 50 мм приходить на температуру близько 100 °С. Це відбувається, оскільки при цій температурі випаровується вільна волога, яка міститься між волокнами мінеральної вати.

Також отримана узагальнена температурна залежність коефіцієнта теплопровідності мінераловатного вогнезахисного облицювання у табличній формі. Вона може бути використана для розрахунку температури у сталевих конструкціях із таким вогнезахистом. Діапазон товщини для застосування – до 80 мм для питомої теплоємності 1000 Дж/(кг·°С) та густини 200 кг/м<sup>3</sup>.

Показано, яким чином отримана залежність може бути використана для прогнозування нагрівання у сталевих конструкціях із вогнезахисним мінераловатним облицюванням. Була розрахована відносна похибка між розрахунковими та експериментальними даними. Критерії Кохрена, Стюдента та Фішера для результатів розрахунку температури у сталевих конструкціях із вогнезахисним мінераловатним облицюванням між розрахунковими та експериментальними даними мають величини, що не перевищують табличних значень. Це означає, що результати розрахунку при використанні отриманої температурної залежності коефіцієнта теплопровідності є адекватними.

**Ключові слова:** коефіцієнт теплопровідності, теплофізичні характеристики, сталеві конструкції, вогнезахисне облицювання, випробування на вогнестійкість.

**DOI: 10.15587/1729-4061.2020.206568**

### **IN SITU FORMATION OF MOLYBDENUM BORIDES AT HARDFACING BY ARC WELDING WITH FLUX-CORED WIRES CONTAINING A REACTION MIXTURE OF $\text{B}_4\text{C}/\text{MO}$ (p. 46–51)**

P. Prsyazhnyuk, L. Shlapak, O. Ivanov, S. Korniy, L. Lutsak, M. Burda, I. Hnatenko, V. Yurkiv

Досліджено формування фазового складу, структури і властивостей електродугових покриттів порошковими електродними матеріалами системи Fe-Mo-B-C. Сплави для наплавлення наносилися з використанням дугового наплавлення порошковими

дротами (FCAW), які склалися із оболонки з низьковуглецевої сталі, заповненої реакційною порошковою сумішшю, яка містила карбід бору та молібден у пропорції 1:1.

Розрахунок фазового складу сплавів, які відповідають наплавленим шарам методом CALPHAD з використанням програм Thermo-Calc OpenCalphad, показує, що за рівноважних умов боридні фази молібдену та ферит не можуть співіснувати. Основною фазою таких сплавів є сполука  $\text{FeMo}_2\text{B}_2$ , яка утворює евтектику із аустенітом. Враховуючи, що для евтектичних структур із боридами характерна висока крихкість, то введення компонентів проводилось у вигляді реакційної для отримання *in situ* сформованих боридних фаз у вигляді окремих структурних складових.

Аналіз результатів дослідження мікроструктури та фазового складу покриттів показує, що вони складаються із трьох основних структурних складових: фериту евтектики ( $\text{FeMo}_2\text{B}_2$ +фериту) та зерен тетрабориду молібдену  $\text{MoB}_4$ . Таким чином, за умов наплавлення реакційною сумішшю формується нерівноважна структура, яка є сприятливою із позиції забезпечення зносостійкості через високу мікротвердість  $\text{MoB}_4 > 27$  ГПа.

Твердість отриманих покриттів знаходиться на рівні 63–65 HRC, а зносостійкість є вищою порівняно із серійними високохромистими сплавами (марок T620 та T590) у 2–2,5 рази. Це дозволяє рекомендувати покриття даної системи для зміцнення робочих поверхонь обладнання у вугільній, переробній, деревообробній та ін. галузях, де домінуючим видом зношування поверхонь є абразивне.

**Ключові слова:** порошкова стрічка, електродугове наплавлення, бориди молібдену, реакційний синтез, абразивне зношування.

---

**DOI: 10.15587/1729-4061.2020.209761**

## **AN ANALYSIS OF USING THE METHOD OF TWO-DIMENSIONAL DIGITAL IMAGE CORRELATION IN GLASS COLUMN RESEARCH (p. 52–59)**

**B. Demchyna, M. Surmai, R. Tkach, V. Hula, R. Kozak**

Проведено дослідження скляних багатошарових колон, виготовлених зі звичайного скла за допомогою технології триплексування. Основним недоліком використання звичайного скла є крихкий характер його руйнування, тобто він руйнується миттєво. Для уникнення такого ефекту використовується технологія триплексування: скло з'єднується в кілька шарів за допомогою полімерної плівки EVASAFE (Bridgestone, Японія), після чого колони нагрівали до температури 130 °C і витримували протягом 30 хвилин. Матеріал плівки – це еластомер (полімер з високо еластичними властивостями в широкому температурному діапазоні). Це дозволило стримувати частини фрагментів скляних конструкцій, зробивши їх пластичними всередині площини склеювання, підвищило їх надійність, запобігло миттєвому розкриттю тріщин в глибокий переріз.

Створено методику дослідження скляних багатошарових колон на центрально-осьовий стиск із використанням методу двовимірної кореляції цифрових зображень. Виготовлено та випробувано дві серії дослідних зразків. Випробування проводили на гідравлічному пресі.

Досліджено та описано модель руйнування скляних колон різного поперечного перерізу. Проведена оцінка методу кореляції цифрових зображень при використанні двовимірної кореляції для скляних центрально стиснутих колон. Проведено порівняння результатів методу кореляції цифрових зображень із результатами замірів абсолютних деформацій механічними приладами. На основі аналізу результатів було визначено залежності відносних деформацій  $\epsilon$  від прикладеного навантаження  $N$  при використанні методу кореляції цифрових зображень. Визначено залежності відносних деформацій  $\epsilon$  від нормальних напружень  $\sigma = N/A$  та залежність відносних деформацій  $\epsilon$  на зовнішніх скляних поверхнях від прикладеного навантаження  $N$ .

**Ключові слова:** кореляція цифрових зображень, скляна багатошарова колона, триплекс, листове скло.