

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.231595

IMPROVING THE WEAR RESISTANCE OF HEAVY-DUTY ELEMENTS IN TRIBOMECHANICAL SYSTEMS BY A COMBINED LASER-THERMOCHEMICAL PROCESSING METHOD (p. 6–13)

Myroslav Kindrachuk

National Aviation University, Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0529-2466>**Oleksandr Dukhota**

National Aviation University, Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8091-1717>**Oleksandr Tisov**

National Aviation University, Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3023-9624>**Evgen Korbut**

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky», Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1221-4052>**Alina Yurchuk**

PhD, Associate Professor

National Aviation University, Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0119-3428>**Volodymyr Kharchenko**

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky», Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6383-5337>**Nila Naumenko**

State Enterprise “State Road Transport Research Institute”, Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3856-2645>

This paper reports an analysis of the state of tribological support in the aviation industry. The use of surface strengthening technologies to extend the resource of friction node parts has been prioritized. Modern combined technologies of nitriding and laser treatment of steel surfaces have been reviewed. The mechanism has been elucidated that damages steel 30H2NVFA in the jackscrew actuator of transport aircraft flaps, which occurs due to insufficient surface hardness of the material after a generally accepted heat treatment. Auger electron spectroscopy analysis revealed a high concentration of oxygen on the surface: up to 41.4 at. %; the friction surface carbonation has been detected, especially significant at the surface of the pitting damage. A comprehensive technology of surface strengthening by nitriding+laser selective hardening has been suggested. The radiation power was 1 KW, the diameter of the focus spot was 2.5 mm, and the pitch between the focus spot centers was 2.5 mm. The total area of laser processing was 70 %. The steel temperature exceeded A_{c3} and corresponded to the hardening temperature range. The depth of the nitrided layer increased to 400 μm , the maximum hardness on the surface was 1,350–1,380 $\text{HV}_{0.2}$. The formation of a solid nitrided layer with a thickness of 200–250 μm was observed, as well as a transition zone composed of column-shaped iron nitrides, which are introduced into the matrix material. As a result, a sharp gradient in the mechanical properties disappears. The tests confirmed that the wear resistance of the comprehensively treated surface was 2.1 times higher under dry friction conditions, and 4.5 times higher when lu-

bricated with the “Era” grease (RF), compared with the 30H2NVFA steel nitrided by the conventional technology. In addition, there was no fragile destruction of the surface; the interaction with oxygen reduced significantly.

Keywords: tribomechanical systems, friction nodes, nitrided steel, selective laser processing, wear resistance.

References

1. Toboła, D., Kania, B. (2018). Phase composition and stress state in the surface layers of burnished and gas nitrided Sverker 21 and Vanadis 6 tool steels. *Surface and Coatings Technology*, 353, 105–115. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.08.055>
2. Dixit, T., Singh, I., Prasad, K. E. (2019). Room and high temperature dry sliding wear behavior of Boron modified as-cast Ti-6Al-4V alloys against hardened steel. *Wear*, 420-421, 207–214. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.10.021>
3. Fryska, S., Słowik, J., Baranowska, J. (2019). Structure and mechanical properties of chromium nitride/S-phase composite coatings deposited on 304 stainless steel. *Thin Solid Films*, 676, 144–150. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2019.01.046>
4. Yasumaru, N., Sentoku, E., Miyazaki, K., Kiuchi, J. (2013). Femtosecond-laser-induced nanostructure formed on nitrided stainless steel. *Applied Surface Science*, 264, 611–615. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.10.076>
5. Kovacı, H., Seçer, Y. (2020). Improved tribological performance of AISI 316L stainless steel by a combined surface treatment: Surface texturing by selective laser melting and plasma nitriding. *Surface and Coatings Technology*, 400, 126178. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126178>
6. Pohrelyuk, I. M., Kindrachuk, M. V., Lavryś, S. M. (2016). Wear Resistance of VT22 Titanium Alloy After Nitriding Combined with Heat Treatment. *Materials Science*, 52 (1), 56–61. doi: <https://doi.org/10.1007/s11003-016-9926-0>
7. Kindrachuk, M., Shevchenko, A., Kryzhanovskiy, A. (2016). Improvement of the quality of TiC-Co system plasma coating by laser treatment. *Aviation*, 20 (4), 155–159. doi: <https://doi.org/10.3846/16487788.2016.1227551>
8. Marchuk, V., Kindrachuk, M., Tisov, O., Kornienko, A., Radko, O., Kharchenko, V. (2019). Stress-strained state of textured surfaces with selectively indented regions. *Functional Materials*, 26 (4), 773–778. doi: <https://doi.org/10.15407/fm26.04.773>
9. Panashenko, V. M., Podchernyaeva, I. A., Dukhota, A. I., Panasyuk, A. D. (2012). Structural and phase transformations on spark-laser coatings under fretting corrosion in air. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 51 (1-2), 112–120. doi: <https://doi.org/10.1007/s11106-012-9405-6>
10. Fedirko, V. M., Pohrelyuk, I. M., Luk'yanenko, O. H., Lavryś, 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>
11. Pashechko, M. I., Shyrokov, V. V., Duryahina, Z. A., Vasylyv, Kh. B. (2003). Structure and corrosion-mechanical properties of the surface layers of steels after laser alloying. *Materials Science*, 39, 108–117. doi: <https://doi.org/10.1023/A:1026134714719>
12. Holubets, V. M., Pashechko, M. I., Dzedzic, K., Borc, J., Tisov, A. V. (2020). Frictional Strength of Electric Spark Coatings from

- Powder Wires under Friction without Lubrication. *Journal of Friction and Wear*, 41 (5), 443–446. doi: <https://doi.org/10.3103/s1068366620050128>
13. Dykha, A., Marchenko, D., Artyukh, V., Zubiakhina-Khaiat, O., Kurepin, V. (2018). Study and development of the technology for hardening rope blocks by reeling. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (1 (92)), 22–32. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126196>
 14. Gorokh, G. G., Pashechko, M. I., Borc, J. T., Lozovenko, A. A., Kashko, I. A., Latos, A. I. (2018). Matrix coatings based on anodic alumina with carbon nanostructures in the pores. *Applied Surface Science*, 433, 829–835. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.10.117>
 15. Pashechko, M. I., Dziedzic, K., Mendyk, E., Jozwik, J. (2017). Chemical and Phase Composition of the Friction Surfaces Fe–Mn–C–B–Si–Ni–Cr Hardfacing Coatings. *Journal of Tribology*, 140 (2). doi: <https://doi.org/10.1115/1.4037953>
 16. Lyashenko, B. A., Solovyh, E. K., Mirnenko, V. I., Rutkovskiy, A. V., Chernovol, M. I.; Harchenko, V. V. (Ed.) (2010). *Optimizatsiya tekhnologii naneseniya pokrytiy po kriteriyam prochnosti i iznosostoykosti*. Kyiv, 193.
 17. Sorokatyi, R., Chernets, M., Dykha, A., Mikosyanchyk, O. (2019). Phenomenological Model of Accumulation of Fatigue Tribological Damage in the Surface Layer of Materials. *Mechanisms and Machine Science*, 3761–3769. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-20131-9_371
 18. Hryhorenko, G. M., Adeeva, L. I., Tunik, A. Yu., Karpets, M. V., Korzhyk, V. N., Kindrachuk, M. V., Tisov, O. V. (2020). Formation of Microstructure of Plasma-Arc Coatings Obtained Using Powder Wires with Steel Skin and $B_4C+(Cr,Fe)_3+Al$ Filler. *Metallfizika i Noveishie Tekhnologii*, 42 (9), 1265–1282. doi: <https://doi.org/10.15407/mfint.42.09.1265>
 19. Schaaf, P., Illgner, C., Landry, F., Lieb, K.-P. (1998). Correlation of the microhardness with the nitrogen profiles and the phase composition in the surface of laser-nitrided steel. *Surface and Coatings Technology*, 100–101, 404–407. doi: [https://doi.org/10.1016/s0257-8972\(97\)00658-0](https://doi.org/10.1016/s0257-8972(97)00658-0)
 20. Sim, A., Park, C., Kang, N., Kim, Y., Chun, E.-J. (2019). Effect of laser-assisted nitriding with a high-power diode laser on surface hardening of aluminum-containing martensitic steel. *Optics & Laser Technology*, 116, 305–314. doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.03.040>
 21. Copola, C. J., Avram, I., Terzoli, M. C., Duhalde, S., Morales, C., Pérez, T. et al. (2002). Influence of laser parameters on the nitriding of low carbon steel. *Applied Surface Science*, 197–198, 896–903. doi: [https://doi.org/10.1016/s0169-4332\(02\)00452-x](https://doi.org/10.1016/s0169-4332(02)00452-x)
 22. Wu, G., Wang, R., Yang, J., Chen, X., Cao, S., Guo, W. et al. (2011). Study of laser nitriding on the GCR15 steel surface. *Physics Procedia*, 18, 285–290. doi: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.06.096>
 23. Maharjan, N., Zhou, W., Wu, N. (2020). Direct laser hardening of AISI 1020 steel under controlled gas atmosphere. *Surface and Coatings Technology*, 385, 125399. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125399>
 24. Fastow, M., Bamberger, M. (1988). Laser nitriding of AISI 4340 steel. *Scripta Metallurgica*, 22(2), 183–186. doi: [https://doi.org/10.1016/s0036-9748\(88\)80330-2](https://doi.org/10.1016/s0036-9748(88)80330-2)
 25. Boes, J., Röttger, A., Becker, L., Theisen, W. (2019). Processing of gas-nitrided AISI 316L steel powder by laser powder bed fusion – Microstructure and properties. *Additive Manufacturing*, 30, 100836. doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100836>
 26. Karamis, M. B., Yilbas, B. S. (1991). Laser melting of plasma-nitrided steel samples. *Surface and Coatings Technology*, 45 (1-3), 399–402. doi: [https://doi.org/10.1016/0257-8972\(91\)90248-u](https://doi.org/10.1016/0257-8972(91)90248-u)
 27. Szymkiewicz, K., Morgiel, J., Maj, Ł., Pomorska, M., Tarnowski, M., Tkachuk, O. et al. (2020). Effect of nitriding conditions of Ti6Al7Nb on microstructure of TiN surface layer. *Journal of Alloys and Compounds*, 845, 156320. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.156320>
 28. Kostetskiy, B. I. (1970). *Trenie, smazka i iznos v mashinah*. Kyiv: Tekhnika, 396.
 29. Chattopadhyay, A., Kumar, K. C. H., Sarma, V. S., Murty, B. S., Bhattacharjee, D. (2010). Prediction of carbon segregation on the surface of continuously annealed hot-rolled LCAK steel. *Surface and Coatings Technology*, 205 (7), 2051–2054. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.08.098>
 30. Mishchuk, O. A., Telemko, O. V., Dziuba, V. I., Koval, L. I., Pekhnyo, V. I. (2014). Influence of sulfur free bis-helate of molybdenum on creation of friction steel surface gradient structure. *Problems of Friction and Wear*, 4 (65), 4–18. doi: [https://doi.org/10.18372/0370-2197.4\(65\).8612](https://doi.org/10.18372/0370-2197.4(65).8612)
 31. Benar, Zh. (1967). *Okislenie metallov*. Vol. 1. *Teoreticheskie osnovy*. Moscow: Metallurgiya, 503.
 32. Kralya, V. O., Molyar, O. H., Trofimov, V. A., Khimko, A. M. (2010). Defects of steel units of the high-lift devices of aircraft wings caused by fretting corrosion. *Materials Science*, 46 (1), 108–114. doi: <https://doi.org/10.1007/s11003-010-9270-8>
 33. Kindrachuk, M. V., Dushek, Y. Y., Luchka, M. V., Gladchenko, A. N. (1995). Evolution of the structure and properties of eutectic coatings during friction. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 34 (5-6), 321–326. doi: <https://doi.org/10.1007/bf00560139>
 34. Kindrachuk, M. V., Dushek, Y. Y., Luchka, M. V. (1995). Local nature of the stress-strain state of a composite material subjected to frictional forces. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 33 (9-10), 496–500. doi: <https://doi.org/10.1007/bf00559536>
 35. Jiang, M., Liu, C., Chen, Z., Wang, P., Liao, H., Zhao, D. et al. (2021). Enhanced strength-ductility synergy of selective laser melted reduced activation ferritic/martensitic steel via heterogeneous microstructure modification. *Materials Science and Engineering: A*, 801, 140424. doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140424>
 36. Hassanin, A. E., Troiano, M., Scherillo, F., Silvestri, A. T., Contaldi, V., Solimene, R. et al. (2020). Rotation-assisted Abrasive Fluidised Bed Machining of AlSi10Mg parts made through Selective Laser Melting Technology. *Procedia Manufacturing*, 47, 1043–1049. doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.113>
 37. Dukhota, O. I., Pohrelyuk, I. M., Molyar, O. H., Pichuhin, A. T., Luk'yanenko, O. H. (2012). Effect of Low-Temperature Oxidation and Oxynitriding on the Fretting Corrosion of VT22 Titanium Alloy. *Materials Science*, 48 (2), 213–218. doi: <https://doi.org/10.1007/s11003-012-9494-x>
 38. Pohrelyuk, I. M., Padgurskas, J., Tkachuk, O. V., Luk'yanenko, A. G., Trush, V. S., Lavrys, S. M. (2020). Influence of Oxynitriding on Antifriction Properties of Ti–6Al–4V Titanium Alloy. *Journal of Friction and Wear*, 41 (4), 333–337. doi: <https://doi.org/10.3103/s1068366620040108>
 39. Pohrelyuk, I. M., Tkachuk, O. V., Proskurnyak, R. V., Boiko, N. M., Kluchivska, O. Y., Stoika, R. S., Ozga, P. (2020). Cytocompatibility Evaluation of Ti-6Al-4V Alloy After Gas Oxynitriding. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 29 (12), 7785–7792. doi: <https://doi.org/10.1007/s11665-020-05265-z>
 40. Takesue, S., Kikuchi, S., Misaka, Y., Morita, T., Komotori, J. (2020). Rapid nitriding mechanism of titanium alloy by gas blow induction heating. *Surface and Coatings Technology*, 399, 126160. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126160>
 41. Burdovitsin, V. A., Golosov, D. A., Oks, E. M., Tyunkov, A. V., Yushkov, Y. G., Zolotukhin, D. B., Zavadsky, S. M. (2019). *Electron*

beam nitriding of titanium in medium vacuum. *Surface and Coatings Technology*, 358, 726–731. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.11.081>

42. Kindrachuk, V. M., Kindrachuk, M. V., Korbut, Y. V., Dukhota, O. I., Tisov, O. V., Shevchenko, O. L., Holovko, L. F. (2009). Pat. No. 45549 UA. Method for discrete treatment of the nitrogenized steel articles. No. u200906959; declared: 03.07.2009; published: 10.11.2009, Bul. No. 21. Available at: <https://uapatents.com/3-45549-sposib-diskretno-obrobki-azotovanih-stalievikh-virobiv.html>
43. Khimko, A., Kralya, V., Yakobchuk, A., Kostuchik, V., Sidorenko, A. (2011). Units wearability of aircraft wing lift devices. *Problems of Friction and Wear*, 55, 112–117. doi: <https://doi.org/10.18372/0370-2197.55.3249>

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.235578

DEVELOPMENT OF A TECHNOLOGY OF GAS-FLAME APPLICATION OF POWDERS TO INCREASE WEAR RESISTANCE AND ADHESION STRENGTH (p. 14–24)

Daulet Yermekov

Al-Farabi Kazakh National University,
Almaty, Republic of Kazakhstan

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6378-2287>

Vitaly Povetkin

Al-Farabi Kazakh National University,
Almaty, Republic of Kazakhstan

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3872-3488>

Rutkuniene Zivile

Al-Farabi Kazakh National University,
Almaty, Republic of Kazakhstan

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5610-6555>

Alfiya Nurmukhanova

Al-Farabi Kazakh National University,
Almaty, Republic of Kazakhstan

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5661-797X>

Amina Bukayeva

Yessenov University, Aktau, Republic of Kazakhstan

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0956-1552>

Every year, the world economy suffers enormous losses due to wear and corrosion of machine parts and equipment. With targeted preventive protection against wear and tear, these losses can be avoided. Along with the coating of new parts, this includes the restoration of worn parts. An effective method is the surfacing of materials with high performance properties. The quality of hardened parts depends on the properties of deposited material, so hardening material or alloy is selected taking into account the working environment of the part and the coating method.

Today there are many self-fluxing surfacing powder alloys based on nickel, copper and others, obtained by different methods.

The paper discusses the process of studying the gas-flame application of powders to increase wear resistance and adhesion strength. Experimental studies have been carried out to determine the optimal composition of the CrB₂ master alloy introduced into the composition of the GP-Ir40 surfacing alloy. It has been found that to obtain the hardness of the deposited metal in the range of 450–600 HV, it is necessary to introduce CrB₂ into the coating composition, within 10 % of the total mass. Thus, the strength of the alloy is increased by more than 54.41 HV. Tests for corrosion resistance in aggressive environments of hydrogen sulfide H₂S, sulfuric acid H₂SO₄ were carried out. The wear resistance of ground pumps was evaluated, and the service life of

wear-resistant ground pump parts made of the ICH28N2 alloy was determined.

The new developed self-fluxing surfacing powder material based on iron with a hardening additive will be used to restore machine and equipment parts operating under conditions of abrasive wear, corrosion and elevated temperatures or corrosive environments.

Keywords: powders, flame, plasma coatings, adhesion, strength, wear resistance, plasmatron, corrosion.

References

1. Yermekov, D., Povetkin, V., Rutkuniene, Zh. (2020) Influence of corrosion environment on physical and chemical wearing of equipment parts with wear-resistant coating. *Herald of the Kazakh - British Technical University*, 2 (53), 15–21.
2. Kostitsyna, I. V., Tyurin, A. G., Parshukov, V. P., Birukov, A. I. (2012). Influence of chromium content, temperature and pressure CO₂ on corrosion resistance of tubing. *Vestnik YuUrGU. Seriya «Himiya»*, 13, 30–37.
3. GOST 21.602-2003. System of design documents for construction. Rules for execution of working documentation of heating, ventilation and air conditioning.
4. Zenin, B. S., Slosman, A. I. (2012). *Sovremennyye tekhnologii poverhnostnogo uprochneniya i naneseniya pokrytiy*. Tomsk: Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 120.
5. Kapsalamova, F. R., Kenzhaliev, B. K., Mironov, V. G., Shilov, G. T. (2016). Raspredelenie elementov v obeme poroshka sistemy Fe-Ni-Cr-Cu-Si-B-C v zavisimosti ot vremeni mekhanohimicheskogo legirovaniya. *Kompleksnoe ispol'zovanie mineral'nogo syr'ya*, 2, 64–68.
6. Topoljansky, P. A. (2004). Research of ion-plasma wear-resistant coating on tools. *Metallorabotka*, 1 (19), 24–30.
7. Korobov, Yu. S. (2016). *Analiz svoystv gazotermicheskikh pokrytiy*. Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta.
8. Davis, J. R. (Ed.) (2005). *Handbook of thermal spray technology*. ASM International, 339.
9. Bartenev, S. S., Fed'ko, Yu. P., Grigorov, A. I. (1982). *Detonatsionnye pokrytiya v mashinostroenii*. Leningrad: Mashinostroenie, 214.
10. Kenzhaliev, B. K., Mironov, V. G., Shilov, G. T., Suleymenov, E. N. (2012). Pat. No. 27499 RK. Sposob polucheniya poroshkovogo naplavochnogo splava dlya gazotermicheskogo pokrytiya. opubl. 09.2012.
11. Goryachev, O. N., Tyuterev, V. V. (1995). Pat. No. 2038406 RF. Smes' dlya naneseniya pokrytiy. opubl. 27.06.1995.
12. Hoking, M. (2006). *Metallicheskie i keramicheskie pokrytiya. Poluchenie, svoystva i primenenie*. Moscow: Mir, 518.
13. Mirkin, L. I. (1979). *Rentgenostrukturnyy kontrol' mashinostroitel'nykh materialov*. Moscow: Mashinostroenie, 134.
14. Gorelik, S. S. (1970). *Rentgenograficheskii i elektronno-opticheskii analiz*. Moscow: Metallurgiya, 338.
15. Kulik, A. Ya., Borisov, Yu. S., Mnuhin, A. S., Nikitin, M. D. (1985). *Gazotermicheskoe napylenie kompozitsionnykh poroshkov*. Leningrad: Mashinostroenie, 199.
16. Popov, V. A., Zaytsev, V. A., Prosviryakov, A. S. et. al. (2010). Issledovanie protsessov mekhanicheskogo legirovaniya pri poluchenii kompozitsionnykh materialov s nanorazmernymi uprochnyayuschimi chastitsami. *Nanostrukturirovannyye materialy i funktsional'nyye pokrytiya*, 1, 48–52.
17. Borisov, Yu. S., Borisova, A. L. et. al. (2010). Poluchenie poroshkov dlya gazotermicheskikh pokrytiy metodami mekhanicheskogo sinteza i mekhanicheskogo legirovaniya. *Svarochnoe proizvodstvo*, 12, 18–21.

18. Lovshenko, G. F., Lovshenko, F. G., Hina, T. F. (2008). Vliyanie mekhanoaktivatsii na protsessy fazo i strukturooborudovaniya pri samorasprostranyayuschemsya vysokotemperaturnom sinteze. *Novosibirsk*, 168.
19. Seitkhanov, A., Povetkin, V., Bektibay, B., Tatybayev, M., Bukayeva, A. (2019). Improvement of the design of hydraulic transport devices for the transport of hydroabrasive media in the enrichment industry. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (1 (101)), 6–16. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.180791>
20. Povetkin, V. V., Kerimzhanova, M. F., Orlova, E. P., Bukayeva, A. Z. (2018). Improvement of equipment for transport of slurry in mineral processing production. *Mining Informational And Analytical Bulletin*, 6, 161–169. doi: <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-6-0-161-169>
21. Selamat, F. E., Iskandar, W. H., Saffuan, B. (2018). Design and Analysis of Centrifugal Pump Impeller for Performance Enhancement. *Journal of Mechanical Engineering*, SI 5 (2), 36–53.
22. Singh, R. R., Nataraj, M. (2014). Design and analysis of pump impeller using SWFS. *World Journal of Modelling and Simulation*, 10 (2), 152–160.
23. Zav'yalov, V. V. (2005). *Problemy ekspluatatsionnoy nadezhnosti truboprovodov na pozdneye stadii razrabotki mestorozhdeniy*. Moscow: OAO «VNII OENG», 332.
24. Rodionova, I. G., Zaytsev, A. I., Baklanova, O. N. (Eds.) (2005). *Sb. tr. «Korrozionno-aktivnye nemetallicheskie vklucheniya v uglerodistykh i nizkolegirovannykh stalyah»*. Moscow: Metallurgizdat, 184.
25. Yao, Z., Wang, F., Qu, L., Xiao, R., He, C., Wang, M. (2011). Experimental Investigation of Time-Frequency Characteristics of Pressure Fluctuations in a Double-Suction Centrifugal Pump. *Journal of Fluids Engineering*, 133 (10). doi: <https://doi.org/10.1115/1.4004959>

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.234783

FEATURES IN THE FORMATION OF THE STRUCTURAL STATE OF LOW-CARBON MICRO-ALLOYED STEELS AFTER ELECTRON BEAM WELDING (p. 25–31)

Dmytro Laukhin

Prydniprovskaya State Academy of Civil Engineering and Architecture, Dnipro, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9842-499X>

Valerii Poznyakov

E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8581-3526>

Valery Kostin

E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2677-4667>

Olexander Beketov

Prydniprovskaya State Academy of Civil Engineering and Architecture, Dnipro, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0664-0327>

Nataliia Rott

Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3839-6405>

Yuliia Slupska

Prydniprovskaya State Academy of Civil Engineering and Architecture, Dnipro, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7983-1602>

Lilia Dadiverina

Prydniprovskaya State Academy of Civil Engineering and Architecture, Dnipro, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4498-2184>

Olga Liubymova-Zinchenko

Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, Severodonetsk, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7510-5366>

Welding thermomechanically-strengthened materials is accompanied with certain difficulties in terms of loss of strength characteristics in the zone of thermal influence. This issue can be resolved by using the technological welding schemes that include fusion of materials in a narrow contact area. One such technological scheme is electron beam welding, which is currently widely used to fabricate structures from refractory and chemically active materials. One of the main advantages of the electron beam welding process is a small quantity of heat input, which leads to the formation of narrow zones of melting and thermal influence and, as a result, minor deformities in the structure of the material. The welded joint can structurally be divided into several zones, which differ in the morphological characteristics of the structure. The most interesting, in terms of ensuring the quality of the joint, are the boundaries between the zones. It has been shown that the use of local heating sources, which is the case at electron beam welding, leads to the migration of the boundaries of grains. As a result, clear intersections, fusion lines, form at the boundaries between zones of the welded joint. The formation of the structural state of a welded joint is predetermined by the simultaneous course of several processes. First, a crystallization from the liquid state – the formation of a welded joint structure, as well as the boundary between a welded joint and the zone of thermal influence. Second, the phase-structural transformations in the solid state – a thermal impact zone, the boundary between a thermal impact zone and the main metal. Given this, one should note that the geometry and quality of joints at electron beam welding are more interrelated than in other welding techniques. Thus, one of the main parameters that ensure the quality of a welded joint is the structural state of the material that forms during welding.

Keywords: electron beam welding, structural state, low-carbon micro-alloyed steels, welded joint zones.

References

1. Bol'shakov, V. I., Razumova, O. V. (2008). *Ispol'zovanie staley povyshennoy prochnosti v novom vysotnom stroitel'stve i rekonstruktsii*. Dnepropetrovsk: Porogi, 216.
2. Zherbin, M. M., Bol'shakov, V. I. (2000). *Novaya kontseptsiya modernizatsii i nadstroyki suschestvuyuschih maloetazhnykh zhilykh zdaniy do lyubogo kolichestva etazhey*. Dnepropetrovsk: Gaudamus, 50.
3. Bailey, N., Wright, M. D. (1993). Weldability of High Strength Steels. *Welding and Metal Fabrication*, 61 (8), 389–396.
4. Paton, B. E. (1999). *Problemy svarki na rubezhe vekov*. *Avtomaticheskaya svarka*, 1, 4–14.
5. Laukhin, D., Pozniakov, V., Beketov, O., Rott, N., Shchudro, A. (2020). Analysis of the Effects of Welding Conditions on the Formation of the Structure of Welded Joints of Low-Carbon Low-Alloy Steels. *Key Engineering Materials*, 844, 146–154. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.844.146>
6. Gubenko, S. (2015). *Nemetallicheskie vklucheniya i prochnost' staley*. *Fizicheskie osnovy prochnosti staley*. Dnepropetrovsk: Palmarium academic publishing, 471.

7. Loboda, P., Zvorykin, C., Zvorykin, V., Vrzhyzhevskiy, E., Taranova, T., Kostin, V. (2020). Production and Properties of Electron-Beam-Welded Joints on Ti-TiB Titanium Alloys. *Metals*, 10 (4), 522. doi: <https://doi.org/10.3390/met10040522>
8. Fedosov, A. V., Karpovych, E. V. (2015). Advanced aspects of electron-beam welding for high-strength titanium alloys. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 1 (118), 16–22.
9. Kostin, V., Taranova, T., Zvorykin, V. (2021). Fracture of Electron Beam Welding Joints of Titan Alloys. *Solid State Phenomena*, 316, 333–339. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.316.333>
10. Nazarenko, O. K., Grabin, V. F., Lokshin, V. E. (1974). Fiziko-metallurgicheskie osobennosti elektronoluchevoy svarki sredneuglerodistykh staley. *Avtomaticheskaya svarka*, 4, 1–4.
11. Sharonov, N. I. (2010). Primenenie elektronno-luchevoy svarki v turbostroenii. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbPU*, 3, 143–149.
12. Bulatnikova, O. V., Mikhalechenkov, A. V. (2017). Specific defects in welded compounds and methods of their prevention. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavtiki. Sektsiya «Svarka letatel'nykh apparatov i rodstvennye tekhnologii»*, 1, 389–391.
13. Bulatnikova, O. V., Cheburashkin, S. A. (2016). Characteristic of process of electron beam welding. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavtiki*, 1, 419–421.
14. Grigoriev, V. V., Muravyev, V. I., Bakhmatov, P. V. (2019). Changes in the structure and microhardness of permanent joints of load-bearing structures made of titanium alloy VT23 by electron beam welding. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 1 (706), 20–28. doi: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2019-1-20-28>
15. Fouad, Y., Marouani, H. (2019). Fracture characteristics of dissimilar electron-beam welded joints between Cr-Mo steel and austenitic steel AISI 304. *AIP Advances*, 9 (4), 045211. doi: <https://doi.org/10.1063/1.5090401>
16. Laukhin, D., Beketov, O., Rott, N., Schudro, A. (2019). The Elaboration of Modernized Technology of Controlled Rolling Directed at the Formation of High Strengthening and Viscous Qualities in HSLA Steel. *Solid State Phenomena*, 291, 13–19. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.291.13>
17. DeArdo, A. (1995). Modern Thermomechanical Processing of Microalloyed Steel: A Physical Metallurgy Perspective. *Proceedings of Microalloying 95 Conference*. Pittsburgh, 15–33.
18. Beketov, A. V., Bol'shakov, V. I., Kuksenko, V. I., Suhomlin, G. D., Lauhin, D. V., Semenov, T. V. (2010). Obrazovanie i rost perlitnykh koloniy. *Visnyk Prydniprovskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury*, 1, 29–35.

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.234251

COMPARATIVE INVESTIGATION OF DIFFERENT TYPES OF NICKEL FOAM SAMPLES FOR APPLICATION IN SUPERCAPACITORS AND OTHER ELECTROCHEMICAL DEVICES (p. 32–38)

Vadym Kovalenko

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

Valerii Kotok

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

Nickel foam is widely used as a current lead/current collector and the basis of nickel hydroxide electrodes for various electrochemical devices – batteries, hybrid supercapacitors, devices for electrocatalytic oxidation of organic substances. The characteristics of commercial samples of nickel foam produced by Novomet-Perm (Russian Federation) obtained by electroless and then electrochemical nickel plating and Linyi Gelon LIB Co Ltd (China) obtained by electroless nickel plating were studied. The nature of passivity was determined by forming model samples of electrochemical and electroless nickel on a steel base. For the passive sample, activation was carried out by applying a layer of electrochemical nickel from an impact nickel plating solution. Activated, non-activated samples of nickel foam, as well as model samples, were studied by the methods of cyclic voltammetry and galvanostatic charge-discharge cycling in the supercapacitor mode. Comparative analysis of Chinese-made and Russian-made nickel foam samples showed significant passivity of the former – in cyclic voltammetry, the activity was 4.8 times lower, with galvanostatic charge-discharge cycling – 2.59 times lower. It was suggested that high passivity was determined by the fact that the sample consisted of Ni-P or Ni-B alloy. This assumption was proved by the method of natural simulation. The electrochemical activity of electroless nickel was 1.25 times lower than that of electrochemical nickel (according to cyclic voltammetry data) and 1.58 times lower (according to galvanostatic cycling data). For the first time, Chinese-made nickel foam (electroless nickel) was activated by applying a layer of electrochemical nickel from an impact nickel electrolyte. The high activation efficiency was shown as follows – on the cyclic curve, the specific current of the anodic peak increased 8.71 times, and with galvanostatic cycling, the increase in specific capacity was from 1.73 times (at $i=120 \text{ mA/cm}^2$) to 4.84 times (at $i=20 \text{ mA/cm}^2$).

Keywords: nickel foam, electrochemical nickel, electroless nickel, impact nickel, activation, current collector, supercapacitor.

References

1. Simon, P., Gogotsi, Y. (2008). Materials for electrochemical capacitors. *Nature Materials*, 7 (11), 845–854. doi: <https://doi.org/10.1038/nmat2297>
2. Burke, A. (2007). R&D considerations for the performance and application of electrochemical capacitors. *Electrochimica Acta*, 53 (3), 1083–1091. doi: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2007.01.011>
3. Lang, J.-W., Kong, L.-B., Liu, M., Luo, Y.-C., Kang, L. (2009). Asymmetric supercapacitors based on stabilized $\alpha\text{-Ni(OH)}_2$ and activated carbon. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 14 (8), 1533–1539. doi: <https://doi.org/10.1007/s10008-009-0984-1>
4. 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)_2 nanoflake materials for electrochemical capacitors. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 13 (2), 333–340. doi: <https://doi.org/10.1007/s10008-008-0560-0>
5. Aghazadeh, M., Ghaemi, M., Sabour, B., Dalvand, S. (2014). Electrochemical preparation of $\alpha\text{-Ni(OH)}_2$ 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>
6. Zheng, C., Liu, X., Chen, Z., Wu, Z., Fang, D. (2014). Excellent supercapacitive performance of a reduced graphene oxide/ Ni(OH)_2 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>

7. 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>
8. Kotok, V., Kovalenko, V. (2017). Optimization of nickel hydroxide electrode of the hybrid supercapacitor. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (6 (85)), 4–9. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.90810>
9. Kovalenko, V. L., Kotok, V. A., Sykchin, A., Ananchenko, B. A., Chernyad'ev, A. V., Burkov, A. A. et. al. (2020). Al³⁺ 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>
10. Chen, M., Xiong, X., Yi, C., Ma, J., Zeng, X. (2014). Ni(OH)₂-NiO-NiF Compound Film on Nickel with Superior Pseudocapacitive Performance Prepared by Anodization and Post-hydrothermal Treatment Methods. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 25 (4), 739–746. doi: <https://doi.org/10.1007/s10904-014-0152-7>
11. 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>
12. Yu, X., Hua, T., Liu, X., Yan, Z., Xu, P., Du, P. (2014). Nickel-Based Thin Film on Multiwalled Carbon Nanotubes as an Efficient Bifunctional Electrocatalyst for Water Splitting. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 6 (17), 15395–15402. doi: <https://doi.org/10.1021/am503938c>
13. Xiao, J., Zhang, X., Gao, T., Zhou, C., Xiao, D. (2017). Electrochemical formation of multilayered NiO film/Ni foam as a high-efficient anode for methanol electrolysis. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 21 (8), 2301–2311. doi: <https://doi.org/10.1007/s10008-017-3570-y>
14. Kotok, V., Kovalenko, V. (2018). A study of the effect of tungstate ions on the electrochromic properties of Ni(OH)₂ films. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (12 (95)), 18–24. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.145223>
15. Kotok, V. A., Kovalenko, V. L. (2019). Non-Metallic Films Electroplating on the Low-Conductivity Substrates: The Conscious Selection of Conditions Using Ni(OH)₂ Deposition as an Example. *Journal of The Electrochemical Society*, 166 (10), D395–D408. doi: <https://doi.org/10.1149/2.0561910jes>
16. 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>
17. 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>
18. Solovov, V. A., Nikolenko, N. V., Kovalenko, V. L., Kotok, V. A., Burkov, A. A., Kondrat'ev, D. A. et. al. (2018). Synthesis of Ni(II)-Ti(IV) Layered Double Hydroxides Using Coprecipitation At High Supersaturation Method. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 24 (13), 9652–9656. Available at: http://www.arpnjournals.org/jeas/research_papers/rp_2018/jeas_1218_7500.pdf
19. Kovalenko, V., Kotok, V., Kovalenko, I. (2018). Activation of the nickel foam as a current collector for application in supercapacitors. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (12 (93)), 56–62. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.133472>
20. Liu, C., Huang, L., Li, Y., Sun, D. (2009). Synthesis and electrochemical performance of amorphous nickel hydroxide codoped with Fe³⁺ and CO₃²⁻. *Ionics*, 16 (3), 215–219. doi: <https://doi.org/10.1007/s11581-009-0383-8>
21. Li, J., Luo, F., Tian, X., Lei, Y., Yuan, H., Xiao, D. (2013). A facile approach to synthesis coral-like nanoporous β-Ni(OH)₂ and its supercapacitor application. *Journal of Power Sources*, 243, 721–727. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.05.172>
22. 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>
23. Xiao-yan, G., Jian-cheng, D. (2007). Preparation and electrochemical performance of nano-scale nickel hydroxide with different shapes. *Materials Letters*, 61 (3), 621–625. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2006.05.026>
24. Kovalenko, V., Kotok, V. (2018). Synthesis of Ni(OH)₂ by template homogeneous precipitation for application in the binderfree electrode of supercapacitor. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (12 (94)), 29–35. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.140899>
25. Tizfahm, J., Safibonab, B., Aghazadeh, M., Majdabadi, A., Sabour, B., Dalvand, S. (2014). Supercapacitive behavior of β-Ni(OH)₂ nanospheres prepared by a facile electrochemical method. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 443, 544–551. doi: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2013.12.024>
26. Aghazadeh, M., Golikand, A. N., Ghaemi, M. (2011). Synthesis, characterization, and electrochemical properties of ultrafine β-Ni(OH)₂ nanoparticles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36 (14), 8674–8679. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.03.144>
27. Kovalenko, V., Kotok, V. (2019). Influence of the carbonate ion on characteristics of electrochemically synthesized layered (α+β) nickel hydroxide. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (6 (97)), 40–46. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.155738>
28. 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>
29. Liang, K., Tang, X., Hu, W. (2012). High-performance three-dimensional nanoporous NiO film as a supercapacitor electrode. *Journal of Materials Chemistry*, 22 (22), 11062. doi: <https://doi.org/10.1039/c2jm31526b>
30. Navale, S. T., Mali, V. V., Pawar, S. A., Mane, R. S., Naushad, M., Stadler, F. J., Patil, V. B. (2015). Electrochemical supercapacitor development based on electrodeposited nickel oxide film. *RSC Advances*, 5 (64), 51961–51965. doi: <https://doi.org/10.1039/c5ra07953e>
31. Kotok, V., Kovalenko, V. (2018). A study of multilayered electrochromic platings based on nickel and cobalt hydroxides. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (12 (91)), 29–35. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.121679>
32. Chao, Y., Xin-Bo, X., Zhi-Biao, Z., Jun-Jie, L., Tuo, H., Xie-Rong, Z. (2015). Fabrication of Nickel-Based Composite Film Electrode for Supercapacitors by a New Method of Anodization/GCD. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 31 (1), 99–104. doi: <https://doi.org/10.3866/pku.whxb201411053>

33. Gu, L., Wang, Y., Lu, R., Guan, L., Peng, X., Sha, J. (2014). Anodic electrodeposition of a porous nickel oxide–hydroxide film on passivated nickel foam for supercapacitors. *J. Mater. Chem. A*, 2 (20), 7161–7164. doi: <https://doi.org/10.1039/c4ta00205a>
34. Visscher, W., Barendrecht, E. (1980). The anodic oxidation of nickel in alkaline solution. *Electrochimica Acta*, 25 (5), 651–655. doi: [https://doi.org/10.1016/0013-4686\(80\)87072-1](https://doi.org/10.1016/0013-4686(80)87072-1)
35. Seghioeur, A., Chevalet, J., Barhoun, A., Lantelme, F. (1998). Electrochemical oxidation of nickel in alkaline solutions: a voltammetric study and modelling. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 442 (1–2), 113–123. doi: [https://doi.org/10.1016/s0022-0728\(97\)00498-1](https://doi.org/10.1016/s0022-0728(97)00498-1)
36. Cai, G., Wang, X., Cui, M., Darmawan, P., Wang, J., Eh, A. L.-S., Lee, P. S. (2015). Electrochromo-supercapacitor based on direct growth of NiO nanoparticles. *Nano Energy*, 12, 258–267. doi: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2014.12.031>
37. Atalay, F. E., Aydogmus, E., Yigit, H., Avcu, D., Kaya, H., Atalay, S. (2014). The Formation of Free Standing NiO Nanostructures on Nickel Foam for Supercapacitors. *Acta Physica Polonica A*, 125 (2), 224–226. doi: <https://doi.org/10.12693/aphyspola.125.224>
38. Yadav, A. A., Chavan, U. J. (2016). Influence of substrate temperature on electrochemical supercapacitive performance of spray deposited nickel oxide thin films. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 782, 36–42. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2016.10.006>
39. Xiong, X., Zhang, J., Ma, J., Zeng, X., Qian, H., Li, Y. (2016). Fabrication of porous nickel (hydr)oxide film with rational pore size distribution on nickel foam by induction heating deposition for high-performance supercapacitors. *Materials Chemistry and Physics*, 181, 1–6. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2016.06.038>
40. Fares, M., Debili, M. Y. (2016). NiO Formation by Simple Air Oxidation of Nickel Coated Carbon Fibers. *Journal of Advanced Microscopy Research*, 11 (2), 127–129. doi: <https://doi.org/10.1166/jamr.2016.1302>

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.235775

DETERMINATION OF ADHESION OF THE COATING DEPOSITED BY ARC SPRAYING WITH PULSATION OF ATOMIZING AIR FLOW (p. 39–47)

Iryna Zakharova

Pryazovskiyi State Technical University, Mariupol, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3492-0134>

During electric arc spraying, during the transfer of molten metal by air flow, there is a significant burnout of alloying elements with the formation of a large amount of oxides, which negatively affects the adhesion of the coating to the base. A solution to the problem of increasing the adhesion strength by using pulsation of the atomizing air flow is proposed. At the optimal frequency of the pulsed flow shut-off, the time of formation of liquid metal droplets at the ends of the electrodes coincides with the frequency of pulses of the spraying flow. As a result, the droplets acquire an optimal size, they are transported by an air flow with conservation of energy, a lower mass of oxygen and, as a consequence, a significant decrease in the oxidation of alloying elements in the sprayed material. The existing test methods of sprayed coatings for adhesion strength to the base are analyzed. The design of a modernized device for determining the adhesion strength is developed and described, which provides complex loading of the coating with a combination of tear-off and shear. The tests revealed a significant (up to two times) increase in the adhesion strength of aluminum, zinc-aluminum and steel (Sv08A) coatings applied with air pulsation. This is achieved by increas-

ing the number of fusion zones of the coating particles between themselves and with the base. It is shown that the effect of the pulsation frequency on the adhesion strength changes along a curve with a maximum corresponding to a frequency of 70–80 Hz, regardless of the coating material. It has been established that the aluminum coating has an increased tendency to oxidation, as a result of which it is 15–20 % inferior to the zinc-aluminum coating in adhesion strength. The data obtained substantiate the use of the proposed spraying technology in production.

Keywords: electric arc spraying, coating, pulsating flow, oxidation, particle, adhesion strength.

Reference

1. Li, Q., Song, P., Ji, Q., Huang, Y., Li, D., Zhai, R. et. al. (2019). Microstructure and wear performance of arc-sprayed Al/316L stainless-steel composite coating. *Surface and Coatings Technology*, 374, 189–200. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.06.006>
2. Mrdak, M. (2018). Mechanical properties and microstructures of bio-inert layers of chrome oxide coatings deposited by the APS process. *Vojnotehnicki Glasnik*, 66 (1), 28–40. doi: <https://doi.org/10.5937/vojtahg66-14009>
3. Meng, G.-H., Zhang, B.-Y., Liu, H., Yang, G.-J., Xu, T., Li, C.-X., Li, C.-J. (2018). Vacuum heat treatment mechanisms promoting the adhesion strength of thermally sprayed metallic coatings. *Surface and Coatings Technology*, 344, 102–110. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.03.010>
4. Shukla, R. K., Kumar, A., Kumar, R., Singh, D., Kumar, A. (2019). Numerical study of pore formation in thermal spray coating process by investigating dynamics of air entrapment. *Surface and Coatings Technology*, 378, 124972. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.124972>
5. Varavallo, R., Manfrinato, M. D., Rossino, L. S., Maluf, O., Camargo, F., Canale, L., Dean, S. W. (2012). Adhesion of Thermally Sprayed Metallic Coating. *Journal of ASTM International*, 9 (2), 103414. doi: <https://doi.org/10.1520/jai103414>
6. Ito, K., Shima, T., Fujioka, M., Arai, M. (2020). Improvement of Oxidation Resistance and Adhesion Strength of Thermal Barrier Coating by Grinding and Grit-Blasting Treatments. *Journal of Thermal Spray Technology*, 29 (7), 1728–1740. doi: <https://doi.org/10.1007/s11666-020-01057-y>
7. Singh, P., Kumar, P. (2021). Improvement in surface integrity of thermally sprayed cermet coatings. *Materials Today: Proceedings*, 45, 4431–4436. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.522>
8. Winarto, W., Sofyan, N., Rooscore, D. (2017). Effect of bond coat and preheat on the microstructure, hardness, and porosity of flame sprayed tungsten carbide coatings. *AIP Conference Proceedings*. doi: <https://doi.org/10.1063/1.4985486>
9. Li, Q., Deng, C., Li, L., Lü, J., Song, P., Li, C. et. al. (2020). Microstructure and interface-adhesion of thermally sprayed continuous gradient elastic modulus FeCrAl-ceramic coatings. *Ceramics International*, 46 (5), 5946–5959. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.11.048>
10. Swain, B., Mallick, P., Gupta, R. K., Mohapatra, S. S., Yasin, G., Nguyen, T. A., Behera, A. (2021). Mechanical and tribological properties evaluation of plasma-sprayed shape memory alloy coating. *Journal of Alloys and Compounds*, 863, 158599. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.158599>
11. Abbas, R. A., Ajeel, S. A., Ali Bash, M. A., Kadhim, M. J. (2021). Effect of plasma spray distance on the features and hardness reliability of YSZ thermal barrier coating. *Materials Today: Proceedings*, 42, 2553–2560. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.578>

12. Chadha, S., Jefferson-Loveday, R., Hussain, T. (2019). Effect of nozzle geometry on the gas dynamics and evaporation rates of Suspension High Velocity Oxy Fuel (SHVOF) thermal spray: A numerical investigation. *Surface and Coatings Technology*, 371, 78–89. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.10.085>
13. Miedviedieva, N., Levitsky, M., Sukhenko, V. (2018). Studying the effect of the combined technology on durability of the shaft-type parts. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (12 (93)), 14–22. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.132253>
14. Kopylov, V. (2016). Effect of multiphase structure of plasma coatings on their elastic and strength properties. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (5 (83)), 49–57. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.79586>
15. Kharlamov, Yu. A., Polonsky, L. G. (2016). Thermal spraying. Current status and further development. *Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu im. V. Dalia*, 2 (226), 5–19.
16. Ponomarev, A. I., Kirilyuk, G. A., Ignatenko, I. V., Bartyuk, V. V. (1989). A.s. No. 1699641 SSSR. Raspylitel'naya golovka elektrodugovogo metallizatora. No. 4726834; declared: 02.08.1989; published: 23.12.1991, Bul. No. 47.
17. Korobov, Yu. S., Lukanin, V. L., Boronenkov, V. N., Litovchenko, H. N. (1997). Pat. No. 2119389 RF. Ustroystvo dlya elektrodugovoy metallizatsii. No. 97101017/25; declared: 22.01.1997; published: 27.09.1998, Bul. No. 27.
18. Crawmer, D. E.; Davis, J. R. (Ed.) (2004). Thermal spray process. In *Handbook of Thermal Spray Technology*. ASM: Novelti, 54–73.
19. Tunik, Yu. V. (2014). Detonatsionnoe gorenje vodoroda v sople Lavalya s tsentral'nym koaksial'nym tsilindrom. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Mekhanika zhidkosti i gaza*, 5, 142–148.
20. Glushkova, D. B. (2018). Increase of longness of piston rings method of two-wire metalization. *Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*, 82, 27–34. doi: <https://doi.org/10.30977/bul.2219-5548.2018.82.0.27>
21. Kupriyanov, I. L., Geller, M. A. (1990). *Gazotermicheskie pokrytiya s povyshennoy prochnost'yu stsepleniya*. Minsk: Nauka i tekhnika, 176.
22. Zakharova, I. V. (2020). Vyznachennia dyspersnosti chastynok pry pulsuiuchiy podachi rozpyliuvalnoho potoku. The 11th International scientific and practical conference “Scientific Achievements of Modern Society”. Liverpool, 271–276.
23. Royanov, V., Zakharova, I., Lavrova, E. (2017). Development of properties of spray flow and nature of pressure distribution in electric arc metalization. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (5 (90)), 41–49. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.118252>
24. Roianov, V. O., Zakharova, I. V. (2020). Reducing the Oxidation Level of the Sprayed Material During Arc Metallization by Using a Combined Air-Powder Spraying Flow. *Visnyk of Vinnytsia Politechnical Institute*, 5 (152), 84–88. doi: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2020-152-5-84-88>
25. Zakharova, I. (2020). Development of equipment for arc metalization with pulsating spraying airflow to improve the technological properties of the coating. *The Scientific Heritage*, 49, 18–21.
26. Royanov, V., Zakharova, I., Kriuchkov, M., Chigarev, V. (2020). Investigation of Factors, Determining Dispersity of Coating Particles at ARC Sputtering With Pulsating Spraying Stream. *World Science*, 1 (6 (58)), 10–20. doi: https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/30062020/7099

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.233490

INFLUENCE OF THE STRUCTURE AND THERMOMECHANICAL PROPERTIES OF ORIENTED CARBON PLASTICS ON THEIR TRIBOTECHNICAL CHARACTERISTICS (p. 48–58)

Aleksandr Dykha

Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3020-9625>

Olga Drobot

Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3709-6531>

Viktor Oleksandrenko

Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2404-2104>

Svitlana Pidhaichuk

National Academy of the State Border Guard Service of Ukraine named after Bohdan Khmelnytskyi, Khmelnytsky, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9868-6447>

Pavlo Yaroshenko

Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3815-1579>

Oleg Babak

Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1254-3494>

It has been established that carbon plastics are increasingly used in various industries as structural materials. By the set of their properties, carbon plastics outperform steel, cast iron, alloys of non-ferrous metals. However, the application of these materials for parts of machine friction units is still limited due to the difficult operating conditions of modern tribosystems. This work aims to conduct a comprehensive experimental study of the tribological properties of materials in the tribosystem “carbon plastic-metal” taking into consideration their structure, as well as the mechanical-thermal characteristics. Comparative tests of the dependence of the friction coefficient on load for metal and polymeric anti-friction materials have shown a decrease in the friction coefficient for plastics by 3...4 times (textolite, carbontextolite, and carbon-fiber plastics). The influence of the filler orientation relative to the slip plane on the anti-friction properties of carbon-fiber plastics was investigated; it was found that the direction of fiber reinforcement in parallel to the friction area ensures less carbon-fiber plastic wear. A linear dependence of the wear intensity of carbon-fiber plastics, reinforced with graphite fibers, on the heat capacity and energy intensity of the mated steel surface has been established. Based on the microstructural analysis, a layered mechanism of the surface destruction of carbon-fiber plastics was established caused by the rupture of bonds between the fiber parts, taking into consideration the direction of the fibers' location to the friction surface. The results reported here could provide practical recommendations in order to select the composition and structure of materials for the tribosystem “carbon-fiber plastic-metal” to be used in machine friction units based on the criterion of improved wear resistance.

Keywords: polymeric composites, oriented carbon plastics, thermal conductivity, wear intensity, friction coefficient.

References

1. Meng, Y., Xu, J., Jin, Z., Prakash, B., Hu, Y. (2020). A review of recent advances in tribology. *Friction*, 8 (2), 221–300. doi: <https://doi.org/10.1007/s40544-020-0367-2>

2. Samanta, S., Singh, S., Sahoo, R. R. (2019). Lubrication of dry sliding metallic contacts by chemically prepared functionalized graphitic nanoparticles. *Friction*, 8 (4), 708–725. doi: <https://doi.org/10.1007/s40544-019-0295-1>
3. Zaspá, Y., Dykha, A., Marchenko, D., Matiukh, S., Kukurudzyak, Y. (2020). Exchange interaction and models of contact generation of disturbances in tribosystems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (5 (106)), 25–34. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.209927>
4. Kobets, A., Aulin, V., Derkach, O., Makarenko, D., Hrynkiv, A., Krutous, D., Muranov, E. (2020). Design of mated parts using polymeric materials with enhanced tribotechnical characteristics. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (12 (107)), 49–57. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.214547>
5. Dorn, M., Habrová, K., Koubek, R., Serrano, E. (2020). Determination of coefficients of friction for laminated veneer lumber on steel under high pressure loads. *Friction*, 9 (2), 367–379. doi: <https://doi.org/10.1007/s40544-020-0377-0>
6. Wang, Z., Ni, J., Gao, D. (2018). Combined effect of the use of carbon fiber and seawater and the molecular structure on the tribological behavior of polymer materials. *Friction*, 6 (2), 183–194. doi: <https://doi.org/10.1007/s40544-017-0164-8>
7. Yang, J., Xiao, Q., Lin, Z., Li, Y., Jia, X., Song, H. (2020). Growth of ultra-dense MoS₂ nanosheets on carbon fibers to improve the mechanical and tribological properties of polyimide composites. *Friction*, 9 (5), 1150–1162. doi: <https://doi.org/10.1007/s40544-020-0413-0>
8. Khun, N. W., Zhang, H., Lim, L. H., Yue, C. Y., Hu, X., Yang, J. (2014). Tribological properties of short carbon fibers reinforced epoxy composites. *Friction*, 2 (3), 226–239. doi: <https://doi.org/10.1007/s40544-014-0043-5>
9. Khun, N. W., Liu, E. (2013). Thermal, mechanical and tribological properties of polycarbonate/acrylonitrile-butadiene-styrene blends. *Journal of Polymer Engineering*, 33 (6), 535–543. doi: <https://doi.org/10.1515/polyeng-2013-0039>
10. Khun, N. W., Troconis, B. C. R., Frankel, G. S. (2014). Effects of carbon nanotube content on adhesion strength and wear and corrosion resistance of epoxy composite coatings on AA2024-T3. *Progress in Organic Coatings*, 77 (1), 72–80. doi: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2013.08.003>
11. Sirenko, H., Soltys, L., Skladanyuk, M. (2015) The Influence of Nature and Hardness of Surfaces of Metal Counterfaces on Wear of Carbo-Fiber Plastic. *Physics and Chemistry of Solid State*, 16 (4), 734–741. doi: <https://doi.org/10.15330/pccs.16.4.734-741>
12. Nguyen, D., Bin Abdullah, M. S., Khawarizmi, R., Kim, D., Kwon, P. (2020). The effect of fiber orientation on tool wear in edge-trimming of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) laminates. *Wear*, 450-451, 203213. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203213>
13. Marchuk, V., Kindrachuk, M., Kryzhanovskiy, A. (2014). System analysis of the properties of discrete and oriented structure surfaces. *Aviation*, 18 (4), 161–165. doi: <https://doi.org/10.3846/1487788.2014.985474>
14. Dykha, A., Marchenko, D., Artyukh, V., Zubiakhina-Khaiat, O., Kurepin, V. (2018). Study and development of the technology for hardening rope blocks by reeling. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (1 (92)), 22–32. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126196>
15. Khun, N. W., Zhang, H., Sun, D. W., Yang, J. L. (2016). Tribological behaviors of binary and ternary epoxy composites functionalized with different microcapsules and reinforced by short carbon fibers. *Wear*, 350-351, 89–98. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.01.007>
16. Dykha, A., Makovkin, O. (2019). Physical basis of contact mechanics of surfaces. *Journal of Physics: Conference Series*, 1172, 012003. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1172/1/012003>
17. Sorokaty, R., Chernets, M., Dykha, A., Mikosyanchyk, O. (2019). Phenomenological Model of Accumulation of Fatigue Tribological Damage in the Surface Layer of Materials. *Mechanisms and Machine Science*, 3761–3769. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-20131-9_371
18. Dykha, A., Marchenko, D. (2018). Prediction the wear of sliding bearings. *International Journal of Engineering & Technology*, 7 (2.23), 4–8. doi: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i2.23.11872>
19. Dykha, A. V., Zaspá, Y. P., Slashchuk, V. O. (2018). Triboacoustic Control of Fretting. *Journal of Friction and Wear*, 39 (2), 169–172. doi: <https://doi.org/10.3103/s1068366618020046>
20. Ren, Y., Zhang, L., Xie, G., Li, Z., Chen, H., Gong, H. et. al. (2020). A review on tribology of polymer composite coatings. *Friction*, 9 (3), 429–470. doi: <https://doi.org/10.1007/s40544-020-0446-4>
21. Song, J., Yu, Y., Zhao, G., Qiu, J., Ding, Q. (2019). Comparative study of tribological properties of insulated and conductive polyimide composites. *Friction*, 8 (3), 507–516. doi: <https://doi.org/10.1007/s40544-019-0269-3>
22. Alberto, M. (2013). Introduction of Fibre-Reinforced Polymers – Polymers and Composites: Concepts, Properties and Processes. *Fiber Reinforced Polymers - The Technology Applied for Concrete Repair*. doi: <https://doi.org/10.5772/54629>

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.228731

DETERMINING THE EFFECT OF DISPERSED ALUMINUM PARTICLES ON THE FUNCTIONAL PROPERTIES OF POLYMERIC COMPOSITES BASED ON POLYVINYLIDENE FLUORIDE (p. 59–66)

Eduard Lysenkov

Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1369-4609>

Leonid Klymenko

Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3458-9453>

Polymeric materials that contain inorganic fillers demonstrate a unique set of physical properties due to the combination of matrix elasticity and filler strength. This paper reports determining the effect of dispersed aluminum particles on the properties of polyvinylidene fluoride-based materials. This study result is the fabrication of a series of composite materials using a piston extruder. Their functional characteristics have been explored using the methods of thermophysical and mechanical analysis, dilatometry, and acoustic spectroscopy. It was established that the introduction of dispersed aluminum particles leads to the loosening of the matrix, which may indicate the transition of macro macromolecules from the crystalline phase to the boundary layer around the filler. This feature of structure formation and the uniform distribution of filler particles ensured the improvement of the functional characteristics of the materials obtained. It has been shown that with an increase in the content of filler in the system to 5 % the thermal conductivity increases from 0.17 W/(m·K) to 1.55 W/(m·K). The introduction of the filler leads to an improvement in the heat resistance of the materials obtained, by 17 K. The increase in both melting point and destructiveness is explained by the formation of a more perfect polymer structure with a higher degree of crystallinity. An increase in the speed of ultrasound propagation was identified, by 67 %, as

well as in the tensile strength, by 36 %, in the materials obtained, which can be explained by contributions from the filler, which has greater sound conductivity and mechanical strength than the polymer matrix. Such systems show the reinforcing effect of aluminum particles on the polymer matrix, so they could be used as structural materials with improved functional characteristics.

Keywords: polymeric composite materials, dispersed aluminum particles, thermal conductivity, tensile strength, sound speed.

References

- Hsissou, R., Seghiri, R., Benzekri, Z., Hilali, M., Rafik, M., Elharfi, A. (2021). Polymer composite materials: A comprehensive review. *Composite Structures*, 262, 113640. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113640>
- Antipov, Y. V., Kul'kov, A. A., Pimenov, N. V. (2016). Polymer composite materials: Technologies and applications. *Polymer Science Series C*, 58 (1), 26–37. doi: <https://doi.org/10.1134/s181123821601001x>
- Dorigato, A., Dzenis, Y., Pegoretti, A. (2011). Nanofiller Aggregation as Reinforcing Mechanism in Nanocomposites. *Procedia Engineering*, 10, 894–899. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.147>
- Camargo, P. H. C., Satyanarayana, K. G., Wypych, F. (2009). Nanocomposites: synthesis, structure, properties and new application opportunities. *Materials Research*, 12 (1), 1–39. doi: <https://doi.org/10.1590/s1516-14392009000100002>
- Qu, M., Nilsson, F., Schubert, D. (2018). Effect of Filler Orientation on the Electrical Conductivity of Carbon Fiber/PMMA Composites. *Fibers*, 6 (1), 3. doi: <https://doi.org/10.3390/fib6010003>
- Vinod Kumar, T., Chandrasekaran, M., Mohanraj, P., Balasubramanian, R., Muraliraja, R., Shaisundaram, S. V. (2018). Fillers preparation for polymer composite and its properties – a review. *International Journal of Engineering & Technology*, 7 (3.3), 212. doi: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i2.33.13889>
- Ngo, I. L., Truong, V. A. (2019). An investigation on effective thermal conductivity of hybrid-filler polymer composites under effects of random particle distribution, particle size and thermal contact resistance. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 144, 118605. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118605>
- Oliveira, M., Machado, A. V. (2013). Preparation of Polymer-Based Nanocomposites by Different Routes. *Nanocomposites: Synthesis, Characterization and Applications*. Available at: <http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/26120/1/Chapter.pdf>
- Mamunia, Ye. P., Yurzhenko, M. V., Lebediev, Ye. V. et. al. (2013). *Elektroaktyvni polimerni materialy*. Kyiv: Alfa Reklama, 402.
- Liu, C.-X., Choi, J.-W. (2012). Improved Dispersion of Carbon Nanotubes in Polymers at High Concentrations. *Nanomaterials*, 2 (4), 329–347. doi: <https://doi.org/10.3390/nano2040329>
- Lysenkov, E. A., Gagolkina, Z. O., Lobko, E. V., Yakovlev, Yu. V., Nesin, S. D., Klepko, V. V. (2015). Structure-property relationships in polymer nanocomposites based on cross-linked polyurethanes and carbon nanotubes. *Functional Materials*, 22 (3), 342–349. doi: <https://doi.org/10.15407/fm22.03.342>
- Mittal, V. (Ed.) (2014). *Synthesis Techniques for Polymer Nanocomposites*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. doi: <https://doi.org/10.1002/9783527670307>
- Tan, X., Xu, Y., Cai, N., Jia, G. (2009). Polypropylene/silica nanocomposites prepared by in-situ melt ultrasonication. *Polymer Composites*, 30 (6), 835–840. doi: <https://doi.org/10.1002/pc.20598>
- Lee, E. C., Mielewski, D. F., Baird, R. J. (2004). Exfoliation and dispersion enhancement in polypropylene nanocomposites by in-situ melt phase ultrasonication. *Polymer Engineering and Science*, 44 (9), 1773–1782. doi: <https://doi.org/10.1002/pen.20179>
- Mould, S., Barbas, J., Machado, A. V., Nóbrega, J. M., Covas, J. A. (2014). Preparation of Polymer-Clay Nanocomposites by Melt Mixing in a Twin Screw Extruder: Using On-Line SAOS Rheometry to Assess the Level of Dispersion. *International Polymer Processing*, 29 (1), 63–70. doi: <https://doi.org/10.3139/217.2803>
- Brunengo, E., Castellano, M., Conzatti, L., Canu, G., Buscaglia, V., Stagnaro, P. (2020). PVDF-based composites containing PZT particles: How processing affects the final properties. *Journal of Applied Polymer Science*, 137 (20), 48871. doi: <https://doi.org/10.1002/app.48871>
- Wu, D., Deng, L., Sun, Y., Teh, K. S., Shi, C., Tan, Q. et. al. (2017). A high-safety PVDF/Al₂O₃ composite separator for Li-ion batteries via tip-induced electrospinning and dip-coating. *RSC Advances*, 7 (39), 24410–24416. doi: <https://doi.org/10.1039/c7ra02681a>
- Zhou, W., Zuo, J., Ren, W. (2012). Thermal conductivity and dielectric properties of Al/PVDF composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 43 (4), 658–664. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.11.024>
- Dinzhos, R. V., Fialko, N. M., Lysenkov, E. A. (2014). Analysis of the Thermal Conductivity of Polymer Nanocomposites Filled with Carbon Nanotubes and Carbon Black. *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 6 (1), 01015. Available at: https://jnep.sumdu.edu.ua/download/numbers/2014/1/articles/jnep_2014_V6_01015.pdf
- Klepko, V. V., Kolupaev, B. B., Lysenkov, E. A., Voloshyn, M. O. (2011). Viscoelastic properties of filled polyethylene glycol in the megahertz frequency band. *Materials Science*, 47 (1), 14–20. doi: <https://doi.org/10.1007/s11003-011-9362-0>
- Garkusha, O. M., Makhno, S. M., Prikhod'ko, G. P., Sementsov, Yu. I., Kartel, M. T. (2010). Structural Features and Properties of Polymeric Nanocomposites with Low Concentrations of Fillers. *Himia, Fizika ta Tehnologija Poverhni*, 1 (1), 103–110. Available at: <http://www.cpts.com.ua/index.php/cpts/article/view/12/9>
- Lysenkov, É. A., Klepko, V. V. (2015). Characteristic Features of the Thermophysical Properties of a System Based on Polyethylene Oxide and Carbon Nanotubes. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 88 (4), 1008–1014. doi: <https://doi.org/10.1007/s10891-015-1278-3>
- Misiura, A. I., Mamunya, Y. P. (2018). Electrical Conduction and Thermal Conduction of Metal-Polymer Composites. *Metallfizika i Noveishie Tekhnologii*, 40 (3), 311–326. doi: <https://doi.org/10.15407/mfint.40.03.0311>
- Dinzhos, R. V., Lysenkov, E. A., Fialko, N. M. (2015). Features of thermal conductivity of composites based on thermoplastic polymers and aluminum particles. *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 7 (3), 03022. Available at: https://jnep.sumdu.edu.ua/download/numbers/2015/3/articles/en/jnep_eng_2015_V7_No3_03022_Dinzhos.pdf
- Fuchs, S., Schütz, F., Förster, H.-J., Förster, A. (2013). Evaluation of common mixing models for calculating bulk thermal conductivity of sedimentary rocks: Correction charts and new conversion equations. *Geothermics*, 47, 40–52. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2013.02.002>
- Lysenkov, E. A., Lysenkova, I. P. (2020). Influence of nanodiamonds on the structure and thermophysical properties of polyethylene glycol-based systems. *Functional Materials*, 27 (4), 774–780. doi: <https://doi.org/10.15407/fm27.04.774>
- Lysenkov, E. A., Klepko, V. V., Lysenkova, I. P. (2020). Features of Structural Organization of Nanodiamonds in the Polyethylene Glycol Matrix. *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 12 (4), 04006-1–04006-6. doi: [https://doi.org/10.21272/jnep.12\(4\).04006](https://doi.org/10.21272/jnep.12(4).04006)

28. Structure and characteristics of solid polymers (2009). *Polymer Science Series A*, 51 (1), 26–48. doi: <https://doi.org/10.1134/s0965545x09010040>
29. Hida, S., Hori, T., Shiga, T., Elliott, J., Shiomi, J. (2013). Thermal resistance and phonon scattering at the interface between carbon nanotube and amorphous polyethylene. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 67, 1024–1029. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.08.068>
30. Mamunya, Ye. P., Levchenko, V. V., Parashchenko, I. M., Lebedev, E. V. (2016). Thermal and electrical conductivity of the polymer-metal composites with 1D structure of filler formed in a magnetic field. *Polymer journal*, 38 (1), 3–17. doi: <https://doi.org/10.15407/polymerj.38.01.003>
31. Tian, W., Yang, R. (2008). Phonon Transport and Thermal Conductivity Percolation in Random Nanoparticle Composites. *CMES*, 24 (2), 123–141. doi: <https://doi.org/10.3970/cmcs.2008.024.123>
32. Deshpande, R., Naik, G., Chopra, S., Deshmukh, K. A., Deshmukh, A. D., Peshwe, D. R. (2018). A study on mechanical properties of PBT nano-composites reinforced with microwave functionalized MWCNTs. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 346, 012004. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/346/1/012004>
33. Aeyzarq Muhammad Hadzreel, M. R., Siti Rabiattul Aisha, I. (2013). Effect of Reinforcement Alignment on the Properties of Polymer Matrix Composite. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 4, 548–554. doi: <https://doi.org/10.15282/jmes.4.2013.18.0051>
34. Kumari, S., Panigrahi, A., Singh, S. K., Pradhan, S. K. (2017). Enhanced corrosion resistance and mechanical properties of nanostructured graphene-polymer composite coating on copper by electrophoretic deposition. *Journal of Coatings Technology and Research*, 15 (3), 583–592. doi: <https://doi.org/10.1007/s11998-017-0001-z>
35. Wang, Q., Han, X. H., Sommers, A., Park, Y., T' Joen, C., Jacobi, A. (2012). A review on application of carbonaceous materials and carbon matrix composites for heat exchangers and heat sinks. *International Journal of Refrigeration*, 35 (1), 7–26. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2011.09.001>

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.231595

ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ВАЖКОНАВАНТАЖЕНИХ ДЕТАЛЕЙ ТРИБОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ МЕТОДОМ КОМБІНОВАНОГО ЛАЗЕРНО-ХІМІКО-ТЕРМІЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ (с. 6–13)

М. В. Кіндрачук, О. І. Духота, О. В. Тісов, Є. В. Корбут, А. О. Юрчук, В. В. Харченко, Н. О. Науменко

Виконано аналіз стану трибологічного забезпечення в авіаційній галузі. Встановлено пріоритетність використання технологій поверхневого зміцнення для підвищення ресурсу деталей вузлів тертя. Проведено огляд сучасних комбінованих технологій азотування і лазерної обробки поверхонь сталей. Визначено механізм пошкодження сталі 30X2HВФА кульково-гвинтового підйомального механізму закрилків транспортного літака, що розвивається внаслідок недостатньої поверхневої твердості матеріалу після загально-прийнятої термічної обробки. Оже-спектральним аналізом встановлено високу концентрацію кисню на поверхні: до 41,4 % ат. Виявлено науглецювання поверхні тертя, особливо значне на поверхні пітингового пошкодження. Запропоновано комплексну технологію поверхневого зміцнення азотування+лазерне дискретне гартування. Потужність випромінювання складала 1 кВт, діаметр плями фокусування – 2,5 мм і крок між центрами плям фокусування 2,5 мм. Загальна площа обробки лазером складала 70 %. Температура сталі перевищувала A_{c3} і відповідала діапазону температур гартування. Глибина азотованого шару зростає до 400 мкм, максимальна твердість на поверхні 1350–1380 HV_{0,2}. Спостерігається утворення суцільного азотованого шару товщиною 200–250 мкм, і перехідної зони, що складена з нітридів заліза стовпчастої форми, які проваджуються в матричний матеріал. Унаслідок цього зникає різкий градієнт механічних властивостей. Випробуваннями підтверджено, що зносостійкість комплексно обробленої поверхні в 2,1 рази вища в умовах сухого тертя, і в 4,5 рази – в умовах мащення консистентним мастилом «Ера» (РФ) при порівнянні з азотованою за загальноприйнятою технологією сталлю 30X2HВФА. Крім того, відсутнє крихке руйнування поверхні, значно знижується взаємодія з киснем.

Ключові слова: трибомеханічні системи, вузли тертя, азотована сталь, дискретна лазерна обробка, зносостійкість.

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.235578

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ГАЗОПОЛУМ'ЯНОГО НАПИЛЕННЯ ПОРОШКІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ І АДГЕЗІЙНОЇ МІЦНОСТІ (с. 14–24)

Daulet Yermekov, Vitaly Povetkin, Zivile Rutkuniene, Alfiya Nurmukhanova, Amina Bukayeva

Щорічно світова економіка несе величезні втрати через зношування і корозію деталей машин і обладнання. Цих втрат можна уникнути за допомогою цілеспрямованого превентивного захисту від зношування. Поряд з покриттям нових деталей, сюди входить відновлення зношених деталей. Ефективним методом є наплавлення матеріалів з високими експлуатаційними властивостями. Якість загартованих деталей залежить від властивостей наплавленого матеріалу, тому зміцнюючий матеріал або сплав вибирають з урахуванням робочого середовища деталі і способу нанесення покриття.

На сьогоднішній день існує безліч самофлюсівних наплавочних порошкових сплавів на основі нікелю, міді та інших, отриманих різними методами.

У статті розглядається процес дослідження газополум'яного напилення порошків для підвищення зносостійкості і адгезійної міцності. Проведено експериментальні дослідження з визначення оптимального складу легованого сплаву CrB₂, введеного до складу наплавочного сплаву GP-Ir40. Встановлено, що для отримання твердості наплавленого металу в діапазоні 450–600 HV необхідно ввести CrB₂ до складу покриття в межах 10 % від загальної маси. Таким чином, досягається збільшення міцності сплаву більш ніж на 54,41 HV. Проведено випробування на корозійну стійкість в агресивних середовищах сірководню H₂S, сірчаної кислоти H₂SO₄. Проведено оцінку зносостійкості ґрунтових насосів та визначено ресурс зносостійких деталей ґрунтових насосів зі сплаву IChN28N2.

Новий розроблений самофлюсівний наплавочний порошок на основі заліза зі зміцнюючою добавкою буде використовуватися для відновлення деталей машин і обладнання, що працюють в умовах абразивного зношування, корозії і підвищених температур або агресивних середовищ.

Ключові слова: порошки, полум'я, плазмові покриття, адгезія, міцність, зносостійкість, плазмотрон, корозія.

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.234783

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРНОГО СТАНУ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ МІКРОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ ПІСЛЯ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОГО ЗВАРЮВАННЯ (с. 25–31)

Д. В. Лаухін, В. Д. Позняков, В. А. Костін, О. В. Бекетов, Н. О. Ротт, Ю. С. Слупська, Л. М. Дадіверіна, О. В. Любімова-Зінченко

Зварювання термомеханічно-зміцнених матеріалів має певні труднощі з точки зору втрати міцнісних характеристик в зоні термічного впливу. Вирішення даної проблеми можливе шляхом застосування технологічних схем зварювання, які включають сплавлення матеріалів у вузькій зоні контакту. Однією з таких технологічних схем є електронно-променеве зварювання, яке, на теперішній час, широко застосовується при виробництві конструкцій з тугоплавких і хімічно-активних матеріалів. Однією з головних переваг процесу електронно-променевого зварювання є мала величина погонної енергії, яка призводить до формування вузьких зон розплавлення та термічного впливу і, як наслідок, незначним деформаціями в структурі матеріалу. Зварне з'єднання структурно можна розподілити на декілька зон, які відрізняються за морфологічними особливостями структури. Найбільш цікавими, з точки зору забезпечення якості з'єднання, є границі між зонами. Показано, що застосування локальних джерел нагріву, яке має місце при

електронно-променевому зварюванні, призводить до міграції границь зерен. Як наслідок, на границях між зонами зварного з'єднання формуються чіткі межі розділу – лінії сплавлення. Формування структурного стану зварного з'єднання обумовлено одночасним протіканням декількох процесів. По-перше, кристалізації із рідкого стану – формування структури зварного шва та границі зварний шов – зона термічного впливу. По-друге, фазово-структурні перетворення в твердому стані – зона термічного впливу, границя зона термічного впливу – основний метал. Виходячи з цього, слід зауважити, що геометрія та якість швів при електронно-променевому зварюванні взаємопов'язані сильніше, ніж при інших способах зварювання. Таким чином, одним з головних параметрів, які забезпечують якість зварного з'єднання, є структурний стан матеріалу, який формується під час зварювання.

Ключові слова: електронно-променеве зварювання, структурний стан, низьковуглецеві мікролеговані сталі, зони зварного з'єднання.

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.234251

ПОРІВНЯЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РІЗНИХ ТИПІВ ПІНОНІКЕЛЮ ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ В СУПЕРКОНДЕНСАТОРАХ ТА ІНШИХ ЕЛЕКТРОХІМІЧНИХ ПРИСТРОЯХ (с. 32–38)

В. Л. Коваленко, В. А. Коток

Пінонікель широко використовується як струмовідвід/струмопідвід та основа гідроксиднікелевих електродів для різних електрохімічних пристроїв – акумуляторів, гібридних суперконденсаторів, пристроїв електрокаталітичного окиснення органічних речовин. Вивчені характеристики комерційних зразків пінонікелю виробництва «Новомет-Перм» (Російська Федерація) (отриманий хімічним, а потім електрохімічним нікелюванням) та «Linyi Gelon LIB Co Ltd» (Китай) (отриманий хімічним нікелюванням). Визначення природи пасивності проведено шляхом формування модельних зразків електрохімічного та хімічного нікелю на сталевій основі. Для пасивного зразка було проведено активацію шляхом нанесення шару електрохімічного нікелю із розчину ударного нікелювання. Активовані, неактивовані зразки пінонікелю та модельні зразки вивчені методами циклічної вольтамперометрії та гальваностатичного зарядно-розрядного циклування в режимі суперконденсатора. Порівняльний аналіз зразків пінонікелю китайського і російського виробництва показав значну пасивність пінонікелю китайського виробництва: в циклічній вольтамперометрії активність нижче в 4,8 рази, при гальваностатичному зарядно-розрядному циклуванні – в 2,59 рази. Висловлено припущення, що висока пасивність визначається тим, що зразок складається зі сплаву Ni-P або Ni-B. Дане припущення доведено методом імітаційного натурального моделювання. Електрохімічна активність хімічного нікелю нижче активності електрохімічного в 1,25 рази (за даними циклічної вольтамперометрії) та в 1,58 рази (за даними гальваностатичного циклування). Вперше проведено активацію пінонікелю китайського виробництва (хімічного нікелю) шляхом нанесення шару електрохімічного нікелю з електроліту ударного нікелю. Показана висока ефективність активації: на циклічній кривій питомий струм анодного піку збільшився в 8,71 разів, а при гальваностатичному циклуванні підвищення питомої ємності склало від 1,73 разів (при $i=120$ мА/см²) до 4,84 разів (при $i=20$ мА/см²).

Ключові слова: пінонікель, електрохімічний нікель, хімічний нікель, ударний нікель, активація, струмовідвід, суперконденсатор.

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.235775

ВИЗНАЧЕННЯ МІЦНОСТІ ЗЧЕПЛЕННЯ ПОКРИТТЯ, ОТРИМАНОГО ЕЛЕКТРОДУГОВИМ НАПИЛЕННЯМ З ПУЛЬСАЦІЄЮ РОЗПИЛЮВАЛЬНОГО ПОТОКУ ПОВІТРЯ (с. 39–47)

І. В. Захарова

При електродуговому напиленні під час перенесення розплавленого металу потоком повітря відбувається значне вигорання легуючих елементів з утворенням великої кількості оксидів, що негативно впливає на міцність зчеплення покриття з основою. запропоновано вирішення проблеми підвищення міцності зчеплення шляхом використання пульсації розпилювального повітряного потоку. При оптимальній частоті імпульсного перекриття потоку час утворення крапель рідкого металу на торцях електродів збігається з частотою імпульсів розпилювального потоку. В результаті краплі набувають оптимального розміру, вони транспортуються повітряним потоком зі збереженням енергії, меншою масою кисню і, як наслідок, значним зменшенням окислювання легуючих елементів у матеріалі, що напилюється. проаналізовано існуючі методи випробувань на міцність зчеплення з основою напилених покриттів. Розроблено та описано конструкцію модернізованого пристрою для визначення міцності зчеплення, який забезпечує комплексне навантаження на покриття із поєднанням відриву і зрізу. Проведенням випробувань виявлено значне (до двох разів) зростання міцності зчеплення алюмінієвого, цинк-алюмінієвого та сталевих (Св08А) покриттів, нанесених при застосуванні пульсації повітря. Це досягається завдяки підвищенню кількості зон сплавлення часток покриття між собою і з основою. Показано, що вплив частоти пульсації на міцність зчеплення змінюється за кривою із максимумом, що відповідає частоті в межах 70–80 Гц незалежно від типу матеріалу покриття. Встановлено, що алюмінієве покриття має підвищену схильність до окислення, внаслідок чого за міцністю зчеплення воно на 15–20 % поступається цинк-алюмінієвому покриттю. Отримані дані обґрунтовують використання запропонованої технології напилення у виробництві.

Ключові слова: електродугове напилення, покриття, пульсуючий потік, окислення, частка, міцність зчеплення.

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.233490

ВПЛИВ СТРУКТУРИ І ТЕРМОМЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ОРІЄНТОВАНИХ КАРБОПЛАСТИКІВ НА ЇХ ТРИБОТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ (с. 48–58)

О. В. Диха, О. С. Дробот, В. П. Олександренко, С. Я. Підгайчук, П. М. Ярошенко, О. П. Бабак

Встановлено, що карбопластики як конструкційні матеріали знаходять все більш широке застосування в різних галузях промисловості. За комплексом властивостей карбопластики перевершують сталі, чавуни, сплави кольорових металів. Але застосуван-

ня цих матеріалів для деталей вузлів тертя машин є поки що обмеженим внаслідок складних умов експлуатації сучасних трибосистем. Метою роботи є комплексні експериментальні дослідження трибологічних властивостей матеріалів трибосистеми «карбопластик-метал» з урахуванням структурної будови, механічних та теплофізичних характеристик. Порівняльні випробування залежності коефіцієнту тертя від навантаження для металевих і полімерних антифрикційних матеріалів показали зниження коефіцієнту тертя для пластиків в 3...4 рази (текстоліт, карботекстоліт і карбоволокніт). Досліджено вплив орієнтації наповнювача відносно площини ковзання на антифрикційні властивості карбоволокніту та виявлено, що напрямок армування волокон паралельно площі тертя забезпечує менший знос карбоволокніту. Встановлена лінійна залежність інтенсивності зношування карбоволокніту, армованого графітованими волокнами від теплоємності та енергоємності спряженої сталеві поверхні. На основі мікроструктурного аналізу встановлений пошаровий механізм поверхневого руйнування карбоволокнітів внаслідок розриву зв'язків між частинами волокна з урахуванням напрямку розташування волокон до поверхні тертя. Отримані результати дозволяють надавати практичні рекомендації для вибору складу і структури матеріалів трибосистеми «карбоволокніт-метал» для застосування у вузлах тертя машин за критерієм підвищеної зносостійкості.

Ключові слова: полімерні композити, орієнтовані карболастики, теплопровідність, інтенсивність зношування, коефіцієнт тертя.

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.228731

ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ ДИСПЕРСНИХ ЧАСТИНОК АЛЮМІНІЮ НА ФУНКЦІОНАЛЬНІ ВЛАСТИВОСТІ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ НА ОСНОВІ ПОЛІВІНІЛІДЕНФТОРИДУ (с. 59–66)

Е. А. Лисенков, Л. П. Клименко

Полімерні матеріали, які містять неорганічні наповнювачі, завдяки поєднанню еластичності матриці та міцності наповнювача демонструють унікальний комплекс фізичних властивостей. Робота присвячена визначенню впливу дисперсних частинок алюмінію на властивості матеріалів на основі полівініліденфториду. У результаті проведеної роботи було виготовлено серію композитних матеріалів за допомогою поршневого екструдера. Було досліджено їх функціональні характеристики, використовуючи методи теплофізичного та механічного аналізу, дилатометрії та акустичної спектроскопії. Встановлено, що введення дисперсних частинок алюмінію приводить до розпушування матриці, що може свідчити про перехід макромолекул із кристалічної фази у граничний шар навколо наповнювача. Така особливість структуроутворення та рівномірний розподіл частинок наповнювача забезпечили покращення функціональних характеристик отриманих матеріалів. Показано, що зі збільшенням вмісту наповнювача у системі до 5 % теплопровідність зростає з 0,17 Вт/(м·К) до 1,55 Вт/(м·К). Введення наповнювача приводить до поліпшення термостійкості отриманих матеріалів на 17 К. Зростання як температури плавлення, так і деструкції, пояснюється утворенням більш досконалої структури полімеру з вищим ступенем кристалічності. Виявлено зростання швидкості поширення ультразвуку на 67 % та міцності на розрив на 36 % в отриманих матеріалах, що можна пояснити внеском від наповнювача, який має більшу звукопровідність та механічну міцність, ніж полімерна матриця. У таких системах проявляється армувальний вплив частинок алюмінію на полімерну матрицю, тому вони можуть використовуватись як конструкційні матеріали із поліпшеними функціональними характеристиками.

Ключові слова: полімерні композитні матеріали, дисперсні частинки алюмінію, теплопровідність, міцність на розрив, швидкість звуку.